

# 송신 빔형성기 기반의 위성 시스템 구조 성능평가

문지윤\* · 황명환\*\* · 황석승\*\*\*

Performance Evaluation of Satellite System Based on Transmission Beamformer

Ji-Youn Mun\* · Myeong-Hwan Hwang\*\* · Suk-Seung Hwang\*\*\*

## 요 약

신호의 도래각(: Angle-of-Arrival, AOA) 추정기법, 간섭제거 기술, 및 송신 빔형성 기법 등을 기반으로 하는 신호정보 수집(: Signal Intelligence, SIGINT) 시스템은 다양한 신호정보를 효율적으로 수집하기 위해 요구되는 핵심 기술이다. 본 논문에서는 도래각 추정기, 적응 빔형성기, 신호처리 및 D/B 유닛, 송신 빔형성기로 구성된 신호정보 수집을 위한 위성 시스템의 효율적인 구조를 소개한다. 제시된 구조는 다양한 신호의 정확한 도래각 추정을 위해 MUSIC(: Multiple Signal Classification) 알고리즘을 사용하고, 불필요한 간섭 또는 재밍 신호를 제거하기 위해 MVDR(: Minimum Variance Distortionless Response) 기법을 사용하며, 수집된 정보 및 데이터의 효과적인 송신을 위해 MMSE(: Minimum Mean Square Error) 기반의 송신 빔형성 기법을 적용한다. 또한, 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 소개된 위성 시스템의 성능을 평가하고 분석한다.

## ABSTRACT

The Signal Intelligence (SIGINT) system based on Angle-of-Arrival(AOA) estimation, interference suppression, and transmission beamforming techniques is a cutting edge technology for efficiently collecting various signal information. In this paper, we present the efficient structure of a satellite system consisted of an AOA estimator, an adaptive beamformer, a signal processing and D/B unit, and a transmission beamformer, for collecting signal information. For accurately estimating AOA of various signals, efficiently suppressing interference or jamming signals, and efficiently transmitting the collected information or data, we employ Multiple Signal Classification (MUSIC), Minimum Variance Distortionless Response (MVDR), and Minimum Mean Square Error (MMSE) algorithms, respectively. Also, we evaluate and analysis the performance of the presented satellite system through the computer simulation.

## 키워드

Signal Intelligence, AOA Estimation, Interference Suppression, Transmission Beamformer  
신호 정보 수집, 도래각 추정, 간섭 제거, 송신 빔형성기

## 1. 서 론

일반적으로, 신호의 정보를 효율적으로 수집하여

원하는 신호를 송/수신하기 위해서는 신호의 정확한 도래각 추정기법[1]과 수신신호에 포함되어 있는 간섭 신호를 제거하기 위한 기술이 필요하다[2]. 신호의 도

\* 조선대학교 전자공학부 (jiyoun0551@chosun.kr)

\*\* 한국생산기술연구원 (han9215@kitech.re.kr)

\*\*\* 교신저자 : 조선대학교 전자공학부

• 접수일 : 2018. 07. 30

• 수정완료일 : 2018. 08. 07

• 게재확정일 : 2018. 08. 15

• Received : Jul. 30, 2018, Revised : Aug. 07, 2018, Accepted : Aug. 15, 2018

• Corresponding Author : Suk-Seung Hwang

Dept. of Electronic Engineering, Chosun University,

Email : hwangss@chosun.ac.kr

래각 추정을 위해 사용되는 대표적인 알고리즘에는 우수한 정확성과 분해능을 가지는 MUSIC[3-4]과 ESPRIT( : Estimation Signal Parameter via a Rotational Invariant Technique)[5] 알고리즘 등이 있으며, 성능저하의 원인이 되는 간섭을 제거하기 위한 기법에는 MVDR[6-7], GSC( : Generalized Sidelobe Canceller)[8] 알고리즘 등이 있다. 또한, 신호의 송신 성능을 향상시키기 위한 송신 빔형성 기법으로는 MMSE[9-10]와 ZF ( : Zero Forcing)[11] 알고리즘 등이 대표적이다.

본 논문에서는 다양한 신호정보를 수집하여, 필요한 정보를 지상관제 센터로 송신하는 임무를 수행하는 송신 빔형성기 기반의 적응빔형성 위성시스템을 소개한다. 제시된 위성시스템은 도래각 추정기, 적응빔형성기, 신호처리 및 D/B 유닛, 송신 빔형성기 등으로 구성된다. 위성 환경에서 다양한 신호정보를 수집하기 위해 우수한 성능을 보유한 MUSIC 알고리즘을 도래각 추정기에 적용하고, 간섭 또는 제밍 신호를 제거하고 동시에 원하는 신호의 질을 향상시키기 위해 적응 MVDR 알고리즘을 간섭 제거기에 사용한다. 또한, 수집된 특정 신호를 지상 관제센터로 효율적으로 송신하기 위해 MMSE 송신 빔형성기를 사용한다. 제시된 시스템은 어레이 안테나를 통해 수신된 신호의 도래각을 추정하고, 추정된 결과를 MVDR 기반의 적응 빔형성기에 적용한다. 간섭 제거기 출력은 수집된 신호로부터 유효한 정보 및 데이터를 추출하고 저장하기 위해 신호처리 및 D/B 유닛에 입력되고, 저장된 정보 및 데이터는 MMSE 기반의 송신 빔형성기를 통해 지상 관제센터로 송신된다. 본 논문에서 제시된 위성 시스템의 성능은 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 평가되고 분석되며, 이를 위해 [12]에서 제시된 수신신호 모델을 고려한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서 적응 빔형성 위성 시스템의 입력에 적용 가능한 다양한 신호, 간섭, 잡음 등이 포함된 수신신호 모델을 제시하고, 3장에서는 다양한 신호정보를 효율적으로 수집하고 송신하기 위한 송신 빔형성기 기반의 위성 시스템의 구조를 제시하며, 4장에서 제시된 위성 시스템의 성능평가를 위한 컴퓨터 시뮬레이션 결과를 확인한다. 마지막으로 5장에서 본 논문의 결론을 맺는다.

## II. 수신신호 모델

본 장에서는 신호정보 수집을 위한 위성 시스템의 입력으로 적합한 간섭 신호와 잡음이 포함된 수신신호 모델을 제시한다. 식 (1)은 안테나가  $M$ 개의 어레이 요소를 가진다고 가정할 때, 샘플(sample) 인덱스  $k$ 에 대한 수신신호 벡터이다.

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

식 (1)에서  $\mathbf{r}(k)$ 는  $M \times 1$  크기의 수신신호 벡터이며,  $x(k)$ 는 원하는 신호이고,  $\mathbf{a}_x$ 는  $x(k)$ 에 대한  $M \times 1$  크기의 어레이 응답 벡터이다.  $\mathbf{A}$ 는  $M \times N$  크기를 가지는 어레이 응답 행렬이며,  $\mathbf{A}$ 의 열은 특정 간섭 신호의 도래각 어레이 응답 벡터이다. 또한,  $\mathbf{s}(k)$ 는  $N \times 1$  크기의 간섭 신호 벡터이고,  $\mathbf{n}(k)$ 는  $M \times 1$  크기의 i.i.d(independent identically distributed) 특성을 가지는 AWGN( : Additive White Gaussian Noise) 벡터이다.

## III. 송신 빔형성기 기반의 위성 시스템 구조

본 장에서는 MUSIC 기반의 도래각 추정기, MVDR 기반의 적응 빔형성기, 신호가공 및 정보저장을 위한 신호처리 및 D/B 유닛, MMSE 기반의 송신 빔형성기로 구성된 효율적인 신호정보 수집 위성시스템 구조를 제시한다. 그림 1은 제시된 적응 빔형성 위성 시스템의 구조를 보인다.

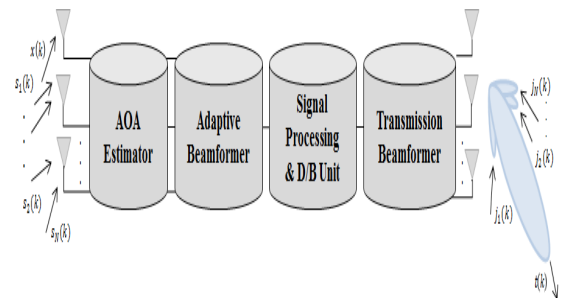


그림 1. 신호정보 수집 위성 시스템 구조  
Fig. 1 Architecture of SIGINT satellite system

### 3.1 도래각 추정기

안테나를 통하여 수신된 특정 신호의 도래각을 추정하기 위하여 우수한 분해능과 정확도를 보유한 MUSIC 알고리즘을 적용한다. MUSIC 알고리즘은 고유분해를 사용하는 대표적인 도래각 추정기법으로, 신호 부공간(signal subspace)과 잡음 부공간(noise subspace)이 서로 직교한다는 성질을 사용하여 공간 스펙트럼(spatial spectrum)에서의 피크값에 해당하는 각도를 신호의 도래각으로 추정한다. 식 (2)는 신호 부공간과 잡음 부공간이 직교한다는 특성을 나타내는 식이다.

$$\mathbf{a}(\theta, \phi)^H \mathbf{E}_N \mathbf{E}_N^H \mathbf{a}(\theta, \phi) = 0 \quad (2)$$

식 (2)에서  $\mathbf{a}(\theta, \phi)$ 는 특정 고도각과 방위각에 대한 어레이 벡터를 나타내고,  $\mathbf{E}_N$ 는 잡음 부공간 행렬이며, 위첨자  $H$ 는 켈레 전치를 뜻한다. 식 (3)은 MUSIC 알고리즘의 비용 함수이며, 피크값에 해당하는 각도는 추정된 신호의 도래각으로 결정된다.

$$P(\theta, \phi) = \frac{1}{\mathbf{a}(\theta, \phi)^H \mathbf{E}_N \mathbf{E}_N^H \mathbf{a}(\theta, \phi)} \quad (3)$$

### 3.2 적응 빔형성기

제시된 위성 시스템은 원하는 신호의 질을 향상시키고 동시에 간섭 신호 또는 재밍 신호를 효율적으로 제거하기 위해, 원하는 신호의 방향으로 빔(beam)을 형성하고 원하지 않는 신호의 방향으로 널(null)을 형성하는 MVDR 기법을 사용한다. 식 (4)는 적응 MVDR 알고리즘의 가중치 벡터를 나타내며, 어레이 응답 벡터는 3.1 절의 도래각 추정 결과로부터 얻을 수 있다.

$$\mathbf{w}_{mvdr} = [\mathbf{a}_x^H \mathbf{R}^{-1} \mathbf{a}_x]^{-1} \mathbf{R}^{-1} \mathbf{a}_x \quad (4)$$

MVDR 빔형성기의 출력은 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

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

### 3.3 신호처리 및 D/B 유닛

신호처리 및 D/B 유닛은 적응 빔형성기를 통해 얻은 신호로부터 유효한 정보 및 데이터를 추출하기 위해 신호를 가공하고, 수집된 정보 및 데이터를 저장하는 장치이다.

### 3.4 송신 빔형성기

송신 빔형성기는 수집된 유효한 정보 및 데이터를 지상관제 시스템으로 효율적으로 송신하는 역할을 한다. 다양한 고의적 또는 비고의적 간섭신호로 인한 정보 손실을 최소화하기 위해 본 논문에서는 대표적인 송신 빔형성 기술 중 하나인 우수한 성능을 보유한 MMSE 기법을 적용한다. MMSE 기법의 가중치 벡터는 식 (6)과 같이 계산된다.

$$\mathbf{w}_{mmse} = \sigma_m^2 \mathbf{R}_v^{-1} \mathbf{a}_m \quad (6)$$

식 (6)에서  $\sigma_m^2$ 은 특정 정보 및 데이터를 포함하는 송신신호의 전력이며,  $\mathbf{R}_v = E[\mathbf{v}(k)\mathbf{v}^H(k)]$ 는 간섭 및 재밍 신호, 잡음을 포함하는 송신신호 벡터의 공분산 행렬이며,  $\mathbf{a}_m$ 은 위성에서 지상관제 센터로의 어레이 응답벡터이다. 식 (7)은 MMSE 송신 빔형성기의 출력을 나타낸다.

$$y_m(k) = \mathbf{w}_{mmse}^H \mathbf{v}(k) \quad (7)$$

식 (7)에서  $\mathbf{v}(k)$ 는 송신신호, 간섭 및 재밍 신호, 잡음 등을 포함한 신호이며, 2장에서 고려한 수신신호 모델과 동일한 형식을 가진다.

## IV. 컴퓨터 시뮬레이션

본 장에서는 효율적인 신호정보 수집을 위한 송신 빔형성기 기반의 위성 시스템에 대한 성능 평가 및 분석을 위한 컴퓨터 시뮬레이션 결과를 보인다. 수신 신호에 한 개의 원하는 신호, 다섯 개의 간섭신호, 잡음 등이 포함된다고 가정하였다. 원하는 신호는 CW(Continuous Wave) 신호라고 가정하였고, 간섭신호로는 한 개의 WB(Wideband) 잡음 신호, 한 개의 AM(

Amplitude Modulation) 신호, 두 개의 FM(Frequency Modulation) 신호, 한 개의 PULSE 신호를 고려하였다. 수신신호에 대한 매개변수들은 표 1에 요약되어 있다. 시뮬레이션 시나리오에서 AM 신호의 변조지수  $\alpha$ 는 0.05이고, FM 신호의 변조 인덱스  $\beta$ 는 0.05이며, 정규화된 변조 주파수  $f_m$ 은 0.001로 가정하였다. PULSE 신호는 50 샘플의 주기를 가지는 on/off 신호로 가정하였고, 입력 SNR(Signal-to-Noise Ratio)에 대한 출력 SINR(Signal-to-Interference and Noise Ratio) 시뮬레이션을 제외한 모든 시뮬레이션에서 SNR은 20dB로 가정하였다. 또한, 컴퓨터 시뮬레이션에서 모든 신호의 고도각은 편의상 같다고 가정하였다. 송신신호에 대한 컴퓨터 시뮬레이션 시나리오에서는 위성에서 지상 관제센터로 수집된 정보 및 데이터를 포함하는 CW 신호를 송신한다고 가정하였고, 간섭 신호로는 한 개의 WB 잡음 신호, 한 개의 PULSE 신호, 한 개의 AM 신호 등 총 세 개의 신호를 고려하였다. 송신에 관련된 신호들의 매개변수들은 표 2에 요약되어 있다.

그림 2는 수신신호에 대한 MUSIC 알고리즘 기반 도래각 추정기의 방위각 추정 결과를 보인다. 그림에서 각 피크값은 수신신호들의 방위각을 나타낸다. 표 1과 추정된 결과들을 비교하면, 모든 신호들의 방위각이 효과적으로 추정된 것을 확인할 수 있다. 그림 3은 주파수 영역에서의 수신신호 스펙트럼으로, PULSE 신호를 제외한 수신신호에 포함된 모든 신호들을 확인할 수 있다(PULSE 신호의 스펙트럼은 모든 영역에 걸쳐 존재하므로, 그림에서 직접적인 확인이 불가능하다). 그림 4는 MVDR 기반의 적응 빔형성기 출력 스펙트럼을 보인다. 간섭 신호 중 하나인 PULSE 신호의 제거여부는 그림 3과 4의 'Magnitude' 수치를 비교하여 확인할 수 있다. 그림 5는 MVDR 적응 빔형성기에 대한 출력 SINR이다. 위의 그림들로부터, 원하는 신호인 CW 신호를 제외한 모든 간섭 신호들이 효과적으로 제거되었음을 확인할 수 있다. 그림 6은 송신신호에 대한 MMSE 송신 빔형성기의 빔 패턴을 보인다. 그림 7은 MMSE 송신 빔형성기에 대한 출력 SINR을 보인다. 위의 결과들로부터 원하는 방향으로 빔이 형성되었고, 간섭 신호들의 방향으로는 널이 형성되어 송신신호에 대한 간섭 신호들의 영향이 제거되었음을 확인할 수 있다.

표 1. 수신신호에 대한 시뮬레이션 시나리오  
Table 1. Computer simulation scenario for the received signal

Signal	Azimuth(°)	Elevation(°)	Center Frequency
CW (Desired)	-31	-75	0.25
WB	43	-75	0.15
AM	-97	-75	0.45
FM	-163, 158	-75, -75	0.05, 0.35
Pulsed	103	-75	-

표 2. 송신신호에 대한 시뮬레이션 시나리오  
Table 2. The computer simulation scenario for transmit signal

Signal	Azimuth(°)	Elevation(°)	Center Frequency
CW (Desired)	-144	-77	0.25
WB	51	-77	0.1
AM	-23	-77	0.35
FM	131	-77	0.45

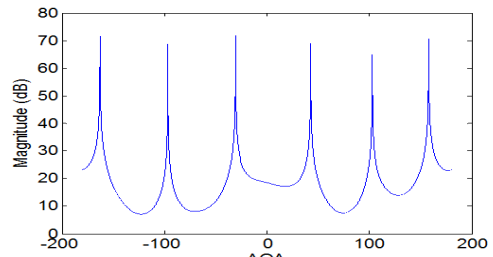


그림 2. MUSIC 비용함수  
Fig. 2 MUSIC cost function

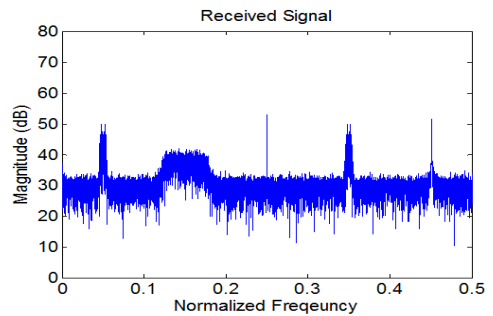


그림 3. 수신신호 스펙트럼  
Fig. 3 Received signal spectrum

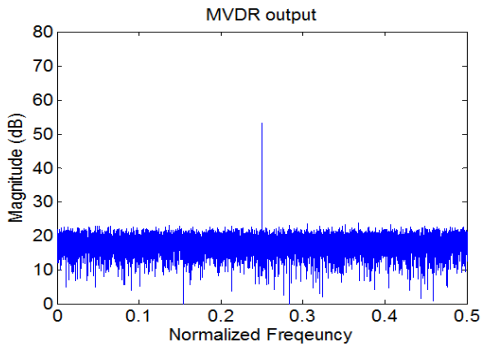


그림 4. MVDR 빔형성기 출력  
Fig. 4 Output of MVDR beamformer

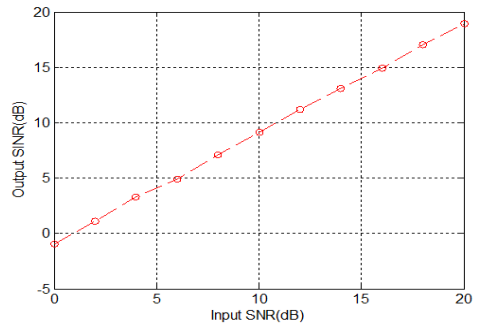


그림 7. MMSE 빔형성기의 출력 SINR  
Fig. 7 Output SINR for the MMSE beamformer

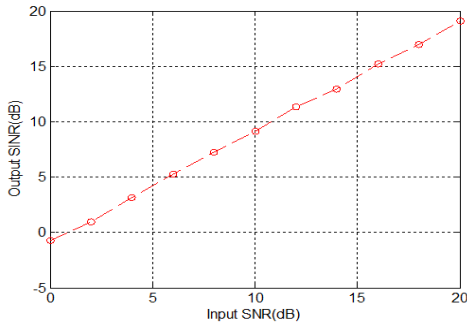


그림 5. MVDR 빔형성기의 출력 SINR  
Fig. 5 Output SINR for the MVDR beamformer

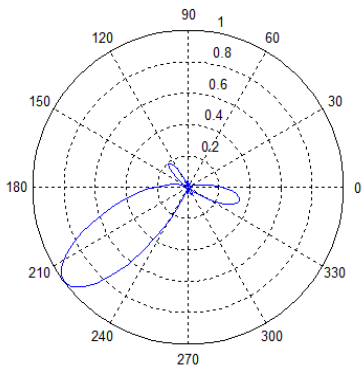


그림 6. MMSE 빔형성기의 빔 패턴  
Fig. 6 Beampattern of MMSE beamformer

#### IV. 결 론

본 논문에서는 위성 환경에서 다양한 유효 신호정보를 수집하여, 수집된 정보 및 데이터를 효율적으로 지상의 관제센터로 송신하기 위한 송신 빔형성기 기반의 위성 시스템 구조를 소개하였다. 제안된 시스템은 MUSIC 알고리즘 기반의 도래각 추정기, 수신신호에 포함된 간섭 및 재밍 신호들을 제거하기 위한 MVDR 기반의 적응 빔형성기, 정보 가공 및 저장을 위한 신호처리 및 D/B 유닛, MMSE 기반의 송신 빔형성기로 구성되어 있다. 또한, 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 제시된 시스템의 성능 평가 및 분석을 실시하였다.

#### 감사의 글

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

이 논문은 2017년도 조선대학교 연구비의 지원을 받아 연구되었음.

## References

- [1] S. Hwang, "GPS AOA Choosing Algorithm in Environment of High-Power Interference Signals," *J. of Advanced Navigation Technology*, vol. 16, no. 4, 2012, pp. 649-656.
- [2] 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.
- [3] M. Jin, J. Lee, H. Choi, S. Lee, Y. Shin, B. Lee, W. Ahn, and C. Park, "Performance Comparison of 2D MUSIC and Root-MUSIC Algorithm for Anti-jamming in GPS Receiver," *Trans. of the Korea Industrial of Electrical Engineers*, vol. 60, no. 11, 2011, pp. 2131-2138.
- [4] Y. Kim, H. Park, and H. Ryu, "A Computation Reduction Technique of MUSIC Algorithm for Optimal Path Tracking," *J. of the Korea Institute of Communications and Information Sciences*, vol. 39, no. 4, 2014, pp. 188-194.
- [5] J. Steinwandt, F. Roemer, and M. Haardt, "Generalized Least Squares for ESPRIT-Type Direction of Arrival Estimation," *IEEE Mag. Signal Processing*, vol. 24, no. 11, 2017, pp. 1681-1685.
- [6] S. Hwang, S. Kim, and C. Park, "TPMS Interference Suppression Based on Beamforming," *J. of the Korea Institute of Electronics Communications Sciences*, vol. 6, no. 2, 2011, pp. 180-185.
- [7] M. Ghadian, M. Jabbarian-Jahromiand, and M. Kahaei, "Recursive Sparsity-based MVDR Algorithm for Interference Cancellation in Sensor Arrays," *IETE J. Research*, vol. 62, no. 2, 2015, pp. 212-220.
- [8] C. Hong, C. Kim, S. Whang, and J. Yang, "A Time-Domain GSC Algorithm Based on Wavelet Filter," *J. of the Korea Institute of Communications and Information Sciences*, vol. 35, no. 11, 2010, pp. 948-956.
- [9] J. Choi, "MMSE-Based Distributed Beamforming in Cooperative Relay Networks," *IEEE Trans. Signal Processing*, vol. 49, no. 10, 2001, pp. 2169-2178.
- [10] S. Serbetli and A. Yener, "Transceiver Optimization for Multiuser MIMO Systems," *IEEE Trans. Communications*, vol. 59, no. 5, 2011, pp. 1346-1356.
- [11] H. Yang and T. L. Marzetta, "Performance of Conjugate and Zero-Forcing Beamforming in Large-Scale Antenna Systems," *IEEE J. on Selected Areas in Communications*, vol. 31, no. 2, 2013, pp. 172-179.
- [12] 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, 2017, pp. 433-438.

## 저자 소개

## 문지윤(Ji-Youn Mun)



2016년 2월 조선대학교 전자공학과 졸업

2018년 2월 조선대학교 전자공학과 대학원 졸업 (공학석사)

2018년 3월 조선대학교 전자공학과 대학원 박사과정

※ 관심분야 : 데이터베이스, 위치추정, 간섭제거, 적응신호처리

**황명환(Myeong-Hwan Hwang)**



2014년 조선대학교 기계공학과 졸업 (공학 학사)

2016년 전남대학교 일반대학원 첨단생산공학학연협동과정 졸업 (공학 석사)

2016년~현재 전남대학교 일반대학원 전기공학과 박사과정 재학

2014~현재 한국생산기술연구원 EV부품소재그룹 연구원 재직

※ 관심분야 : 플랫폼 설계, 차량 제어 시스템

**황석승(Suk-Seung Hwang)**



1997년 2월 광운대학교 제어계측공학과 졸업

2001년 6월 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

