

# 빔형성 위성 시스템의 동심원 배열 안테나에 대한 도래각 추정 성능 분석

김태윤\* · Lee, Dongbin\*\* · 황석승\*\*\*

## Performance Analysis of AOA Estimation for Concentric Ring Array Antenna in Beamforming Satellite System

Tae-Yun Kim\* · Dongbin Lee\*\* · Suk-Seung Hwang\*\*\*

### 요 약

위상 배열 안테나는 다수개의 안테나 소자를 선형 혹은 평면(격자형 혹은 원형)으로 배열하여 각 소자에 대한 위상을 전자적으로 제어하여, 안테나의 기계적인 회전 없이 빔의 신속한 지향이 가능하다는 장점이 있다. 평면 배열 안테나는 주로 격자형 배열과 원형 배열을 사용하는데, 원형 배열이 구조적 특성상 격자형에 비해 높은 분해능을 가진다. 그러나 많은 요소를 사용하는 원형 배열의 경우 전체 배열의 반지름이 증가되어, 제한된 면적에서는 반지름이 각기 다른 다수개의 원형 배열을 가지는 동심원 배열(CCA : Concentric Circular Array or CRA : Concentric Ring Array)을 사용하게 된다. 본 논문에서는 동심원 배열 안테나를 적용한 적응 빔형성 위성 시스템에서의 도래각 추정기를 소개하고 성능분석 결과를 제시한다. 또한, 원형 배열 안테나를 적용한 경우와의 성능을 비교/분석한다.

### ABSTRACT

The phased array antenna has an advantage enabling rapid beam aim without the mechanical rotation of the antenna, because it arranges multiple elements in a linear or planer (grid or circular) and electronically controls the phase for each element. The planar array antenna is generally used a grid array and a circular array, and the circular form has the higher resolution comparing to the grid form due to the its structural characteristics. However, a concentric circular array (CCA) or a concentric ring array (CRA) with multiple circular arrays which each has different radius is used in the limited area, because the entire radius should be increased for the circular array with a number of elements. In this paper, we introduce the angle-of-arrival (AOA) estimator for an adaptive beamforming satellite system based on CRA and provide the simulation results for performance evaluation. In addition, simulation results are compared and analyzed to the case for the circular array antenna.

### 키워드

Beamforming, Circular Array Antenna, Concentric Ring Array Antenna, AOA Estimation  
빔형성, 원형 배열 안테나, 동심원 배열 안테나, 도래각 추정

\* 조선대학교 전자공학과 (skriekd12@chosun.kr)

\*\* Oregon Institute of Technology, Mechanical Manufacturing Engineering and Technology (Don.Lee@oit.edu)

\*\*\* 교신저자 : 조선대학교 전자공학부

• Received : Jul. 14, 2020, Revised : Jul. 30, 2020, Accepted : Aug. 15, 2020

• Corresponding Author : Suk-Seung Hwang

School of Electronic Engineering, Chosun University,

Email : hwangss@chosun.ac.kr

• 접수일 : 2020. 07. 14

• 수정완료일 : 2020. 07. 30

• 게재확정일 : 2020. 08. 15

## I. 서론

위상 배열 안테나는 다수의 안테나 요소를 사용하여 각 요소에 대한 위상을 전기적으로 제어함으로써 다양한 빔을 합성하거나 원하는 방향으로 빔을 생성하는데, 신속하고 정확한 작동이 가능하므로 레이더나 위성과 같은 정밀도가 요구되는 응용분야에 많이 사용된다[1]. 안테나 요소는 선형, 평면형, 적층형 등 다양한 형상으로 배치되어 위상 배열 안테나를 구성한다.

선형 배열 안테나의 경우 구조가 간단하여 구현이 간단하지만, 방위각 검색에 제한이 있다는 단점을 가진다. 평면 배열 안테나의 경우, 선형 배열 안테나의 방위각 검색에 대한 단점을 보완할 수 있어 다양한 형상의 평면 배열들이 연구되어 왔다. 대표적인 배열 형상으로 고도각 및 방위각을 동시에 검색할 수 있는 격자형(직사각형 혹은 정사각형)과 원형을 들 수 있다. 격자형 배열은 배열 가장자리 요소로 인해 방위각 추정 오류가 발생할 수 있다는 단점이 있다. 원형 배열의 경우, 대칭적 구조로 인해 빔형태의 변화 없이 전자적인 회전이 가능하여 격자형 배열에 비해 높은 분해능을 보유하지만[2], 부엽의 레벨이 높다는 단점을 가진다. 안테나 요소의 간격을 줄여 부엽의 레벨을 낮출 수 있으나, 이 경우 멀티 커플링의 영향이 증가하게 된다[3]. 또한, 안테나 요소의 개수가 증가되면 배열을 구성하는 반경도 증가되고 안테나 구현을 위한 물리적 면적이 커지게 되어[4], 제한된 면적에 다수의 안테나 요소가 필요한 위성과 같은 플랫폼에는 적합하지 않다.

이러한 단점 보완을 위해, 다수개의 안테나 요소가 필요한 경우 동심원 배열 구조[5]가 고려된다. 부엽감소를 목적으로 최적화 알고리즘을 사용하는 CRA 구조에 대한 연구가 [6,7]에서 진행되었고, [8]에서는 원형 안테나 및 동심원 배열 안테나를 적용한 무선통신 시스템에서의 신호-대-간섭비(SIR : Signal-to-Interference Ratio) 향상을 위한 연구가 수행되었다. 또한, 위성 시스템에 원형 배열을 적용한 연구가 [9]에서 진행되었다.

본 논문에서는, [10]에서 제시한 빔형성 기반 위성 시스템에, 각기 다른 크기를 가지는 다수개의 원형 배열들로 구성된 동심원 배열 안테나를 적용하고, 이에 대한 신호원의 도래각 추정 성능을 평가한다. 또한,

컴퓨터 시뮬레이션을 통해, 제시된 빔형성 위성 시스템에 대한 원형 배열 안테나와 동심원 배열 안테나의 도래각 추정 성능을 비교하고 분석한다. 본 논문에서는 도래각 추정 알고리즘으로 우수한 성능을 가지는 MUSIC( : Multiple Signal Classification) 알고리즘을 고려한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서 다수개의 원형 배열로 구성된 동심원 배열 형상 안테나 적용을 위한 배열 응답벡터 및 다양한 신호들과 간섭을 포함하는 수신신호 모델을 제시하고, 3장에서 동심원 배열 안테나 기반의 위성 빔형성 시스템을 소개한다. 4장에서는 제시된 적응 빔형성 위성 시스템의 도래각 추정 성능평가를 위한 컴퓨터 시뮬레이션 결과를 보이고, 5장에서 본 논문의 결론을 맺는다.

## II. 수신신호 모델

본 장에서는 원형 배열 및 동심원 배열 안테나를 적용하기 위한 각 배열 응답벡터를 고려한 신호 모델을 제시한다.

### 2.1 원형 배열 안테나 모델

그림 1의 구조를 갖는 원형 배열 안테나의 응답 벡터( $\mathbf{a}_s$ )는 식(1)과 같이 주어진다[11].

$$\mathbf{a}_s = \begin{bmatrix} e^{-j\alpha r \sin\theta \cos(\phi)} \\ e^{-j\alpha r \sin\theta \cos(\phi - \phi_1)} \\ \vdots \\ e^{-j\alpha r \sin\theta \cos(\phi - \phi_m)} \end{bmatrix} \quad (1)$$

식(1)에서  $\phi$ 는 방위각(azimuth angle),  $\theta$ 는 고도각(elevation angle),  $\alpha = 2\pi/\lambda$ 는 파상수(wavenumber),  $r = Md/2\pi$ 은 원형 배열 안테나의 반지름이며,  $M$ 은 안테나 소자의 개수이고,  $d$ 는 안테나 소자 간 호의 길이를 나타낸다. 또한,  $\lambda$ 는 파장,  $\phi_m = 2\pi m/M$ , ( $m = 0, 1, \dots, M-1$ )은 안테나 소자의 위치를 나타내는 인덱스를 나타낸다.

### 2.2 동심원 배열 안테나 모델

동일 중심을 갖는 원형 배열이 다수( $N$ )개 존재하

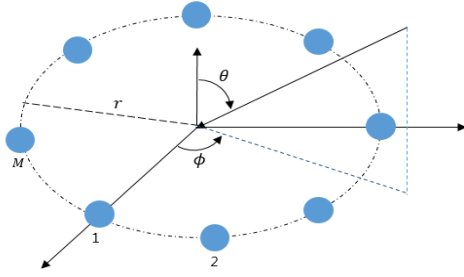


그림 1. 원형 배열 안테나 구조  
Fig. 1 Circular array antenna structure

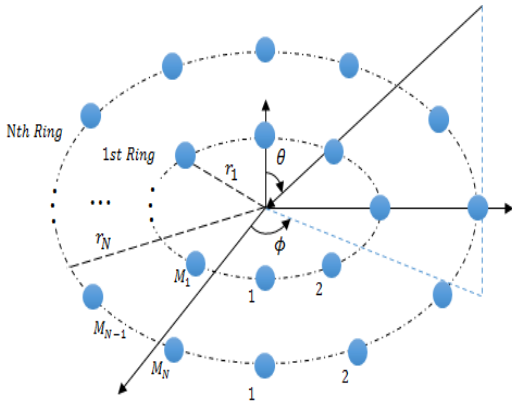


그림 2. 동심원 배열 안테나 구조  
Fig. 2 Concentric ring array antenna structure

는 경우 이를 동심원 배열 안테나라고 하며, 그 구조는 그림 2와 같다. 동심원 배열 안테나의 배열 응답 벡터( $\mathbf{a}_s$ )는 식(2)와 같이 정의된다[11].

$$\mathbf{a}_s = \begin{bmatrix} e^{-j\alpha r_h \sin\theta \cos(\phi)} \\ e^{-j\alpha r_h \sin\theta \cos(\phi - \phi_h)} \\ \vdots \\ e^{-j\alpha r_h \sin\theta \cos(\phi - \phi_{r_h})} \end{bmatrix} \quad (2)$$

식(2)에서  $r_h = M_h d_h / 2\pi$  ( $h = 1, 2, \dots, N$ )는  $h$ 번 째 원형 배열의 반지름이고,  $M_h$ 과  $d_h$ 는 각각  $h$ 번째 원형 배열에 위치하는 안테나 소자의 개수와 안테나 소자 간 호의 길이를 나타낸다. 또한,  $\phi_{r_h} = 2\pi m_h / M_h$ , ( $m_h = 0, 1, \dots, M_h - 1$ )은 안테나 소자의 위치를 나타내는 인덱스를 나타낸다.

### 2.3 신호 모델

총  $M$  ( $M = M_1 + M_2 + \dots + M_N$ )개의 안테나 소자를 갖는  $N$ 개의 원형 배열로 이루어진 동심원 배열 안테나를 고려한 경우, 샘플(sample) 인덱스  $k$ 에 대한 수신신호 벡터는 식(3)과 같이 주어진다.

$$\mathbf{r}(k) = \mathbf{a}_s s(k) + \mathbf{A}\mathbf{i}(k) + \mathbf{n}(k) \quad (3)$$

식 (3)에서  $\mathbf{r}(k)$ 는 수신신호 벡터( $M \times 1$ )이고,  $\mathbf{a}_s$ 는  $s(k)$ 에 대한 어레이 응답 벡터( $M \times 1$ )이며,  $s(k)$ 는 수집하고자 하는 신호를 나타낸다.  $\mathbf{A}$ 는 간섭 및 재밍 신호에 대한  $M \times L$  크기의 어레이 응답 행렬이며,  $\mathbf{i}(k)$ 는 갖는 간섭 및 재밍 신호 벡터( $L \times 1$ )이고,  $\mathbf{n}(k)$ 는 iid(: independent and identically distributed) 특성을 갖는 평균이 0이고 분산이  $\sigma^2$ 인 AWGN(: Additive White Gaussian Noise) 잡음 벡터( $M \times 1$ )이다.  $L$ 는 간섭 및 재밍 신호의 개수이다.

### III. 적응 빔형성 위성 시스템

본 장에서는 다수개의 원형 배열을 가지는 동심원 배열 안테나를 적용한 적응 빔형성 위성 시스템 구조를 소개한다. 고려된 빔형성 시스템은 그림 3과 같이 동심원 배열 안테나, 도래각 추정기, 빔형성기, 신호처리 및 D/B 유닛으로 구성되어 있다. 본 논문에서는 도래각 추정 알고리즘으로 우수한 성능을 가지는 MUSIC 알고리즘을 사용한다. 동심원 배열 안테나로 수신된 신호를 기반으로 추정된 도래각 정보는 빔형성기로 전송되고, 빔형성기를 통해 간섭 및 재밍 신호를 제거한 후, 원하는 신호를 추출하게 된다. 추출된 신호는 원하는 정보의 가공/수집과 저장을 위해 신호처리 및 D/B 유닛으로 전송된다.

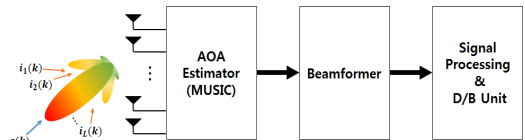


그림 3. 적응 빔형성 위성 시스템의 기본 구조  
Fig. 3 Basic architecture of adaptive beamforming satellite system

#### IV. 컴퓨터 시뮬레이션

본 장에서는 적용 빔형성 위성 시스템의 동심원 배열 안테나에 대한 도래각 추정 성능평가를 위한 컴퓨터 시뮬레이션 결과를 제시한다. 시뮬레이션을 위해 두 가지의 시나리오를 고려하였다.(혼선을 피하기 위해 원형 배열은 링으로 표현하였다. 본 장에서 원형 배열 안테나는 단일 원형 배열(그림 4(a))을 가지는 안테나 구조를 뜻한다.)

##### 1. 시나리오1

- 안테나 요소 개수: 12개
- 최대 링의 반지름은 원형 배열 안테나의 반지름과 같음
- 요소 사이의 거리는 원형 배열 안테나 요소 사이의 거리 보다 크거나 같음

##### 2. 시나리오2

- 안테나 요소 개수: 21개
- 최대 링의 반지름은 원형 배열 안테나의 반지름 보다 작음
- 요소 사이의 거리는 원형 배열 안테나 요소 사이의 거리와 같음

각 시나리오에 대한 주요 안테나 매개변수 값은 표 1과 2에 요약되어 있다. 표1과 2에서 Classification은 안테나 타입(원형 배열 안테나(UCA), 동심원 배열 안테나( $h$ -ring CRA))에 대한 구분이며,  $N_h$ 은  $h$ 번째 링의 요소 개수이며,  $N_t$ 는 사용된 총 안테나 요소의 개수이고,  $r_h$ 은  $h$ 번째 링의 반지름이며,  $d_h$ 은  $h$ 번째 링의 안테나 요소 간 거리를 의미한다. 수신신호에 포함되는 신호들은 [12]에서 제시한 모델을 적용 하였으며, 도래각 추정 성능 분석을 위해 식(4)와 같은 RMSE(: Root Mean Square Error)[13]를 이용하였다.

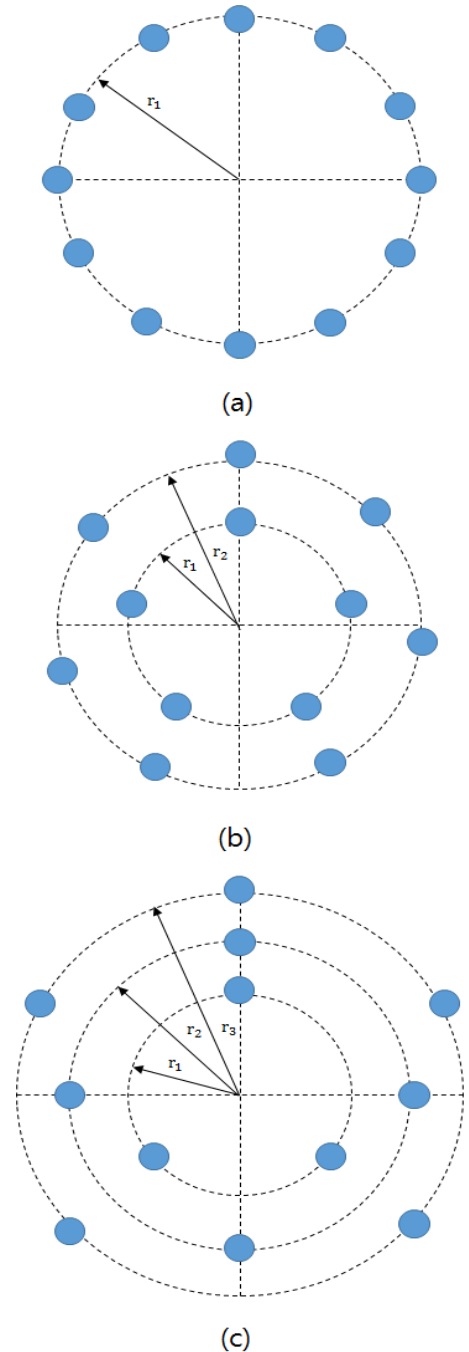


그림 4. 동심원 배열 안테나 구조 (a) 단일 링 (b) 두 개의 링 (c) 세 개의 링

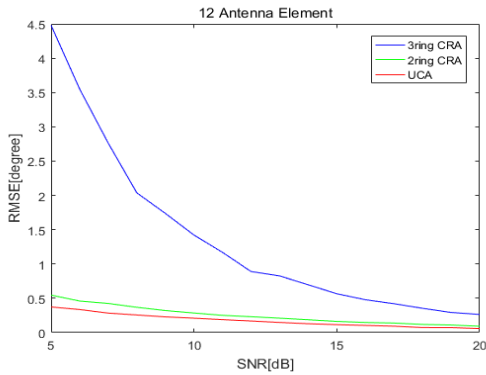
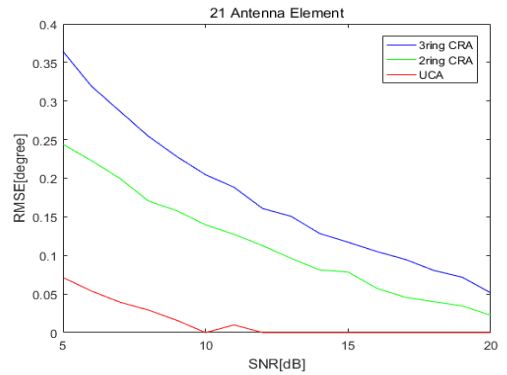
Fig. 4 Architecture of concentric antenna array (a) single ring (b) double ring (c) triple ring

표 1. 시나리오1에 대한 안테나 매개변수  
 Table 1. Antenna parameter for scenario 1

Classification	Number of antenna element ( $N_h$ )		Radius ( $r_h$ )		distance of element ( $d_h$ )	
(a) Uniform Circular Array	$N_t$	12	$r_1$	$0.8\lambda$	$d_1$	$0.42\lambda$
	$N_1$	5	$r_1$	$0.4\lambda$	$d_1$	$0.5\lambda$
(b) Concentric Ring Array (double-ring)	$N_2$	7	$r_2$	$0.8\lambda$	$d_2$	$0.72\lambda$
	$N_t$	12				
(c) Concentric Ring Array (triple-ring)	$N_1$	3	$r_1$	$0.2\lambda$	$d_1$	$0.42\lambda$
	$N_2$	4	$r_2$	$0.4\lambda$	$d_2$	$0.63\lambda$
	$N_3$	5	$r_3$	$0.8\lambda$	$d_3$	$1\lambda$
	$N_t$	12				

 표 2. 시나리오2에 대한 안테나 매개변수  
 Table 2. Antenna parameter for scenario 2

Classification	Number of antenna element ( $N_h$ )		Radius ( $r_h$ )		distance of element ( $d_h$ )	
(a) Uniform Circular Array	$N_t$	21	$r_1$	$1.35\lambda$	$d_1$	$0.4\lambda$
	$N_1$	7	$r_1$	$0.45\lambda$	$d_1$	$0.4\lambda$
(b) Concentric Ring Array (double-ring)	$N_2$	14	$r_2$	$0.9\lambda$	$d_2$	$0.4\lambda$
	$N_t$	21				
(c) Concentric Ring Array (triple-ring)	$N_1$	3	$r_1$	$0.2\lambda$	$d_1$	$0.4\lambda$
	$N_2$	6	$r_2$	$0.4\lambda$	$d_2$	$0.4\lambda$
	$N_3$	12	$r_3$	$0.8\lambda$	$d_3$	$0.4\lambda$
	$N_t$	21				


 그림 5. 시나리오1에 대한 RMSE  
 Fig. 5 RMSE curve for scenario 1

 그림 6. 시나리오2에 대한 RMSE  
 Fig. 6 RMSE curve for scenario 2

$$\text{RMSE} = \sqrt{\sum_{i=1}^T \frac{(\phi - \hat{\phi})^2}{T}} \quad (4)$$

식(4)에서  $\hat{\phi}$ 은 추정된 방위각이고,  $T$ 는 반복 횟수이며, 본 시뮬레이션에서는 각 신호-대-잡음비 (SNR : Signal-to-Noise Ratio) 당 200번 반복 시행

하였다.

그림 5와 그림 6은 시나리오1과 시나리오2에 대한 SNR 대비 RMSE 결과를 보인다. 두 그림을 비교하면, 그림 6의 RMSE 곡선이 그림 5의 RMSE 곡선 보다 낮은 값에서 형성되는데, 그 이유는 시나리오2의 안테나 요소 개수가 시나리오1의 개수보다 많아 좋은 성능을 보이기 때문이다. 두 그림으로부터 동심원 배열의 링 개수가 증가할수록 성능이 열화 된다는 것을 확인할 수 있다. 즉, 같은 수의 총 안테나 요소 개수에 대해, 동심원 배열의 링 개수가 증가하면 전체 안테나 배열이 차지하는 면적은 줄어들지만, 도래각 추정 성능이 저하된다는 것을 확인할 수 있다.

## V. 결 론

본 논문은 다수개의 원형 배열로 이루어진 동심원 배열 안테나 구조를 적용한 적응 빔형성 위성 시스템을 소개하였다. 또한, 동심원 배열 안테나에 대한 적응 빔형성 위성 시스템의 도래각 추정 성능평가를 위한 컴퓨터 시뮬레이션 결과를 제시하고 분석하였다. 같은 총 안테나 요소 개수에 대하여, 동심원 배열 안테나의 원형 배열 개수가 증가하면, 전체 안테나 배열 면적은 감소하는 장점을 갖지만, 도래각 추정 성능은 저하된다는 결론을 도출하였다. 빔형성 위성의 경우, 공간적 한계로 탑재할 수 있는 안테나의 크기가 제한적이지만, 고성능의 도래각 추정이 요구된다. 즉, 빔형성 위성 시스템의 최적화를 위해서는 안테나 크기와 성능을 고려한 원형 배열 개수의 동심원 배열 안테나 설계가 필요하다.

### 감사의 글

본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 SW중심대학지원사업의 연구결과로 수행되었음(2017-0-00137).

이 논문은 2019년도 조선대학교 연구비의 지원을 받아 연구되었음.

## References

- [1] J. Jung S. Park, and H. An, "A Study on Efficient Configuration of Array for Phased Array Antenna with Hybrid Phased Shifting Device," *J. of the Korea Institute of Electronic Communications Science*, vol. 13, no. 6, Dec. 2018, pp. 1199-1206.
- [2] R. Sanudin, "Planar Array Design and Analysis on Direction of Arrival Estimation for Mobile Communication Systems," Doctor's Thesis, *The university of Edinburgh*, 2014.
- [3] K. R. Mahmoud, M. El-Adawy, S. M. M. Ibrahim, R. Bansal, and S. H. Zainud-Deen, "A comparison between circular and hexagonal array geometries for smart antenna systems using particle swarm optimization algorithm," *Progress In Electromagnetics Research*, vol. 72, 2007, pp. 75-90.
- [4] M. S. Hossain, M. F. Reza, M. M. Rashid, and M. F. Ail, "Performance Analysis of Broadband Concentric Circular Antenna Array Processor," *2016 5th Int. Conf. Informatics, Electronics and Vision(ICIEV)*, Dhaka, Bangladesh, 2016, pp. 1047-1051.
- [5] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*. John Wiley and Sons, New York, USA, 2005.
- [6] R. L. Haupt, "Optimized Element Spacing for Low Sidelobe Concentric Ring Array," *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, vol. 56, no. 1, Jan. 2008, pp. 266-268.
- [7] M. I. Dessouky, H. A. Sharshar, and Y. Albagory, "Efficient sidelobe reduction technique for small-sized concentric circular arrays," *Progress in Electromagnetics Research*, vol. 65, 2006, pp. 187 - 200.
- [8] R. Fallahi and M. Roshandel, "Effect of mutual coupling and configuration of concentric circular array antenna on the signal-to-interference performance in CDMA systems." *Progress In Electromagnetics Research*, vol 76, 2007, pp.

427-447.

- [9] T. Kim and S. Hwnag, "Performance Analysis of Beamforming Satellite System Applying Circular Array Antenna," *J. of the Korea Institute of Electronic Communications Science*, vol. 14, no. 5, Oct. 2019, pp. 845-852.
- [10] J. Mun and S. Hwang "Performance Analysis of Adaptive Beamforming System Based on Planar Array Antenna," *J. of the Korea Institute of Electronic Communications Science*, vol. 13, no. 6, Dec. 2018, pp. 1207-1212.
- [11] S. O. Ata and C. Lsik, "High-Resolution Direction-of-Arrival Estimation Via Concetric Circular Arrays," *ISRN Signal Processing*, vol. 2013, pp. 1-8.
- [12] J. Mun and S. Hwang, "Input Signal Model Analysis for Adaptive Beamformer," *J. of the Korea Institute of Electronic Communications Science*, vol. 12, no. 3, Jun 2017, pp. 433-438.
- [13] R. J. Weber and Y. Huang, "Performance analysis of direction of arrival estimation with a uniform circular array," In 2012 IEEE Aerospace Conf. Big Sky, MT, USA, 2012, pp. 1-7.

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

**Dongbin Lee**



1992, BS in ECE, KwangWoon University  
 2000, MS in Robotics (formerly, Control & Instrum. Eng.), KwangWoon University  
 2009, PhD in EE, Robotics and Intelligent systems program, Clemson University

1991-1997, R&D robotic control engineer, SsangYong PIC & SsangYong Motor, Co.  
 1999-2002, Sr. Research Engineer for Position and Antenna Systems, Microface Inc.  
 2009-2012, Postdoctoral Research Fellow for Autonomy, Villanova University  
 2013-Present: Associate Professor of MMET Dept and Director of Robotics and Automation Lab

※ Research Interest & Expertise: Robotic Unmanned Vehicle Systems, Robot Dynamic Modeling and Controls with Nonlinear Solution, Analysis, Estimation and Control Applications, Adaptive, Robust, Nonlinear Controls, Machine-/Deep Learning/AI/CI, Automation, Smart Manufacturing, Precision Ag, and Cleantech Technologies.



**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

