

원형 형상 배열 안테나를 적용한 위성 빔형성 시스템 성능 분석

김태윤* · 황석승**

Performance Analysis of Beamforming Satellite System Applying Circular Array Antenna

Tae-Yun Kim* · Suk-Seung Hwang**

요약

위성 기반의 신호정보수집(Signal Intelligence, SIGINT)은 지형적인 제약사항 없이 정확한 데이터를 수집하는 것을 목적으로 하는데, 위성통신의 특성상 수집 신호의 전력이 매우 낮으며, 재밍을 포함한 간섭신호의 영향에 매우 취약하다. 따라서 위성을 사용하여 지상의 다양한 신호들을 수집하기 위해서는 높은 수준의 특정 신호 도래각(Angle-of-Arrival, AOA) 추정과 간섭제거 기술이 요구된다. 또한, 수집된 정보를 정확히 지상의 관제 센터에 전달하기 위해서는 높은 수준의 송신 빔형성(Beamforming) 기술이 필요하다. 본 논문에서는 이러한 기술들을 고려한 원형 형상 배열 안테나 기반의 빔형성 위성 시스템을 제시하고, 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 시스템의 성능을 평가하고 분석한다. 원형 형상 배열 안테나 구조는 위성에 탑재하기 적합한 안테나 구조로써 위성 기반의 신호정보수집 시스템에 효율적으로 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

ABSTRACT

The main goal of Signal Intelligence (SIGINT) based on a satellite is to collect valid and accurate data without the topographical constraints, but, due to the characteristics of the satellite communication, the collected signals are greatly vulnerable to the influence of interference and jamming signals because their power are very low. Therefore, the high performance techniques of estimating the angle of arrivals (AOAs) of the collected signals and suppressing interference signals are required for collecting various signals on the ground employing the satellite. In addition, the high quality of the transmission beam-forming technique is required for accurately transmitting the collected information to a ground control center. In this paper, we present a beam-forming satellite system based on a circular array antenna, considering the above techniques, and evaluate and analysis the performance of the presented beam-forming system through the computer simulation. The circular array antenna structure is expected to effectively employ for the SIGINT system based on a satellite, because it is suitable to be installed in the satellite.

키워드

Beamforming System, Circular Array Antenna, AOA Estimation, Interference Suppression, Transmit Beamforming
빔형성 시스템, 원형 배열 안테나, 도래각추정, 간섭제거, 송신 빔포밍

* 조선대학교 전자공학과 (skriekd12@chosun.kr)

** 교신저자 : 조선대학교 전자공학부

• 접수일 : 2019. 08. 28

• 수정완료일 : 2019. 09. 21

• 게재확정일 : 2019. 10. 15

• Received : Aug. 28, 2019, Revised : Sep. 21, 2019, Accepted : Oct. 15, 2019

• Corresponding Author : Suk-Seung Hwang

School of Electronic Engineering, Chosun University,

Email : hwangss@chosun.ac.kr

1. 서론

위성통신은 지형적인 제약사항은 없지만, 정지궤도 위성을 사용하는 경우 기지국과 위성 간 통신거리가 멀어 강우감쇠[1], 전리층 및 대기감쇠[2-3] 등 다양한 원인에 의해 원하는 신호의 수신 전력은 매우 낮고, 상대적으로 간섭 또는 재밍 신호의 전력은 매우 높은 문제점이 발생할 수 있다[4-6]. 따라서 위성을 사용하여 다양한 신호를 수집하는 경우, 원하는 신호와 간섭 및 재밍 신호를 포함한 모든 수신신호들의 정확한 도래각이 추정[7]되어야 하고, 간섭 및 재밍 신호들이 효과적으로 제거되어야 한다. 또한, 수집된 신호를 지상의 관제센터로 송신할 시에도 간섭 및 재밍 신호의 심각한 영향을 받을 수 있기 때문에, 이를 해결하기 위한 송신 빔 기술도 필요하다.

대표적인 도래각 추정 알고리즘으로는 Bartlett, CAPON, MUSIC(: Multiple Signal Classification), ESPRIT(: Estimation Signal Parameter via a Rotational Invariant Technique)[8-12] 등이 있고, 대표적인 간섭제거 알고리즘으로는 GSC(: Generalized Sidelobe Canceler), MVDR(: Minimum Variance Distortionless Response), LCMV(: Linearly Constrained Minimum Variance)[13-15] 등이 있다. 또한, 대표적인 송신 빔포밍 알고리즘으로는 ZF(: Zero Forcing)과 MMSE(: Minimum Mean Squared Error)[16-17] 알고리즘 등을 들 수 있다.

위성의 물리적인 그리고 공간적인 제약 특성상 많은 수의 안테나를 선형으로 탑재하기 어렵고, 선형안테나의 경우 방위각 검색에 제한을 받기 때문에, 전방위에 걸친 효율적인 도래각 추정을 위해서는 원형 형상의 평면 배열 안테나[18-19]를 사용해야 한다. 본 논문은 다양한 미소 전력 신호를 정확하게 수집하고 지상의 관제센터로 수집된 신호의 정보를 효율적으로 송신하는 것을 목적으로 하는 원형 형상 배열안테나 기반의 위성 빔형성 시스템을 제시한다. 제시된 위성 시스템은 수집신호와 간섭 및 재밍 신호들을 포함한 모든 수신신호들의 도래각을 추정하기 위한 도래각 추정부, 수집하고자 하는 신호를 제외한 간섭 및 재밍 신호를 제거하기 위한 간섭 제거부, 수집된 신호로부터 유효한 정보를 얻고 저장하기 위한 신호처리 및 D/B 유닛, 수집된 신호정보를 지상의 관제센터로 효

율적으로 송신하기 위한 송신빔형성부로 구성된다. 본 논문에서는, 간섭제거를 위해 고전력 간섭제거에 우수한 성능을 보유한 MVDR 알고리즘을 고려하고, 송신 빔형성 알고리즘으로는 MMSE 알고리즘을 적용한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서 원형 형상 배열 안테나와 다양한 신호들과 간섭을 포함하는 수신신호 모델을 제시하고, 3장에서 효율적으로 신호정보를 수집하기 위한 위성 빔형성시스템을 소개한다. 4장에서는 제시된 위성시스템의 성능평가를 위한 컴퓨터 시뮬레이션 결과를 보이고, 5장에서 본 논문의 결론을 맺는다.

II. 수신신호 모델

본 장에서는 위성 수신기의 안테나로 입사되는 수집신호, 다양한 간섭 및 재밍 신호들, 잡음 등으로 구성된 수신신호와 원형 배열 안테나에 대한 수학적 모델을 제시한다.

2.1 신호 모델

M 개의 안테나 소자수를 갖는 원형 배열 안테나를 고려한 경우, 샘플(sample) 인덱스 k 에 대한 수신신호 벡터는 식(1)과 같이 주어진다.

$$\mathbf{r}(k) = \mathbf{a}_d d(k) + \mathbf{A}\mathbf{j}(k) + \mathbf{n}(k) \quad (1)$$

식 (1)에서 $\mathbf{r}(k)$ 는 $M \times 1$ 크기의 수신신호 벡터이고, \mathbf{a}_d 는 $d(k)$ 에 대한 $M \times 1$ 크기의 어레이 응답 벡터이며, $d(k)$ 는 수집하고자 하는 신호를 나타낸다. \mathbf{A} 는 간섭 및 재밍 신호에 대한 $M \times N$ 크기의 어레이 응답 행렬이며, $\mathbf{j}(k)$ 는 $N \times 1$ 크기를 갖는 간섭 및 재밍 신호 벡터이고, $\mathbf{n}(k)$ 는 $M \times 1$ 크기의 iid(: independent and identically distributed) 특성을 갖는 평균이 0이고 분산이 σ^2 인 AWGN(: Additive White Gaussian Noise) 잡음벡터이다. N 는 간섭 및 재밍 신호의 개수이다.

2.2 안테나 모델

제시된 위성 빔형성시스템의 수신기에 사용되는 원형 배열 안테나는 그림 1과 같은 구조를 갖는다. 어레

이 응답 벡터인 \mathbf{a}_d 는 식(2)와 같이 정의된다.

$$\mathbf{a}_d = [e^{-jkR\sin\theta\cos(\phi-2\pi m/M)}]^T \quad (2)$$

식 (2)에서 ϕ 는 방위각(azimuth angle), θ 는 고도각(elevation angle), $\alpha = 2\pi/\lambda$ 는 파상수(wavenumber), R 은 원형 배열 안테나의 반지름이다. 또한, λ 는 파장, $m = (0, 1, \dots, M-1)$ 은 안테나 소자의 위치를 나타내는 인덱스를 나타낸다.

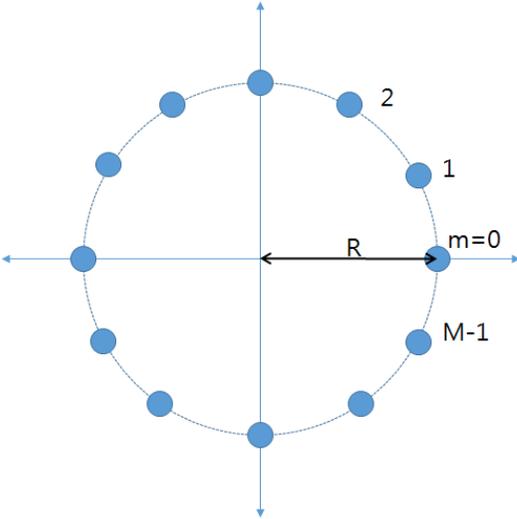


그림 1. 원형 형상 배열 안테나 구조
Fig. 1 Circular array antenna structure

III. 원형 배열 안테나 기반의 위성 빔형성 시스템

본 장에서는 효율적인 신호 수집을 위한 원형 형상 배열 안테나 기반의 위성 빔형성 시스템을 소개한다. 제시된 위성 시스템의 구조는 도래각 추정부, 간섭 제거부, 신호처리 및 D/B 유닛, 송신 빔포밍부로 구성된다. 도래각 추정부는 안테나로 수신된 수집신호, 간섭 및 재밍 신호들이 혼합된 수신신호들로부터 모든 신호들의 도래각들을 추정한다. 간섭 제거부는 추정된 신호들의 도래각들을 기반으로 원하는 수집신호를 제외한 간섭 및 재밍 신호를 제거한다. 신호처리 및

D/B 유닛은 수집된 신호들로부터 정보를 효율적으로 추출하고 유효한 정보들을 D/B에 저장한다(본 논문에서는 신호처리 및 D/B 유닛에 대한 필요성만 언급하고, 더 이상의 상세한 설명은 생략한다). 송신 빔형성부는 수집된 신호정보를 지상 관제센터로 효율적으로 송신할 수 있도록, 고출력의 다양한 송신 간섭 및 재밍 신호들을 제거하는 역할을 한다.

3.1 도래각 추정부

수신된 신호들의 정확한 도래각 추정을 위해 안테나 배열 형상에 제약을 받지 않고, 고 분해능을 가지는 고유치 분해 기법 기반의 MUSIC 알고리즘을 적용한다. MUSIC 알고리즘은 신호 부공간(signal subspace)과 잡음 부공간(noise subspace)이 직교한다는 특성을 이용하여 도래각을 추정한다. 도래각 추정을 위한 MUSIC 알고리즘의 비용함수의 역은 식(3)과 같이 정의되고, 식(3)의 피크값을 이용하여 수집신호, 간섭 및 재밍 신호들의 도래각을 추정한다.

$$P_{MUSIC}(\theta, \phi) = \frac{\mathbf{a}(\theta, \phi)^H \mathbf{a}(\theta, \phi)}{\mathbf{a}(\theta, \phi)^H \mathbf{E} \mathbf{E}^H \mathbf{a}(\theta, \phi)} \quad (3)$$

식(3)에서 $\mathbf{a}(\theta, \phi)$ 는 특정 고도각과 방위각에 대한 어레이 응답 벡터이고, $(\cdot)^H$ 은 켈레 전치를 나타낸다. \mathbf{E} 는 수신신호 벡터의 공분산(covariance) 행렬에 대한 잡음 공분산 행렬이다.

3.2 간섭 제거부

수신신호 중 원하는 수집신호를 제외한 나머지 신호들은 신호 수집을 방해하는 비의의적 간섭신호들과 재밍 신호를 포함하는 고의적 간섭신호들로 구분된다. 이러한 간섭신호들을 효율적으로 제거하기 위해, 본 논문에서는 원하는 신호의 방향으로 빔(beam)을 형성하고 그 외의 간섭 및 재밍 신호 방향으로 널(null)을 형성하는 적응(adaptive) MVDR 기술을 사용한다. MVDR 가중치 벡터는 식(4)로부터 계산된다.

$$\mathbf{w}_{MVDR} = (\mathbf{a}_d \mathbf{R}^{-1} \mathbf{a}_d)^{-1} \mathbf{R}^{-1} \mathbf{a}_d \quad (4)$$

식(4)에서 $\mathbf{R} = E[\mathbf{r}(k)\mathbf{r}^H(k)]$ 은 수신신호의 공분산 행

렬이다. MVDR 가중치 벡터가 곱해진 MDVR 빔형성기의 출력은 식(5)와 같이 주어진다.

$$\mathbf{y}_{MVDR}(k) = \mathbf{w}_{MVDR}^H \mathbf{r}(k) \quad (5)$$

3.3 송신 빔포밍부

지상의 관제센터로 수집된 정보를 전송할 시, 잡음 및 재밍에 의한 송신 방해로 전송정보가 손실될 수 있다. 정보손실을 막고, 효율적으로 수집된 정보를 관제센터로 전송하기 위해, MMSE 알고리즘 기반의 전송 빔형성기를 사용한다. MMSE 가중치 벡터는 식(6)과 같다.

$$\mathbf{w}_{MMSE} = \sigma_t^2 \mathbf{R}_t^{-1} \mathbf{a}_t \quad (6)$$

식(6)에서 σ_t^2 은 송신신호의 전력을 나타내고, $\mathbf{R}_t = E[\mathbf{t}(k)\mathbf{t}(k)^H]$ 는 송신신호 벡터의 공분산 행렬이며, \mathbf{a}_t 는 위성에서 지상 관제센터로의 어레이 응답 벡터이다. MMSE 가중치 벡터가 곱해진 송신 빔형성기의 출력은 식(7)과 같다.

$$\mathbf{y}_{MMSE}(k) = \mathbf{w}_{MMSE}^H \mathbf{t}(k) \quad (7)$$

IV. 컴퓨터 시뮬레이션

본 장에서는 원형 배열 안테나 기반의 위성 빔형성 시스템의 성능평가를 위한 시뮬레이션 결과를 제시한다. 시뮬레이션을 위해 [20]에서 제시한 신호 모델을 고려하였다. 수신신호에 한 개의 CW(Continuous Wave) 수집신호와 다섯 개의 간섭신호들이 포함된다고 가정하였는데, 간섭신호들은 한 개의 WB(Wideband) 잡음 신호, 두 개의 FM(Frequency Modulation) 신호, 두 개의 AM(Amplitude Modulation) 신호로 구성된다고 가정하였다. 또한, 송신신호는 한 개의 CW 전송신호와 네 개의 간섭신호를 포함한다고 가정하였는데, 간섭신호들은 두 개의 WB 잡음 신호, 한 개의 AM 신호, 한 개의 FM 신호들로 구성된다고 가정하였다. 시뮬레이션에 사용된 각 신호의 방위각, 고도각, 중심주파수는 표1과 표2에 정

표 1. 수신신호에 대한 컴퓨터 시뮬레이션 시나리오

Table 1. Computer simulation scenario for receive signal

Signal	Azimuth (°)	Elevation (°)	Center Frequency
CW (desired)	-50	-30	0.15
WB	26	-30	0.05
AM	-154, 142	-30, -30	0.3, 0.45
FM	-100, 80	-30, -30	0.2, 0.4

표 2. 송신신호에 대한 컴퓨터 시뮬레이션 시나리오

Table 2. Computer simulation scenario for transmit signal

Signal	Azimuth (°)	Elevation (°)	Center Frequency
CW (desired)	50	77	0.1
WB	-153, 10	77, 77	0.25 0.35
AM	-37	77	0.05
FM	100	77	0.15

리되어 있고, 원형 배열 안테나의 소자 수는 8개, SNR(Signal to Noise Ratio)은 20dB로 가정하였고, 송/수신 빔형성기의 입력 SNR 대비 출력 SINR(Signal to Interference and Noise Ratio) 시뮬레이션에서는 원형 배열 안테나의 소자수가 8개, 12개, 16개인 경우를 고려하였다. 또한, AM 신호의 변조지수 α 는 0.05이고, FM 신호의 변조 인덱스 β 는 0.05이며, 정규화된 변조 주파수 f_m 은 0.001로 가정하였다.

그림 2는 주파수 영역에서의 수신신호 스펙트럼으로, 표1에 정리되어 있는 중심주파수에 수집신호 및 간섭신호들이 위치해 있는 것을 확인할 수 있다. 그림 3은 수신신호에 대한 MUSIC 알고리즘의 방위각 추정 결과로 고도각 θ 가 -30° 일 때 각 신호들의 방위각들이 정확히 추정되었음을 알 수 있다. 그림 4는 간섭 제거를 위한 MVDR 빔 형성기 출력 결과로, 수집하고자 하는 중심주파수 0.15의 CW 신호를 제외한 나머지 간섭신호들은 효과적으로 제거되었음을 확인할 수 있다. 그림 5는 MMSE 송신 빔 형성기의 빔패

턴으로 지상 관제센터로의 방위각인 50° 방향으로 빔이 형성되었음을 확인할 수 있다. 그림 6과 7은 수신 빔형성기와 송신 빔형성기의 입력 SNR 대비 출력 SINR을 각각 보인다. 빔 형성기를 통해 간섭이 효과적으로 제거 되었으므로 입력 SNR과 출력 SINR이 비슷함을 확인할 수 있으며, 안테나 소자수가 증가할수록 출력 SINR이 증가하였다. 즉, 더 많은 수의 안테나 소자를 사용하면, 보다 우수한 성능을 얻을 수 있음을 확인할 수 있다. 위의 시뮬레이션을 통해 본 논문에서 제시된 위성기반의 빔형성시스템은 신호정보 수집에 대한 효율적인 성능을 보유한다고 결론지을 수 있다.

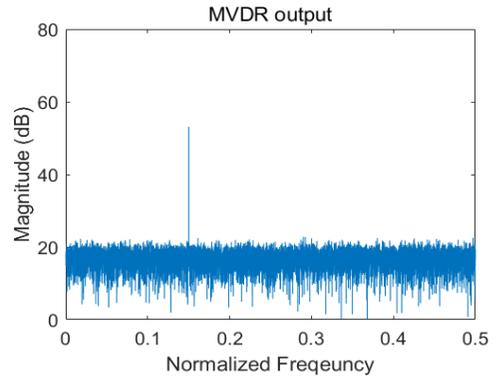


그림 4. MVDR 빔 형성기 출력
Fig. 4 MVDR Beamformer output

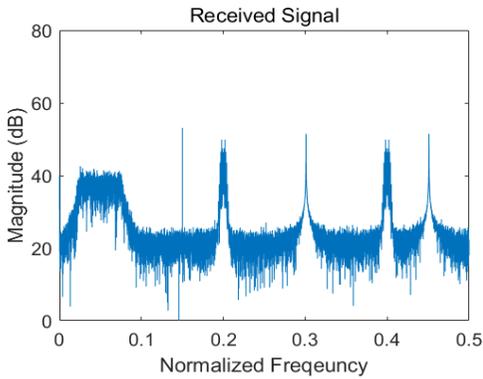


그림 2. 수신신호 스펙트럼
Fig. 2 Receive signal spectrum

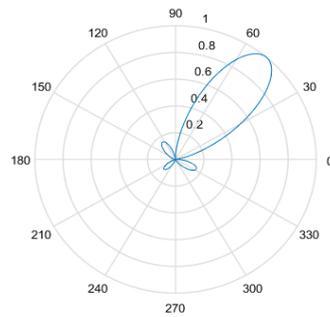


그림 5. MMSE 송신 빔 형성기 빔패턴
Fig. 5 MMSE transmit beamformer beampattern

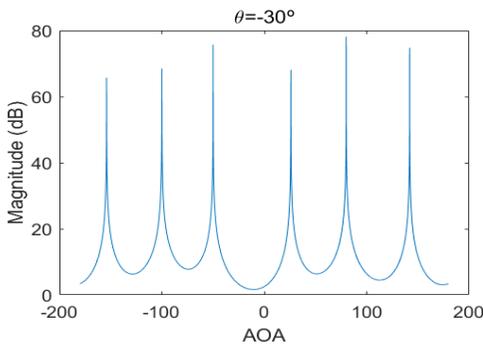


그림 3. MUSIC 비용함수의 역($\theta = -30^\circ$)
Fig. 3 Inverse of MUSIC cost-function

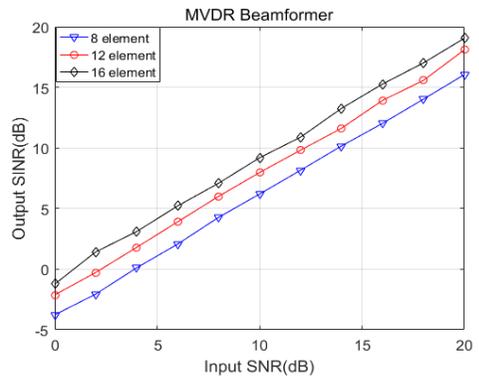


그림 6. MVDR 빔형성기에 대한 출력 SINR
Fig. 6 Output SINR for the MVDR beamformer

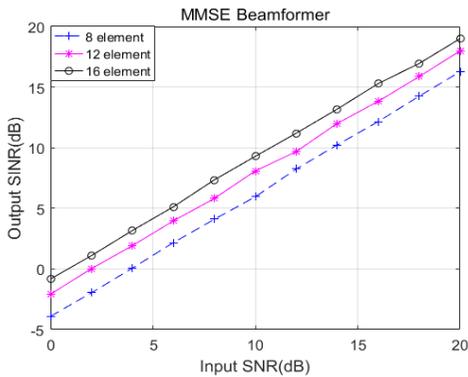


그림 7. MMSE 빔형성기에 대한 출력 SINR
Fig. 7 Output SINR for the MMSE beamformer

V. 결 론

본 논문은 다양한 미소 전력 신호를 정확하게 수집하고 지상의 관제센터로 수집된 신호의 정보를 효율적으로 송신하는 것을 목적으로 하는 원형 형상 배열 안테나 기반의 위성 빔형성 시스템을 제시하였다. 제시된 위성 시스템은 원형 형상 배열 안테나를 적용한 송수신 안테나, MUSIC 기반의 도래각 추정부, MVDR 기반의 간섭 제거부, 신호처리 및 D/B 유닛, MMSE 기반 송신 빔포밍부로 구성된다. 또한, 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 성능평가를 실시하여, 제시된 위성 시스템의 이론적 동작 효율성을 확인하였다.

감사의 글

본 과제(결과물)는 교육부와 한국연구재단의 지원으로 지원을 받아 수행된 사회맞춤형 산학협력 선도대학(LINC+) 육성사업의 연구결과입니다.

이 논문은 2018년도 조선대학교 연구비의 지원을 받아 연구되었음.

References

- [1] K. Lim, T. Kwon, and M. You, "Algorithms for Rain-Attenuation Compensation in Satellite Communication Systems," *J. of Korean Institute of Communication and Information Sciences*, vol. 25, no. 11, Nov. 2000, pp. 1642-1651.
- [2] D. Park, J. Lee, and J. Choi, "The Characteristic Analysis of Wave Propagation for ICO Communication Satellite," *J. of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 9, no. 2, Apr. 1998, pp. 199-210.
- [3] H. Lee, W. Kim, T. Choi, and S. Oh, "An Analysis on the Propagation Prediction Model of Earth-space Communication Link using Local Data," *J. of the Korea Institute of Electronics Communications Sciences*, vol. 14, no. 3, June 2019, pp. 483-488.
- [4] H. Hu and N. Wei, "A study of GPS jamming and anti-jamming," *In Proc. 2009 end Int. Conf. Power Electronics and Intelligent Transportation System*, Shenzhen, China, Dec. 2009, pp. 288-291.
- [5] J. Han, S. Kim, H. Kim, H. Choi, and K. Kim, "Analysis of adaptive digital signal processing for anti-jamming GPS System," *J. Korea Institute of Communications and Information Sciences*, vol. 32, no. 8, Aug. 2007, pp. 745-757.
- [6] J. Mun and S. Hwnag, "Performance Analysis of Adaptive Beamforming System Based on Planar Array Antenna," *J. of the Korea Institute of Electronics Communications Sciences*, vol. 13, no. 6, Dec. 2018, pp. 1207-1212.
- [7] S. Hwang, "Output SINR Analysis of GPS Adaptive Interference Canceller Based on Modified Despreader," *J. of the Korea Institute of Electronics Communications Sciences*, vol. 9, no. 2, Feb. 2014, pp. 195-202.
- [8] H. L. Van Trees, *Optimum Array Processing Part IV of Detection, Estimation and Modulation Theory*. New York: Wiley, 2002.
- [9] 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.
- [10] J. Capon, "High resolution frequency wavenumber spectrum analysis," *Proc. of the*

- IEEE*, vol. 57, no. 8, Aug. 1969, pp. 1408-1418.
- [11] R. O. Schmidt, "Multiple emitter location and signal parameter estimation," *IEEE Trans. Antennas Propagation*, vol. 34, no. 3, Mar. 1986, pp. 276-280.
- [12] 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.
- [13] K. Buckley, "Broad-Band Beamforming and the Generalized Sidelobe Canceller," *IEEE Trans. Acoustics, Speech, and Signal Processing*, vol. 34, no. 5, Oct. 1986, pp. 1322-1323.
- [14] E. Jeong, H. Won, G. Yang, and B. Ahn, "A New Multi-Beam MVDR Technique for removing Interference Singals in Array Antenna Based GPS Reivers," *J. of the Korea Institute of Information and Communication Engineering*, vol. 21, no. 3, Mar. 2017, pp. 491-498.
- [15] E. Yang, I. Han, J. Song, H. Lee, and D. Yeom, "Adaptive Sidelobe Blanker for Interference Environment," *J. of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 26, no. 3, Mar. 2015, pp. 317-325.
- [16] H. Yang and T. L. Marzett, "Performance of Conjugate and Zero-Forcing Beamforming in Large-Scale Antenna System," *IEEE J. on Selected Areas in Communications*, vol. 31, no. 2, Feb. 2013, pp. 172-179.
- [17] S. Serbetli and A. Yener, "Transceiver Optimization for Multiuser MIMO Systems," *IEEE Trans. Signal Processing*, vol. 52, no. 1, Jan. 2004, pp. 214-226.
- [18] A. Karima; and D. Benazzouz. "2D DOA estimation performance using split vertical linear and circular arrays," *Institute of Electrical Engineeris of Japan Trans. Electrical and Electronic Engineering*, vol. 11. no. 4, May 2016, pp. 480-487.
- [19] A. Vesa, F. Alexa, and H. Baltă. "Comparisons between 2D and 3D uniform array antennas," *2015 Federated Conf. Computer Science and Information Systems*, Lodz, Poland, Sept. 2015, pp. 1285-1290.
- [20] J. Mun and S. Hwang, "Input Signal Model Analysis for Adaptive Beamformer," *J. of the*

Korea Institute of Electronics Communications Sciences, vol. 12, no. 3, June 2017, pp. 433-438.

저자 소개



김태윤(Tae-Yun Kim)

2014년 조선대학교 메카트로닉스 공학과 졸업(공학사)

2016년 조선대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사)

2016년 ~ 현재 조선대학교 대학원 전자공학과 박사과정

※ 관심분야 : 적응신호처리, 신호 위치추정, 위치 추정 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

