

등간격 사각 배열 안테나를 적용한 캐스케이드 도래각 추정

김태윤* · 황석승**

Cascade AOA Estimation Using Uniform Rectangular Array Antenna

Tae-Yun Kim* · Suk-Seung Hwang**

요약

안테나 어레이 기반의 무선 통신 시스템에서 신호의 도래각(: Angle-of-Arrival, AOA) 정보는 매우 중요한 요소이며, 이를 추정하기 위한 다수의 방법들이 존재한다. 대부분의 도래각 추정 알고리즘은 등간격 선형 배열(: Uniform Linear Array, ULA) 안테나를 기반으로 하고 있으며, 몇몇의 알고리즘은 평면 배열(: Planar Array, PA) 안테나를 적용하였다. 본 논문에서는 등간격 사각 어레이 안테나를 기반으로 인접하게 위치한 여러 개의 신호 도래각들을 효율적으로 추정하기 위한 알고리즘을 소개한다. 제시된 알고리즘은 두 단계를 거치는데, 가까운 신호원들이 모여 이루어진 대략적인 신호원 그룹을 CAPON 알고리즘을 사용하여 추정한 후, 추정된 그룹 안에 포함되어 있는 각 신호원의 상세한 도래각을 Beamspace MUSIC 알고리즘을 사용하여 추정한다. 시뮬레이션을 통해 제시된 도래각 추정 알고리즘의 성능을 평가하고 분석한다.

ABSTRACT

In the wireless communication system based on an array antenna, the angle of arrival (AOA) information of signal is very important element and various AOA estimation algorithms have been studied. Although most AOA estimation algorithms employ the uniform linear array (ULA), some algorithms apply the planar array (PA) antenna. In this paper, we present an algorithm for efficiently estimating AOAs of adjacent multiple signals, based on the uniform rectangular array antenna. This approach has two steps; after approximately estimating AOA groups consisting of the closely located signal sources using CAPON, accurately estimating the individual AOA of each signal in the estimated AOA group using Beamspace MUSIC. The estimation performance of the presented cascade AOA algorithm is illustrated through the computer simulation example.

키워드

AOA Estimation, CAPON, Beamspace MUSIC, Uniform Rectangular Array Antenna
도래각 추정, CAPON, 빔공간 MUSIC, 등간격 사각 배열 안테나

1. 서론

레이더, 위성 등과 같은 안테나 어레이를 기반으로

하는 무선 통신 시스템에서 신호의 도래각 추정[1-3]은 매우 중요한 요소 중 하나이다. 도래각 추정에 대한 연구는 등간격 선형 배열 안테나를 바탕으로 1차

* 조선대학교 전자공학과 (skriekd12@chosun.kr)

** 교신저자 : 조선대학교 전자공학부

• 접수일 : 2018. 08. 25

• 수정완료일 : 2018. 09. 19

• 게재확정일 : 2018. 10. 15

• Received : Aug. 25, 2018, Revised : Sep. 19, 2018, Accepted : Oct. 15, 2018

• Corresponding Author : Suk-Seung Hwang

School. of Electronic Engineering, Chosun University,

Email : hwangss@chosun.ac.kr

원의 도래각 추정이 먼저 진행되었고, L-shape, 등간격 사각배열, 등간격 원형배열 등 평면 배열 안테나를 사용하는 2차원 도래각 추정으로 확장되었다. 도래각 추정 알고리즘은 크게 빔형성 방법과 부공간 방법으로 나뉘는데[4-5], 빔형성 방법으로는 CAPON 알고리즘[6]이 대표적이고, 부공간 방법으로는 MUSIC[7]과 ESPRIT(Estimation Signal Parameter via a Rotational Invariant Technique)[8] 알고리즘 등이 있다. 또한, 등간격 선형 배열 안테나를 기반으로 대부분의 도래각 추정 알고리즘이 제안되었으나, 몇몇의 알고리즘은 평면 배열 안테나를 적용하여 2차원 형태로 도래각을 추정한다. 2차원 도래각 추정을 위한 안테나 배열은 L-shape, 등간격 원형 배열이 대부분이며[9-11], 등간격 사각 배열을 적용한 2차원 도래각 추정 알고리즘의 개발은 미비한 실정이다.

본 논문에서는 등간격 사각 배열 안테나를 기반으로 인접한 신호의 도래각을 효율적으로 추정하기 위한 Cascade 도래각 추정 알고리즘을 소개한다. 제시된 알고리즘은 2단계로 수행되는데, 먼저, 근접하게 위치한 신호원들로 이루어진 AOA 그룹을 CAPON을 이용하여 대략적으로 추정하고, 추정된 AOA 그룹에 포함되어 있는 개별적인 신호의 상세한 도래각을 Beam-space MUSIC 알고리즘[12]을 이용하여 추정한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서 수신신호 모델을 제시하고, 3장에서 인접한 다수 개 신호원의 도래각을 효율적으로 추정하기 위한 Cascade AOA 추정 알고리즘을 소개한다. 4장에서 제시된 도래각 추정 알고리즘의 성능평가를 위한 컴퓨터 시뮬레이션 결과를 보이고, 5장에서 본 논문의 결론을 맺는다.

II. 수신신호 모델

본 장에서는 수신기의 안테나로 입사되는 다수 개의 신호와 잡음으로 구성된 수신신호 모델을 제시한다. 그림 1의 구조를 갖는 $M \times N$ 크기의 등간격 사각 배열 안테나에 L 개의 신호가 입사 된다고 가정하면, 샘플(sample) 인덱스 k 에 대한 수신신호 벡터는 식(1)과 같이 주어진다.

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

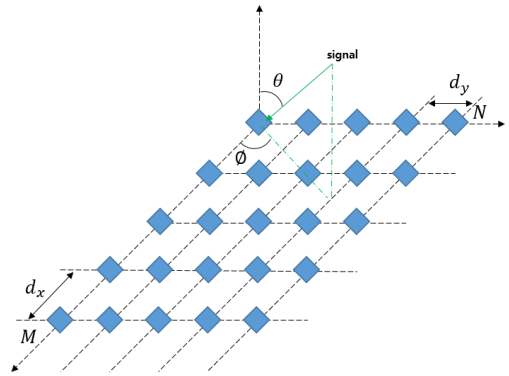


그림 1. 안테나 배열 구조
Fig. 1 Antenna array structure

식 (1)에서 $\mathbf{x}(k)$ 는 $MN \times 1$ 크기의 수신신호 벡터이며, \mathbf{A} 는 크기 $MN \times L$ 의 어레이 응답 행렬이고, 행렬 \mathbf{A} 의 i 번째 열은 i 번째 신호에 대한 어레이 응답 벡터로 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{a}_i = \begin{bmatrix} 1 \\ e^{-ju_i} \\ \vdots \\ e^{-j(M-1)u_i} \\ e^{-jv_i} \\ e^{-j(u_i+v_i)} \\ \vdots \\ e^{-j((M-1)u_i+(N-1)v_i)} \end{bmatrix} \quad (2)$$

식 (2)에서 $u_i = 2\pi(d_x/\lambda) \cos \phi_i \sin \theta_i$, $v_i = 2\pi(d_y/\lambda) \sin \phi_i \sin \theta_i$, 이고 ϕ 는 방위각(azimuth angle), θ 는 고도각(elevation angle), λ 는 파장, d 는 안테나 소자간격을 각각 의미한다. $\mathbf{s}(k)$ 는 $L \times 1$ 크기의 신호벡터이고, $\mathbf{n}(k)$ 는 $MN \times 1$ 크기의 잡음 벡터이다.

III. Cascade AOA 추정 알고리즘

본 장에서는 인접한 다수 개 신호의 도래각들을 효율적으로 추정하기 위한 Cascade AOA 추정 알고리즘을 소개한다. 제시된 알고리즘은 CAPON 알고리즘

과 Beamspace MUSIC 알고리즘을 사용하여 총 2단계의 도래각 추정을 수행한다. 1단계에서 인접하게 입사되는 신호에 대해 분해능은 낮지만 복잡도면에서 우수한 CAPON 알고리즘을 사용하여 신호원의 대략적인 AOA 그룹을 추정한다. 1단계의 결과를 기반으로, 2단계에서는 추정된 AOA 그룹 내에 포함되어 있는 각 신호원의 상세한 도래각을 복잡도는 다소 높으나 우수한 분해능을 보유한 Beamspace MUSIC 알고리즘을 사용하여 추정한다. 또한, 본 논문에서는 캐스케이드 AOA 추정 알고리즘을 위성 환경에 적합한 등간격 사각 배열 안테나 시스템에 적용한다. 그림 2는 제시된 캐스케이드 AOA 추정 알고리즘의 기본 구조를 보인다.

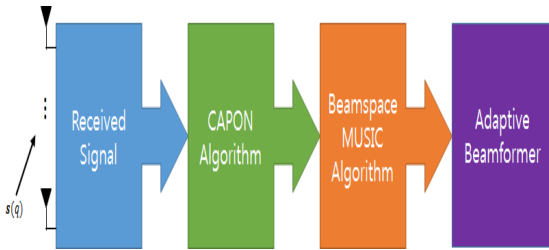


그림 2. 캐스케이드 AOA 추정 알고리즘
Fig. 2 Cascade AOA estimation algorithm

3.1 CAPON 알고리즘

CAPON은 1969년 Capon에 의해 소개된 알고리즘으로 원하는 신호의 입사 방향의 이득은 일정하게 유지하면서 간섭신호의 도래각 방향에는 적은 가중치를 주어 안테나의 출력 신호-대-잡음 비 (Signal-to-Noise Ratio, SNR)를 극대화 하는 기법이다. 신호 대 잡음비를 높이기 위해 원하는 신호의 도래각에 대한 정보만을 필요로 한다. 따라서 고유치 분해가 필요한 부공간 기반 알고리즘에 비해 복잡도가 낮다. 도래각 정보는 안테나에 수신된 신호의 입사각 정보에 의존하며, 신호가 인접해서 입사하거나, 입사 신호의 신호 대 잡음비가 낮은 경우 분해능이 낮아지는 단점이 있다[13]. 본 논문에서 제시된 캐스케이드 알고리즘은 분해능이 다소 떨어지더라도 빠르게 대략적인 신호원 그룹을 파악하기 위해 CAPON 알고리즘을 사용한다.

CAPON 알고리즘의 비용함수는 식(3)과 같다.

$$P_{ca}(\theta, \phi) = \frac{1}{\mathbf{a}(\theta, \phi)^H \mathbf{R}_x^{-1} \mathbf{a}(\theta, \phi)} \quad (3)$$

식(3)에서 $\mathbf{R}_x = E[\mathbf{x}(k)\mathbf{x}(k)^H]$ 는 수신 신호의 공분산 행렬이며, $\mathbf{a}(\theta, \phi)$ 는 특정 고도각과 방위각에 대한 어레이 응답 벡터이고, $(\cdot)^H$ 은 켈레 전치이다. 식(3)의 비용함수의 피크 값들이 AOA 그룹의 최대 값들이 되고, 해당 고도각 및 방위각 즉, 도래각 정보는 해당 AOA 그룹에 포함된다.

3.2 Beamspace MUSIC 알고리즘

MUSIC 알고리즘은 신호 부공간(signal subspace)과 잡음 부공간(noise subspace)이 서로 직교한다는 성질을 이용하여 고유치 분해를 통해 신호의 도래각을 추정하는 알고리즘이다. 높은 분해능을 갖지만 고유치 분해를 수행하기 때문에 복잡도가 높다. 복잡도를 줄이기 위해 MUSIC 알고리즘에 빔공간 처리기를 적용하여 특정 구간의 탐색에 적합한 Beamspace MUSIC 알고리즘이 제안되었다. 적절한 빔형성기의 구성을 통해(전체 소자수보다 작거나 같은 수의 소자를 이용하여 빔을 형성($P \leq MN$)) 특정 구역만 탐색하여 계산량 감소, 분해능 향상, 민감도 감소 등의 효과를 갖는다[14]. 빔공간 변환 행렬을 구성하는 방법으로 몇 가지가 있으나[15], 본 논문에서는 이산 푸리에 변환(Discrete Fourier Transform, DFT) 방식을 사용한다.

빔공간 출력은 식(4)와 같다.

$$\mathbf{y}(k) = \mathbf{B}^H \mathbf{x}(k) \quad (4)$$

식(4)에서 \mathbf{B} 는 2차원 빔공간 변환 행렬로 식(5)와 같이 정의된다.

$$\mathbf{B} = \frac{1}{\sqrt{MN}} \mathbf{B}_y \otimes \mathbf{B}_x \quad (5)$$

식(5)에서 \mathbf{B}_x 와 \mathbf{B}_y 는 x 축과 y 축에 대한 1차원 DFT 행렬을 나타내고 \otimes 는 kronecker 연산자를 나타낸다. Beamspace MUSIC 알고리즘의 비용함수는 식(6)과 같다.

$$P_{BS}(\theta, \phi) = \frac{[\mathbf{B}^H \mathbf{a}(\theta, \phi)]^H [\mathbf{B}^H \mathbf{a}(\theta, \phi)]}{[\mathbf{B}^H \mathbf{a}(\theta, \phi)]^H E_{BSN} E_{BSN}^H [\mathbf{B}^H \mathbf{a}(\theta, \phi)]} \quad (6)$$

식(6)에서 E_{BSN} 는 빔공간 잡음 부공간 고유벡터 행렬로서, 식(4)의 $\mathbf{y}(k)$ 의 고유치분해를 통해서 계산된다. 식(6)의 피크 값에 해당하는 고도각 및 방위각이, CAPON에 의해 추정된 특정 AOA 그룹 내에 포함되어 있는 특정 신호의 상세 도래각 정보가 된다.

IV. 컴퓨터 시뮬레이션

본 장에서는 제시된 등간격 사각 배열 안테나 기반의 캐스케이드 AOA 추정 알고리즘의 성능평가를 위한 시뮬레이션 결과를 제시한다. 컴퓨터 시뮬레이션을

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

Signal	Azimuth(°)	Elevation(°)	Center Frequency
CW	-50	-58	0.3
WB	26	-58	0.05
AM	-140, 142	-58, -58	0.35, 0.45
FM	-142, 144	-58	0.2, 0.4

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

Signal	Azimuth(°)	Elevation(°)	Center Frequency
CW	-150 50	-58	0.1 0.4
WB	-153 -40	-58	0.25 0.35
AM	-37	-58, -58	0.05
FM	100	-58	0.15

위해 두 가지 시나리오를 고려하였다. 첫 번째 시나리오에서는 1개의 CW(Continuous Wave)신호, 1개의 WB(Wideband) 간섭신호, 2개의 FM(Frequency Modulation)신호, 2개의 AM(Amplitude Modulation)신호를 포함한 총 6개의 신호가 사용되었고, 두 번째 시나리오에서는 2개의 CW신호, 2개의 WB신호, 1개의 AM신호 1개의 FM 신호를 포함한 총 6개의 신호가 고려되었다. 시뮬레이션에 사용된 각 신호의 주요

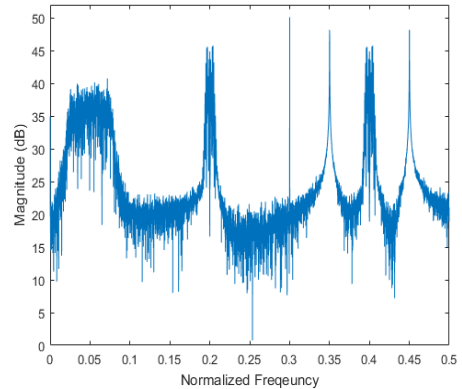


그림 3. 첫 번째 시나리오의 수신신호 스펙트럼
Fig. 3 The received signal spectrum of the first scenario

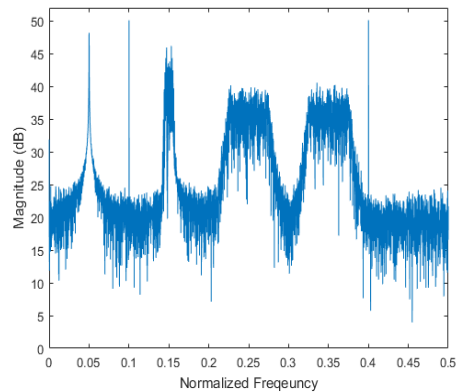


그림 4. 두 번째 시나리오 수신신호 스펙트럼
Fig. 4 The received signal spectrum of the second scenario

매개변수는 표1과 표2에 정리되어 있고, 등간격 사각 배열 안테나의 크기로 4x3과 4x4의 두 경우를 고려하였다. 두 시나리오에서 AM 신호의 변조지수 α 는 0.03이고, FM 신호의 변조 인덱스 β 는 0.08이며, 정규화된 변조 주파수 f_m 은 0.001로 가정하였다. 또한, 신호 대 잡음비는 20dB로 가정하였다.

그림 3과 4는 첫 번째 시나리오와 두 번째 시나리오에 대한 수신신호의 스펙트럼으로 모든 신호들의 존재를 확인할 수 있다. 그림 5와 6은 두 시나리오에 대한 CAPON알고리즘의 비용함수를 보인다. 그림 5

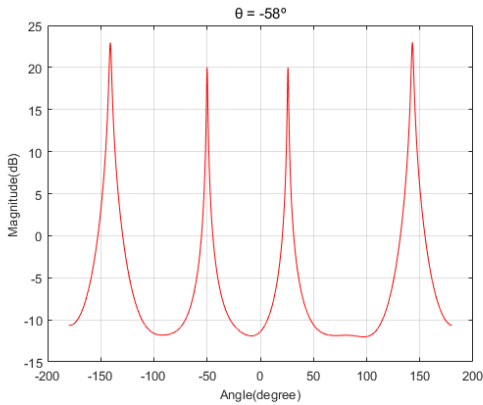


그림 5. 첫 번째 시나리오에 대한 CAPON 알고리즘 비용함수 (방위각)

Fig. 5 CAPON algorithm cost function for the first scenario (azimuth angle)

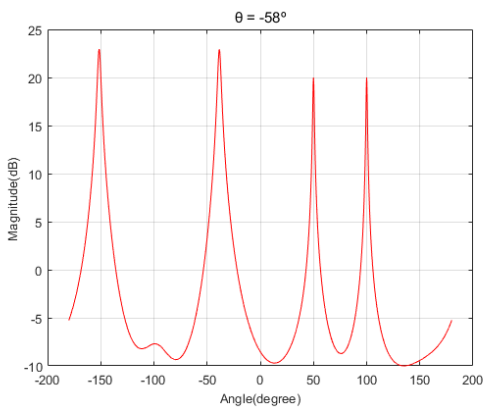


그림 6. 두 번째 시나리오 대한 CAPON 알고리즘 비용함수 (방위각)

Fig. 6 CAPON algorithm cost function for the second scenario (azimuth angle)

의 결과 -141° , -50° , 26° , 143° 에서 피크 값을 갖는 총 4개의 신호 그룹을 추정하였는데, -140° 의 방위각을 갖는 AM1 신호와 -142° 의 방위각을 갖는 FM1 신호가 -141° 에서 피크 값을 갖는 하나의 AOA 그룹으로 분류되었고, 142° 의 방위각을 갖는 AM2 신호와 144° 의 방위각을 갖는 FM2 신호가 143° 에서 피크 값을 갖는 하나의 AOA 그룹으로 분류되었다. 그림 6의 결과 -151° , -38° , 50° , 100° 로 총 4개의 신호 그룹을 추정하였으며, -150° 의 방위각을 갖는 CW1 신호와

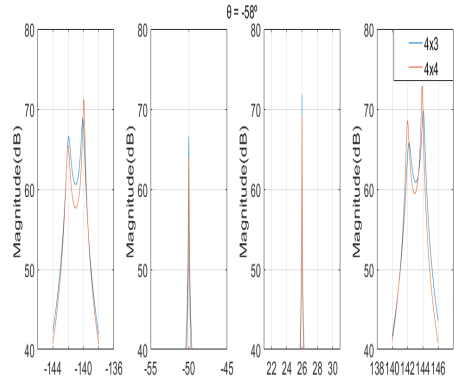


그림 7. 첫 번째 시나리오에 대한 Beamspace MUSIC 알고리즘 비용함수 (방위각)

Fig. 7 Beamspace MUSIC algorithm cost function for the first scenario (azimuth angle)

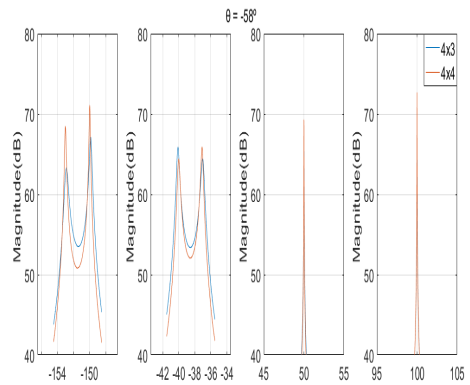


그림 8. 두 번째 시나리오에 대한 Beamspace MUSIC 알고리즘 비용함수 (방위각)

Fig. 8 Beamspace MUSIC algorithm cost function for the second scenario (azimuth angle)

-153° 의 방위각을 갖는 WB1 신호가 -151° 에서 피크 값을 갖는 하나의 AOA 그룹으로 분류되었고, -40° 의 방위각을 갖는 WB2 신호와 -37° 의 방위각을 갖는 AM1 신호가 -38° 에서 피크 값을 갖는 하나의 AOA 그룹으로 분류되었다. 본 시뮬레이션에서, CAPON 알고리즘의 해상도(resolution)는 대략적이지만 빠른 추정을 위해 1° 의 값을 적용하였다.

그림 7과 8은 그림 5와 6에서 추정된 AOA 그룹에 대한 Beamspace MUSIC 알고리즘의 비용함수를 보인다. 그림 7에서, 4x3 안테나를 사용한 경우 추정된

방위 도래각은 -142.13° , -139.99° , -50° , 26° , 142.21° , 143.74° 이고, 4x4 안테나를 사용한 경우 추정된 방위 도래각은 -141.99° , -140.09° , -50° , 26° , 142.04° , 143.99° 의 결과를 얻었다. 그림 8에서는, 4x3 안테나를 사용한 경우 추정된 방위 도래각은 -152.91° , -149.93° , -40.06° , -37.19° , 50° , 100° 이고, 4x4 안테나를 사용한 경우 추정된 방위 도래각의 결과는 -153.03° , -150.07° , -39.92° , -37.04° , 50° , 100° 이다. Beamspace MUSIC 알고리즘의 경우, 보다 정확한 도래각 추정을 위해 0.01° 의 해상도를 적용하였다. 위의 결과들로부터, 4x4 사각 배열 안테나의 추정 결과가 4x3 안테나의 결과에 비해 더 정확하다는 것을 확인할 수 있다. 즉, 안테나 배열의 사이즈가 커지면 주어진 시나리오 환경에서 더 우수한 성능을 갖는다는 것을 확인할 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 다수 개의 인접한 신호원의 도래각을 효율적으로 추정하기 위해 등간격 사각 배열 안테나를 기반으로 하는 캐스케이드 도래각 추정 알고리즘을 제시하였다. 제시된 캐스케이드 알고리즘은 CAPON 알고리즘을 사용하여 다수 개의 신호원들이 포함되어 있는 대략적인 AOA 그룹을 추정하고, Beamspace MUSIC 알고리즘을 사용하여 추정된 AOA 그룹 내의 개별 신호의 상세한 AOA를 정확히 추정한다. 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 4x3 크기의 안테나와 4x4 크기의 안테나에 대한 성능평가 결과를 확인하였다.

감사의 글

이 연구는 방위사업청 및 국방과학연구소의 재원에 의해 설립된 신호정보 특화연구센터 사업의 지원을 받아 수행되었음

References

- [1] C. You, B. Song, and I. Hwang, "Research Regarding Filter Composition and Motor Control for Yagi-Antenna Remote Tracking System," *J. of the Korea Institute of Electronics Communications Sciences*, vol. 11, no. 11, 2016, pp. 1039-1046.
- [2] S. Hwang, "Output SINR Analysis of GPS Adaptive Interference Canceler Based on Modified Despreader," *J. of the Korea Institute of Electronics Communications Sciences*, vol. 9, no. 2, 2014, pp. 195-202.
- [3] J. Mun, Y. Bae, and S. Hwang, "Adaptive Beamforming System Architecture Based on AOA Estimator," *J. of the Korea Institute of Electronics Communications Sciences*, vol. 12, no. 5, 2017, pp. 777-782.
- [4] H. L. Van Trees, *Optimum Array Processing Part IV of Detection, Estimation and Modulation Theory*. New York: Wiley, 2002.
- [5] H. Krim and M. Viberg, "Two decades of array signal processing research: parametric approach," *IEEE Signal Processing Mag.*, vol. 13, no. 4, July 1996, pp. 67-94.
- [6] J. Capon, "High resolution frequency wavenumber spectrum analysis," *Proc. of the IEEE*, vol. 57, no. 8, Aug. 1969, pp. 1408-1418.
- [7] R. O. Schmidt, "Multiple emitter location and signal parameter estimation," *IEEE Trans. Antennas Propagation*, vol. 34, no. 3, Mar. 1986, pp. 276-280.
- [8] R. Roy and T. Kailath, "ESPRIT-estimation of signal parameters via rotational invariance techniques," *IEEE Trans. Acoustics, Speech Signal Processing*, vol. 37, no. 7, July 1989, pp. 984-995.
- [9] A. Karima and D. Benazzouz. "2D DOA estimation performance using split vertical linear and circular arrays," *Institute of Electrical Engineers of Japan Trans. Electrical*

and *Electronic Engineering*, vol. 11, no. 4, July 2016, pp. 480-487.

- [10] X. Lian and J. Zhou. "2-D DOA estimation for uniform circular arrays with PM," *2006 7th IEEE Int. Symp. on Antennas, Propagation & EM Theory(ISAPE)*, Guilin, China, Oct. 2006.
- [11] J. Liang and D. Liu. "Two L-shaped array-based 2-D DOAs estimation in the presence of mutual coupling," *Progress In Electromagnetics Research*, vol. 112, 2011, pp. 273-298.
- [12] C. Sun and Y. X. Yang, "On beampattern design for beamspace music," *Acoustical Science and Technology*, vol. 25, no. 1, 2004, pp. 2-8.
- [13] T. S. Kiong, S. B. Salem, J. K. S. Paw, K. P. Sankar, and S. Darzi, "Minimum variance distortionless response beamformer with enhanced nulling level control via dynamic mutated artificial immune system," *The Scientific World J.*, vol. 2014, 2014, pp. 1-9.
- [14] D. Yeom, S. Park, J. Kim, and M. Lee, "Performance analysis of beamspace MUSIC with beamforming angle," *2014 8th IEEE Int. Conf. on In Signal Processing and Communication Systems (ICSPCS)*, Gold Coast, Australia, Dec. 2014.
- [15] N. Yuri and P. Llia, "Performance Study of Beamspace Processing DOA Estimation by MUSIC and Capon Methods," In *Proc. Int. Siberian Conf. on Control and Communications (SIBCON)*, Omsk, Russia, May 2015.

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, RFID



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 ~ 현재 조선대학교 전자공학과 교수
※ 관심분야 : 적응신호처리, 위치추정, 채널추정, 이동로봇용 위치추정, 간섭제거, RFID

