

# 평면 배열 안테나 기반의 적응 빔형성 시스템 성능 분석

문지윤\* · 황석승\*\*

## Performance Analysis of Adaptive Beamforming System Based on Planar Array Antenna

Ji-Youn Mun\* · Suk-Seung Hwang\*\*

### 요 약

신호정보 수집(Signal Intelligence, SIGINT) 기술은 군수산업을 비롯한 여러 분야에서 다양한 데이터 수집을 목적으로 활발하게 사용되고 있다. 효율적으로 신호정보 및 데이터를 수집하고 수집된 데이터를 송/수신하기 위해서는 신호의 정확한 도래각 정보가 필요하고, 간섭 또는 제밍 신호로부터의 통신 방해가 최소화되어야 한다. 본 논문에서는 효율적으로 신호정보 및 데이터를 수집하고 송/수신하기 위한, 평면 배열 안테나 기반의 적응 빔형성 위성 시스템 구조를 소개한다. 제시된 적응 빔형성 시스템은 평면 배열 형태의 안테나, MUSIC(Multiple Signal Classification) 알고리즘 기반의 도래각 추정기, MVDR(Minimum Variance Distortionless Response) 간섭 제거기, 신호처리 및 D/B 유닛, MMSE(Minimum Mean Square Error) 기반의 송신 빔형성기 등으로 구성되어 있다. 또한, 컴퓨터 시뮬레이션을 통해, 제시된 시스템의 성능을 평가하고 분석한다.

### ABSTRACT

The signal intelligence (SIGINT) technology is actively used for collecting various data, in a number of fields, including a military industry. In order to collect the signal information and data and to transmit/receive the collected data efficiently, the accurate angle-of-arrival (AOA) information is required and communication disturbance from the interference or jamming signal should be minimized. In this paper, we present the structure of an adaptive beam-forming satellite system based on the planar array antenna, for collecting and transmitting/receiving the signal information and data efficiently. The presented adaptive beam-forming system consists of an antenna in the form of a planar array, an AOA estimator based on the Multiple Signal Classification (MUSIC) algorithm, an adaptive Minimum Variance Distortionless Response (MVDR) interference canceler, a signal processing and D/B unit, and a transmission beamformer based on Minimum mean Square Error (MMSE). In addition, through the computer simulation, we evaluate and analyze the performance of the proposed system.

### 키워드

Adaptive Beamforming, Planar Array Antenna, AOA Estimation, Interference Suppression, Transmission Beamformer  
적응 빔형성, 평면 배열 안테나, 도래각 추정기, 간섭 제거, 송신 빔형성기

\* 조선대학교 전자공학부 (jiyou0551@chosun.kr)

\*\* 교신저자 : 조선대학교 전자공학부

• 접수 일 : 2018. 11. 14

• 수정완료일 : 2018. 11. 29

• 게재확정일 : 2018. 12. 15

• Received : Nov. 14, 2018, Revised : Nov. 29, 2018, Accepted : Dec. 15, 2018

• Corresponding Author : Suk-Seung Hwang

Dept. of Electronic Engineering, Chosun University,

Email : hwangss@chosun.ac.kr

## 1. 서 론

위성통신 환경에서의 신호들은 상대 전력이 작고 간섭에 매우 취약하므로, 위성에서 원하는 신호정보 및 데이터를 수집하고 수집된 데이터를 지상관제 센터로 송신할 시 신호의 정확한 도래각 추정[1], 불필요한 간섭 또는 재밍 신호 제거 기술[2], 송신 빔형성 기술[3] 등이 요구된다. 신호의 도래각을 추정하기 위해 사용되는 알고리즘으로 MUSIC[4], CAPON[5], ESPRIT( Estimation Signal Parameter via a Rotational Invariant Technique)[6] 알고리즘 등이 있으며, 간섭 제거 기법은 MVDR[7], GSC( Generalized Sidelobe Canceller)[8], LCMV( Lincr Convenience Minimum Variance)[9] 등이 대표적이며, 송신 빔형성 기법에는 MMSE[10]와 ZF( Zero Forcing)[11] 알고리즘 등이 주로 사용된다.

본 논문에서는 다양한 신호정보 및 데이터를 효율적으로 수집하고, 수집된 데이터를 간섭 및 재밍 신호의 영향을 최소화하면서 지상의 관제센터로 송신하기 위한, 평면 배열 안테나 기반의 적응 빔형성 위성 시스템의 구조를 제시한다.

다양한 간섭 또는 재밍 신호가 존재하는 위성 환경에서 유효한 신호정보를 효율적으로 수집하기 위해, 제시된 위성 시스템은 평면 어레이 형태의 안테나, 우수한 분해능을 지닌 MUSIC 알고리즘을 적용한 도래각 추정기, 간섭 및 재밍 신호 제거에 우수한 성능을 가지는 적응 MVDR 간섭 제거기, 수집된 신호의 가공과 저장을 위한 신호처리 및 D/B 유닛, 저장된 신호를 지상의 관제 센터로 왜곡을 최소화하며 송신하기 위한 MMSE 기반의 송신 빔형성기로 구성되어 있다. 또한, 제시된 위성 시스템의 성능 평가 및 분석을 위해 컴퓨터 시뮬레이션을 실시하였으며, 이를 위해 [12]에서 제시된 신호 모델들을 고려하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서 평면 배열 안테나 기반의 위성 시스템의 입력으로 사용 가능한 간섭 신호와 잡음 등이 포함된 수신신호 모델을 제시하고, 3장에서 효율적으로 신호정보를 수집하고 송신하기 위한 평면 배열 안테나 기반의 위성 적응 빔형성 시스템 구조를 제시한다. 4장에서는 제시된 위성 시스템의 성능 평가 및 분석을 위해 다양한 안테나 어레이 배열 크기에 대한 컴퓨터 시뮬레이션 결과들

보인다. 마지막으로 5장에서 본 논문의 결론을 맺는다.

## II. 수신신호 모델

본 장에서는 효율적인 신호정보 수집을 위해 적응 빔형성 위성 시스템의 입력으로 사용 가능한 간섭 신호와 잡음 신호를 포함하는 수신신호 모델을 제시한다. 또한, 본 논문에서 사용하는 평면 배열 안테나의 수학적 모델도 제시한다.

### 2.1 신호 모델

안테나가  $M$ 개의 어레이 요소를 가진다고 가정할 때, 샘플(sample) 인덱스  $k$ 에 대한 수신신호 벡터는 식(1)과 같다.

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

위 식에서  $\mathbf{v}(k)$ 는 크기  $M \times 1$ 의 수신신호 벡터이고,  $\mathbf{a}_x$ 는  $x(k)$ 에 대한 크기  $M \times 1$ 의 어레이 응답 벡터이며,  $x(k)$ 는 수신을 원하는 신호이다.  $\mathbf{A}$ 는  $M \times N$  크기의 간섭 신호에 대한 어레이 응답 행렬이며,  $\mathbf{A}$ 의 열은 특정 간섭 신호의 어레이 응답 벡터이고,  $\mathbf{i}(k)$ 는  $N \times 1$  크기를 가지는 간섭 신호 벡터이다. 또한,  $\mathbf{n}(k)$ 는 크기  $M \times 1$ 의 i.i.d(independent identically distributed) 특성을 가지는 "0"의 평균과 " $\sigma^2$ "의 분산 값을 갖는 AWGN( Additive White Gaussian Noise) 벡터이다.

### 2.2 안테나 배열 모델

본 논문에서 제시된 평면 배열 안테나 기반의 위성 시스템은  $Q \times P (M = QP)$  크기의 평면 배열 안테나 구조를 사용한다. 평면 배열 안테나의 어레이 응답 벡터의 수학적 모델은 식 (2)와 같으며, 식 (3)과 식 (4)는  $\chi$ 과  $\gamma$ 에 대한 정의를 나타낸다.

$$\mathbf{a}_x = \begin{bmatrix} 1 \\ e^{-j\chi} \\ \vdots \\ e^{-j(Q-1)\chi} \\ e^{-j\gamma} \\ e^{-j(\chi+\gamma)} \\ \vdots \\ e^{-j((Q-1)\chi+(P-1)\gamma)} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\chi \triangleq 2\pi \left( \frac{d}{\lambda} \right) \sin\theta \cos\phi \quad (3)$$

$$\gamma \triangleq 2\pi \left( \frac{d}{\lambda} \right) \sin\theta \sin\phi \quad (4)$$

식 (3)과 (4)에서  $\theta$ 와  $\phi$ 는 신호에 대한 고도각 (elevation angle)과 방위각(azimuth angle)을 각각 나타내며,  $d$ 는 안테나 사이의 간격을 나타내고,  $\lambda$ 는 신호의 파장이다. 본 논문에서는 성능평가를 위해  $Q=4, P=2,3,4,5$  인 경우에 대한,  $4 \times 2, 4 \times 3, 4 \times 4, 4 \times 5$  어레이 크기를 가지는 평면 어레이 안테나를 고려하였다.

### III. 평면 배열 안테나 기반의 위성 시스템 구조

본 장에서는 효율적인 신호정보 수집을 위한 평면 배열 안테나 기반의 적응 빔형성 위성 시스템 구조를 제시한다. 제시된 시스템은 그림 1과 같이, 평면 배열 안테나, MUSIC 알고리즘 기반의 도래각 추정기, 간섭 제거기(MVDR), 신호처리 및 D/B 유닛, 송신 빔형성기(MMSE)로 구성되어 있다.

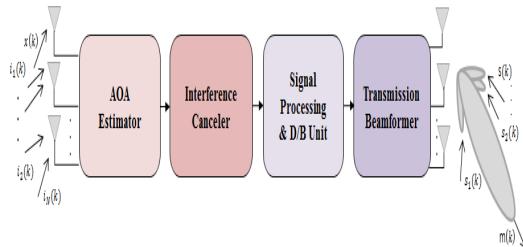


그림 1. 신호정보 수집 위성 시스템 구조  
Fig. 1 Architecture of SIGINT satellite system

#### 3.1 평면 배열 안테나

위성 환경이라는 특수성을 감안하여, 본 논문에서는 평면 배열 형태의 안테나를 적용하였으며, 이에 대한 자세한 수학적 모델은 2장에서 제시하였다.

#### 3.1 도래각 추정기

평면 배열 안테나를 통해 수신된 다양한 신호들의 도래각을 정확하게 추정하기 위해 고유분해를 통하여 도래각을 추정하는 MUSIC 알고리즘을 적용한다. MUSIC 알고리즘은 신호 부공간(signal subspace)과 잡음 부공간(noise subspace)이 서로 직교한다는 성질을 이용하여 공간 스펙트럼(spatial spectrum)에서의 피크 값에 해당하는 각도를 신호의 도래각으로 추정하는 기법으로써 우수한 분해능과 정확도를 가지는 대표적인 도래각 추정 기법이다. 도래각 추정을 위하여 사용되는 MUSIC 알고리즘의 비용함수는 식 (5)와 같으며, 비용함수의 피크값에 해당하는 각도를 추정된 신호의 도래각으로 결정한다.

$$P(\theta, \phi) = \frac{1}{\mathbf{a}(\theta, \phi)^H \mathbf{E}_N \mathbf{E}_N^H \mathbf{a}(\theta, \phi)} \quad (5)$$

식 (5)에서  $\mathbf{a}(\theta, \phi)$ 는 특정 고도각( $\theta$ )과 방위각( $\phi$ )에 대한 어레이 응답 벡터를 나타내며,  $\mathbf{E}_N$ 은 잡음 공분산(covariance) 행렬로, 수신신호 벡터의 공분산 행렬인  $\mathbf{R}_v = E[\mathbf{v}(k)\mathbf{v}^H(k)]$ 의 고유분해를 통하여 계산되며, 위첨자  $H$ 는 켈레 전치를 뜻한다.

#### 3.2 적응 간섭 제거기

본 논문에서는 원하는 신호정보를 수집하기 위해, 신호 수신을 방해하는 간섭 또는 재밍 신호를 효율적으로 제거할 수 있는 MVDR 기법을 적용한다. MVDR 기법은 원하는 신호의 방향으로는 빔(beam)을 형성하고, 동시에 원하지 않는 신호가 존재하는 방향으로 널(null)을 형성하는 방식이다. 적응 MVDR 기법의 가중치 벡터는 식 (6)으로부터 계산되며, 어레이 응답 벡터  $\mathbf{a}_x$ 는 MUSIC 알고리즘 기반의 도래각 추정 결과로부터 얻을 수 있다.

$$\mathbf{w}_{mvdr} = [\mathbf{a}_x^H \mathbf{R}^{-1} \mathbf{a}_x]^{-1} \mathbf{R}^{-1} \mathbf{a}_x \quad (6)$$

식 (7)은 적응 MVDR 빔형성기의 출력을 보인다.

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

### 3.3 신호처리 및 D/B 유닛

제시된 위성 시스템에서 신호처리 및 D/B 유닛은 적응 MVDR 간섭 제거기를 통해 수집된 신호를 가공하고, 그 과정에서 얻은 데이터를 저장하는 역할을 한다. 해당 유닛을 통해 저장된 데이터 정보는 송신 빔형성기를 통해 지상의 관제센터로 전송된다.

### 3.4 송신 빔형성기

저장된 신호정보를 지상의 관제센터로 송신 할 시, 제안된 위성 시스템은 고의적 또는 비고의적 간섭 신호 또는 재밍 신호들에 의한 정보 손실 및 왜곡을 최소화하기 위해 우수한 성능을 보유한 대표적인 송신 빔형성 기법인 MMSE 알고리즘을 적용한다. 식 (8)은 MMSE 알고리즘의 가중치 벡터를 나타낸다.

$$\mathbf{w}_{mmse} = \sigma_m^2 \mathbf{R}_y^{-1} \mathbf{a}_g \quad (8)$$

식 (8)에서  $\sigma_m^2$ 은 송신신호의 전력(power)을 나타내며,  $\mathbf{R}_y = E[\mathbf{y}(k)\mathbf{y}^H(k)]$ 는 송신신호 벡터의 공분산 행렬을 나타낸다.  $\mathbf{a}_g$ 은 위성에서 지상 관제센터로의 어레이 응답 벡터를 나타낸다. MMSE 송신 빔형성기의 출력은 식 (9)와 같이 주어진다.

$$y_{mmse}(k) = \mathbf{w}_{mmse}^H \mathbf{y}(k) \quad (9)$$

식 (9)에서  $\mathbf{y}(k)$ 는 식 (1)에서 고려한 신호와 동일한 모델로써, 송신신호, 간섭 또는 재밍 신호, 잡음 등을 포함한 신호이다.

## IV. 컴퓨터 시뮬레이션

본 장에서는 제시된 평면 배열 안테나 기반의 적응 위성 시스템의 성능 평가 및 분석을 위한 컴퓨터 시뮬레이션 결과를 보인다. 컴퓨터 시뮬레이션을 위해 두 가지의 시나리오를 고려하였다. 첫 번째 시나리오

에서는 수신신호가 한 개의 원하는 FM(Frequency Modulation) 신호와 다섯 개의 간섭신호(두 개의 CW(Continuous Wave) 신호, 두 개의 WB(Wideband) 잡음신호, 50 샘플 주기를 가지는 한 개의 PULSE 신호)를 포함한다고 가정하였고, 송신 빔형성기의 출력에 의한 송신신호는 한 개의 원하는 FM 신호와 세 개의 간섭신호(한 개의 CW 신호, 한 개의 AM 신호, 한 개의 WB 잡음 신호)를 포함한다고 가정하였다. 두 번째 시나리오에서는 수신신호가 한 개의 원하는 CW 신호와 다섯 개의 간섭신호(두 개의 FM 신호, 두 개의 AM 신호, 한 개의 WB 잡음신호)를 포함한다고 가정하였고, 송신 빔형성기의 출력에 의한 송신신호는 한 개의 원하는 CW 신호와 세 개의 간섭신호(한 개의 FM 신호, 한 개의 WB 신호, 한 개의 PULSE 신호)를 포함한다고 가정하였다. 첫 번째 시나리오에서 평면 안테나 배열의 크기는  $4 \times 2$ ,  $4 \times 3$ ,  $4 \times 4$ 의 세 경우를 고려하였고, 두 번째 시나리오에서는 배열의 크기는  $4 \times 3$ ,  $4 \times 4$ ,  $4 \times 5$ 의 세 경우를 고려하였다.

그림 2와 그림 3은 안테나 배열의 크기를  $4 \times 2$ ,  $4 \times 3$ ,  $4 \times 4$ 로 증가하였을 경우에 대한 적응 MVDR 빔형성기와 MMSE 송신 빔형성기의 SNR(Signal-to-Noise Ratio) 당 출력 SINR(Signal-to-Interference and Noise Rati)의 결과이고, 그림 4와 그림 5는 안테나 배열의 크기를  $4 \times 3$ ,  $4 \times 4$ ,  $4 \times 5$ 로 증가하였을 경우에 대한 적응 빔형성기와 송신 빔형성기의 SNR당 출력 SINR의 결과이다. 위 결과들로부터, 평면 배열 안테나의 크기가 증가할수록 높은 SINR 값을 얻을 수 있다는 것을 확인할 수 있다. 즉, 큰 사이즈의 평면 배열 안테나를 사용할수록, 제시된 적응 빔형성 위성 시스템은 더욱 우수한 성능을 가진다는 것을 확인할 수 있다.

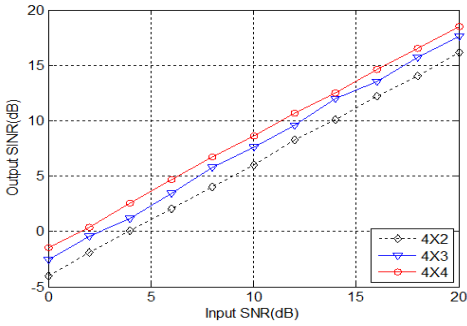


그림 2. 첫 번째 시나리오의 MVDR 빔형성기에 대한 출력 SINR  
Fig. 2 Output SINR of the MVDR beamformer for the first scenario

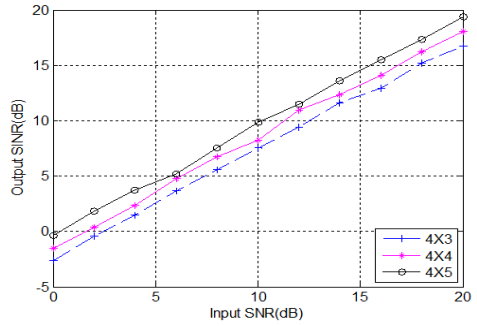


그림 5. 두 번째 시나리오의 MMSE 빔형성기에 대한 출력 SINR  
Fig. 5 Output SINR of the MMSE beamformer for the second scenario

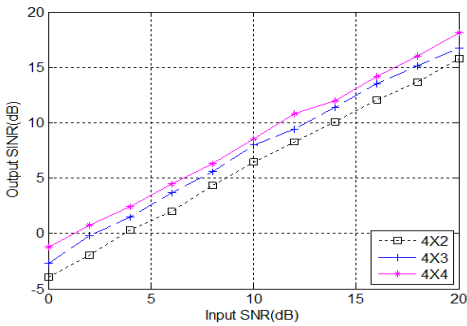


그림 3. 첫 번째 시나리오의 MMSE 빔형성기에 대한 출력 SINR  
Fig. 3 Output SINR of the MMSE beamformer for the first scenario

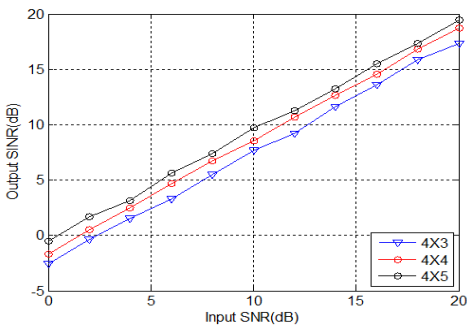


그림 4. 두 번째 시나리오의 MVDR 빔형성기에 대한 출력 SINR  
Fig. 4 Output SINR of the MVDR beamformer for the second scenario

#### IV. 결 론

본 논문에서는 효율적으로 다양한 신호정보를 수집하고, 간섭의 영향이나 왜곡을 최소화하여 수집된 신호정보를 지상의 관제센터로 송신하기 위한 평면 배열 안테나 기반의 적응 위성 시스템의 구조를 소개하였다. 제안된 시스템은 평면 배열 안테나, 수신된 신호의 도래각을 추정하는 MUSIC 도래각 추정기, 불필요한 간섭 신호의 제거를 위한 MVDR 간섭 제거기, 수집된 신호의 가공 및 저장을 위한 신호처리 및 D/B 유닛, 효율적인 송신을 위해 MMSE 기법을 적용한 송신 빔형성기로 구성되어 있다. 또한, 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 평면 배열 안테나 크기가 증가함에 따라 제안된 적응 위성 시스템의 송/수신 성능이 향상되었다는 결과를 확인하였다.

#### 감사의 글

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

이 논문은 2017년도 조선대학교 연구비의 지원을 받아 연구되었음.

References

[1] S. Kwon, D. Kim, S. Moon, J. Lee, S. Bae, H. Kim, Y. Lim, C. Kim, and I. Hwang, "3D Localization for a Launch Vehicle using Virtual TOA, AOA, and TDOA," *J. of the Institute of Electronics and Information Engineers*, vol. 55, no. 1, 2018, pp. 3-14.

[2] S. Hwang and J. J. Shynk, "Multicomponent Receiver Architectures for GPS Interference Suppression," *IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems*, vol. 42, no. 2, 2006, pp. 489-502.

[3] J. Mun, M. Hwang, and S. Hwang, "Performance Evaluation of Satellite System Based on Transmission Beamformer," *J. of the Korea Institute of Electronics Communications Sciences*, vol. 13, no. 4, 2018, pp. 713-720.

[4] Y. Choi, "MUSIC-Based Direction Finding through Simple Signal Subspace Estimation," *J. of the Institute of Electronics and Information Engineers*, vol. 48, no. 4, 2011, pp. 153-159.

[5] P. Stoica, P. Handel, and T. Soderstrom, "Study of Capon method for array signal processing," *J. of Circuits, Systems and Signal Processing*, vol. 14, no. 6, 1995, pp. 749-770.

[6] Y. Choi, "Efficient DOA Estimation of Coherent Signals Using ESPRIT," *J. of the Institute of Electronics and Information Engineers*, vol. 49, no. 9, 2012, pp. 164-171.

[7] 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.

[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] K. Lee, "A Study on Overlapped Adaptive Subarray Beamforming LCMV Method for Decrease Side Lobe Level" *J. of the Korean Institute of Information Technology*, vol. 9, no. 4, 2011, pp. 57-62.

[10] S. Serbetli and A. Yener, "Transceiver

Optimization for Multiuser MIMO Systems," *IEEE Trans. Signal processing*, vol. 52, no. 1, 2004, pp. 214-226.

[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

**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