

정방배열 안테나 기반 캐스케이드 도래각 추정 알고리즘 성능평가

김태윤* · 황석승**

Performance Evaluation of Cascade AOA Estimation Algorithm Based on Square Array Antenna

Tae-Yun Kim* · Suk-Seung Hwang**

요약

인공위성을 통한 정보수집은 위성에 탑재된 안테나를 기반으로 수행되는데, 위성 안테나는 크게 반사판 안테나, 렌즈 안테나, 위상배열 안테나로 분류된다. 이 중 다중빔 시스템 등의 안테나 패턴 조절 기능이 우수한, 위상배열 안테나가 많이 사용되는 추세이다. 위성 기반의 지상 신호정보 수집은 지리적 영향을 적게 받는 효율성을 가지나, 정확한 신호의 도래각 정보가 요구된다. 본 논문에서는 위상배열 안테나에 사용되는 안테나 배열형상에 대한 특징 및 장단점을 고찰한다. 또한, 위성 수신단에 탑재된 정방배열 안테나 기반의 캐스케이드 도래각 추정 알고리즘을 소개하고, 시뮬레이션을 통한 성능평가 결과를 제시한다.

ABSTRACT

The satellite antenna for collecting information is mainly classified into reflector antenna, lens antenna, and phased array antenna. Among them, the phased array antenna with the excellent antenna pattern control performance for a multi-beam system is frequently used. Although the terrestrial signal information collection based on the satellite is not much effected geographically, it requires the accurate angle-of-arrival (AOA) information of the interesting signal. In this paper, we discuss the characteristics and the advantages/disadvantages of the antenna array shape employed in the phased array antenna. In addition, we present the Cascade AOA estimation algorithm based on a square array antenna mounted on the satellite receiver, and show the performance evaluation results through the computer simulation.

키워드

Satellite, Information Collection, Cascade AOA Estimation, Square Array Antenna
인공위성, 정보수집, 캐스케이드 도래각 추정, 정방 배열 안테나

1. 서론

인공위성은 사용목적에 따라 방송 위성, 통신 위성,

관측 위성 등으로 분류된다[1]. 위성을 통한 지상의 정보수집은 위성에 탑재된 안테나를 사용하는데, 위성 고유의 사용목적에 따라 안테나는 다양한 크기와 형

* 조선대학교 전자공학과 (skriekd12@chosun.kr)

** 교신저자 : 조선대학교 전자공학부

• 접수일 : 2019. 10. 28

• 수정완료일 : 2019. 11. 21

• 게재확정일 : 2019. 12. 15

• Received : Oct. 28, 2019, Revised : Nov. 21, 2019, Accepted : Dec. 15, 2019

• Corresponding Author : Suk-Seung Hwang

School. of Electronic Engineering, Chosun University,

Email : hwangss@chosun.ac.kr

상을 가질 수 있다. 초기의 위성들은 단일 안테나 시스템 기반의 단순 신호 중계기 역할을 하였지만, 통신 기술이 발달 하면서 대용량 서비스 및 다중빔 시스템을 위한 위성안테나 개발이 진행되었다. 위성에서 요구되는 조건(다중빔 시스템, 일정수준 이상의 안테나 이득, 정확한 빔 주사능력, 낮은 부엽 레벨(SLL : Side Lobe Level), 등의 안테나 패턴 조정능력)을 만족시키기 위해 반사판을 이용한 반사판 안테나, 렌즈를 사용하는 렌즈 안테나, 안테나소자의 위상을 조절하는 방식의 위상 배열 안테나 등이 기본적으로 사용된다. 일반적으로 반사판 안테나는 그 구조가 단순하고 가벼우므로 위성안테나로서 가장 보편적으로 사용되지만 다중빔 안테나의 경우 스캔범위가 제한된다는 단점이 있고, 렌즈 안테나의 경우 광학적 특성이 반사판 안테나와 비슷하지만 저주파대역에서 사용 시 무게가 증가된다는 단점이 있다. 위상 배열 안테나는 반사판과 렌즈 안테나에 비해 구성 소자수 증가에 따라 무게와 구현 복잡도가 증가하지만, 높은 개구면 효율, 스피로버손실(spillover loss) 부재, 높은 신뢰성 등의 장점을 가진다[2]. 이와 같은 장점을 살리기 위한 위상 배열 안테나에 대한 다양한 연구들이 수행되었다

[3-5].

위상 배열 안테나는 선형, 평면형(삼각형, 사각형, 원형, L형 등), 적층형 등 다양한 형상으로 배치될 수 있으며, 안테나 배열 형태에 대한 장단점은 표1에 정리되어 있다. 위성의 구조적 특성 및 운용 목적상, 고도각만 탐색 가능한 선형 배열 안테나 보다는 고도각과 방위각 모두 탐색이 가능한 편면형 배열안테나가 주로 사용되고 있다. 또한, 안테나 소자수가 증가할수록 더 정밀한 정보수집이 가능하며, 미국, 러시아, 중국 등 우주개발 선진국에서 보유한 정보 수집을 목적으로 하는 위성들은 대부분 전개형 대형 안테나를 사용하고 있다[7]. 전개형 대형 안테나를 탑재한 위성을 기반으로 하는 지상의 정보 수집은 지형적인 제약 사항 없이 지상의 데이터를 효과적으로 수집할 수 있지만[8], 정확한 신호정보 수집을 위해서는 신호의 정확한 도래각 정보 파악이 중요하다.

표 1. 안테나 배열 형상에 대한 장단점[6]
Table 1. Advantage and disadvantage of antenna array geometry

Antenna array geometry	Advantage		Disadvantage
Linear	Simple structure provides ease of analysis		Limited AOA Search
Planar	Common		
Rectangular	Simultaneous elevation and azimuth angle estimation	Low AOA estimation error	Edge element causes AOA estimation defect
Circular		A symmetrical circular array with exceptional resolution	Low resolution for elevation angle estimation
L-shape		More accurate than rectangular array with the same antenna element	Lower estimation consistency than circular array

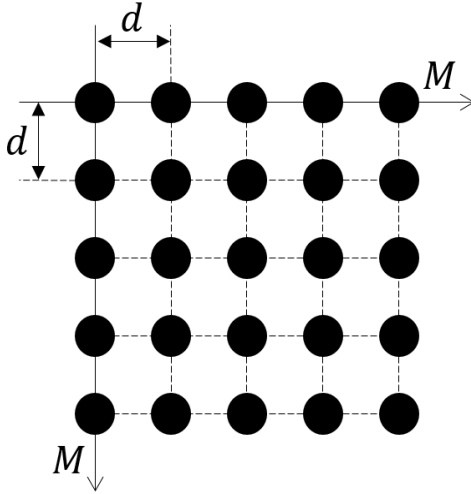


그림 1. 정방 배열 안테나 구조
Fig. 1 Structure of square array antenna

본 논문에서는 효율적으로 지상의 정보를 수집하기 위해 전개형 대형 안테나 시스템의 기반이 되는 정방 배열 안테나를 캐스케이드 AOA 추정 알고리즘[9]의 수신단에 적용하고, 이에 대한 성능평가를 위해 컴퓨터 시뮬레이션 결과를 제시한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서 수신신호 모델을 제시하고, 3장에서 정방 배열 안테나 기반의 캐스케이드 AOA 추정 알고리즘에 대해 소개한다. 4장에서는 제시된 도래각 추정 알고리즘의 성능평가를 위한 컴퓨터 시뮬레이션 결과를 보이고, 5장에서 본 논문의 결론을 맺는다.

II. 수신신호 모델

본 장에서는 정방 형태로 배열된 위성 안테나로 입사되는 다수 개의 신호와 잡음으로 구성된 수신신호의 수학적 모델을 제시한다. 수신 안테나는 그림 1의 구조를 가지는 $M \times M$ 크기의 정방 배열 안테나로 가정한다. 안테나에 D 개의 신호가 입사된다고 가정하면, 샘플(sample) 인덱스 k 에 대한 수신신호 벡터는 식(1)과 같이 주어진다.

$$\mathbf{r}(k) = \mathbf{A}\mathbf{c}(k) + \mathbf{j}(k) \quad (1)$$

식 (1)에서 $\mathbf{r}(k)$ 는 $M^2 \times 1$ 크기의 수신신호 벡터이고, \mathbf{A} 는 크기 $M^2 \times D$ 의 어레이 응답 행렬이며 식 (2)와 같이 정의된다.

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & \dots & 1 \\ e^{-j\rho_1} & \dots & e^{-j\rho_D} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ e^{-j(M-1)\rho_1} & \dots & e^{-j(M-1)\rho_D} \\ e^{-j\sigma_1} & \dots & e^{-j\sigma_D} \\ e^{-j(\rho_1 + \sigma_1)} & \dots & e^{-j(\rho_D + \sigma_D)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ e^{-j((M-1)\rho_1 + (M-1)\sigma_1)} & \dots & e^{-j((M-1)\rho_D + (M-1)\sigma_D)} \end{bmatrix} \quad (2)$$

식 (2)에서 $\rho_d = 2\pi(d/\lambda)\cos\phi_i\sin\theta_i$, $\sigma_d = 2\pi(d/\lambda)\sin\phi_i\sin\theta_i$, 이고 ϕ 는 방위각(azimuth angle), θ 는 고도각(elevation angle), λ 는 파장, $d = \lambda/2$ 는 안테나 소자간격을 각각 의미한다. $\mathbf{c}(k)$ 는 $D \times 1$ 크기의 신호벡터이고, $\mathbf{j}(k)$ 는 $M^2 \times 1$ 크기의 iid(: independent and identically distributed) 특성을 갖는 평균이 0이고 분산이 σ^2 인 AWGN(: Additive White Gaussian Noise) 잡음벡터이다.

III. 정방 배열 안테나 기반의 캐스케이드 AOA 추정 알고리즘

본 장에서는 정방배열 안테나 기반의 캐스케이드 AOA 추정 알고리즘을 소개한다. 캐스케이드 알고리즘은 그림 2의 구조로 동작한다.

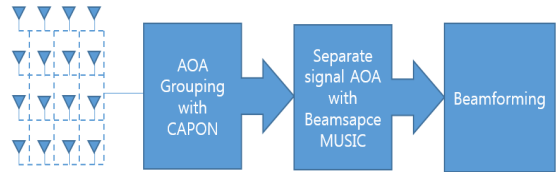


그림 2. 캐스케이드 도래각 추정 알고리즘 구조
Fig. 2 Structure of cascade AOA estimation algorithm

3.1 도래각 그룹을 찾기 위한 CAPON 알고리즘

도래각 그룹을 찾기 위한 CAPON 알고리즘의 공간스펙트럼은 식(3)과 같다.

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

식(3)에서 $\mathbf{R}_M = E[\mathbf{r}(k)\mathbf{r}(k)^H]$ 는 수신신호의 공분산 행렬이며, $\mathbf{a}(\theta, \phi)$ 는 특정 고도각과 방위각에 대한 어레이 응답 벡터이고, $(\cdot)^H$ 는 켈레 전치를 나타낸다. 식(3)의 피크치를 이용하여 하나 이상의 신호를 포함하는 도래각 그룹을 찾는다.

3.2 개별 신호의 도래각 추정을 위한 Beamspace MUSIC 알고리즘

CAPON 알고리즘으로 추정된 도래각 그룹 내의 각각의 신호원 도래각 추정을 위한 Beamspace MUSIC 알고리즘의 공간스펙트럼은 식(4)와 같다.

$$P_{BM}(\theta, \phi) = \frac{[\mathbf{B}^H \mathbf{a}(\theta, \phi)]^H [\mathbf{B}^H \mathbf{a}(\theta, \phi)]}{[\mathbf{B}^H \mathbf{a}(\theta, \phi)]^H \mathbf{E}_{BSN} \mathbf{E}_{BSN}^H [\mathbf{B}^H \mathbf{a}(\theta, \phi)]} \quad (4)$$

식(4)에서 \mathbf{E}_{BSN} 는 빔공간 잡음 부공간 고유벡터 행렬로서, $\mathbf{R}_{BM} = E[\mathbf{B}^H \mathbf{r}(k)\mathbf{r}(k)^H \mathbf{B}]$ 의 고유치 분해를 통해 계산되며 \mathbf{B} 는 빔공간 변환 행렬로, 각 축에 대한 1차원 DFT 행렬의 kronecker 연산(\otimes)을 통해 계산된다. 식(4)의 피크치를 사용해 추정된 도래각 그룹에 포함된 각 신호의 도래각을 구별하게 된다.

IV. 컴퓨터 시뮬레이션

본 장에서는 정방 배열 안테나 기반의 캐스케이드 도래각 추정 알고리즘의 성능평가를 위한 컴퓨터 시뮬레이션 결과를 제시한다. 컴퓨터 시뮬레이션을 위해 두 가지 시나리오를 고려하였다. 첫 번째 시나리오에서는 1개의 CW(Continuous Wave)신호, 1개의 WB(Wideband) 간섭신호, 1개의 FM(Frequency

표 2. 첫 번째 컴퓨터 시뮬레이션 시나리오
Table 2. The first computer simulation scenario

Signal	Elevation(°)	Azimuth(°)	Center Frequency
CW	30	-70	0.4
WB	30	-64	0.25
FM	30	100	0.15

표 3. 두 번째 컴퓨터 시뮬레이션 시나리오
Table 3. The second computer simulation scenario

Signal	Elevation(°)	Azimuth(°)	Center Frequency
CW1	-22	-108	0.1
CW2	-22	77	0.4
AM	-22	-104	0.05
FM	-22	83	0.3

Modulation)신호를 포함한 총 3개의 신호가 사용되었고, 두 번째 시나리오에서는 2개의 CW신호, 1개의 AM(Amplitude Modulation)신호, 1개의 FM 신호를 포함한 총 4개의 신호가 고려되었다. 시뮬레이션에 사용된 각 신호의 주요 매개변수는 표2와 표3에 정리되어 있다. AM 신호의 변조지수 α 는 0.03이고, FM 신호의 변조 인덱스 β 는 0.08이며, FM 신호의 정규화된 변조주파수 f_m 은 0.001로 가정하였다. 정방배열 안테나의 크기로 3x3, 4x4, 5x5의 세 가지 경우를 고려하였으며, 신호 대 잡음비는 20dB로 가정하였다. 또한, CAPON 알고리즘의 해상도는 1° 단위로 추정하였고, Beamspace MUSIC 알고리즘의 해상도는 추정된 그룹의 $\pm 20^\circ$ 내에서 0.01°를 적용하였다.

그림 3과 4는 각 시나리오에 대한 수신신호 스펙트럼을 나타내며 스펙트럼 상에 모든 신호가 존재함을 확인 할 수 있다. 그림 5와 6은 각 시나리오에 대한 CAPON알고리즘의 비용함수의 역을 나타낸다. 그림 5의 결과에서 -67°, 100°에서 피크 값을 가짐을 알 수 있으며, -67°의 추정그룹에는 -70°의 방위각을 갖는 CW 신호와 -64°의 방위각을 갖는 WB신호가 존재한다. 그림 6의 결과에서 -106°, 80°에서 피크 값을 가짐을 알 수 있으며, -106°의 추정그룹에는 -108°의 방위각을 갖는 CW1 신호와 -104°의 방위각을 갖는 AM신호가 존재하고, 80°의 추정그룹에는 77°의 방위

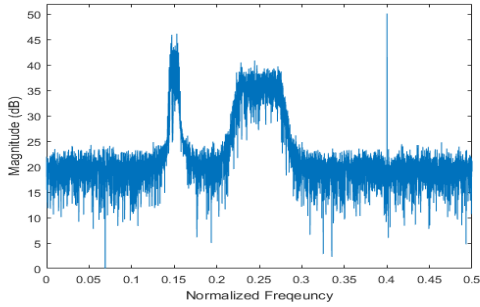


그림 3. 첫 번째 시나리오의 수신신호 스펙트럼
Fig. 3 The received signal spectrum of the first scenario

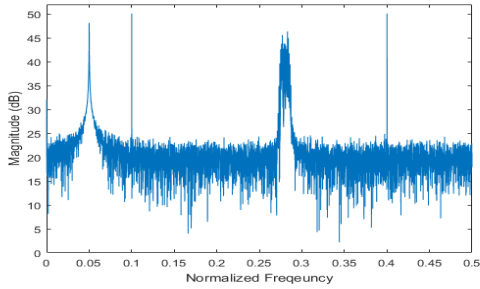


그림 4. 두 번째 시나리오의 수신신호 스펙트럼
Fig. 4 The received signal spectrum of the second scenario

각을 갖는 CW2 신호와 83°의 방위각을 갖는 FM신호가 존재한다. 그림 7과 8은 그림 5와 6의 신호그룹에 대한 Beamspace MUSIC 알고리즘의 비용함수의 역을 나타낸다. 그림 7에서 첫 번째 그룹에 존재하는 -70°의 CW 신호와 -64°의 WB신호, 두 번째 그룹에 존재하는 100°의 FM신호가 명확히 구별됨을 확인할 수 있다. 또한, 그림 8에서 방위각 -106°를 갖는 첫 번째 그룹에 -108°의 CW1 신호와 -104°의 AM신호, 방위각 80°를 갖는 두 번째 그룹에 77°의 CW2 신호와 83°의 FM신호를 명확하게 구별할 수 있음을 확인할 수 있다. 그림 7과 8에서 정방 배열 안테나의 소자 개수가 증가할수록 각 도래각의 구별능력이 우수해 진다는 것 또한 확인할 수 있다. 두 개의 시나리오에 대한 컴퓨터 시뮬레이션을 통해, 정방 배열 안테나를 적용한 캐스케이드 도래각 추정 알고리즘의 우수한 추정 성능을 증명할 수 있다.

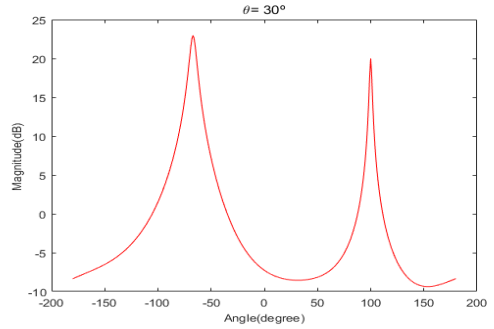


그림 5. 첫 번째 시나리오에 대한 CAPON 알고리즘 공간 스펙트럼
Fig. 5 Spatial spectrum of CAPON for the first scenario

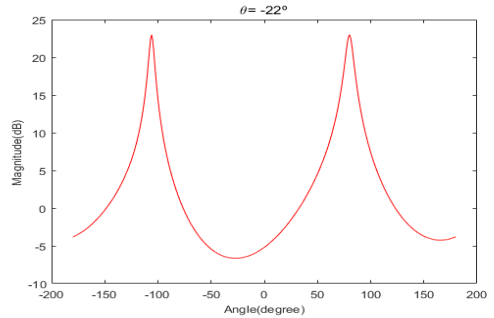


그림 6. 두 번째 시나리오에 대한 CAPON 알고리즘 공간 스펙트럼
Fig. 6 Spatial spectrum of CAPON for the second scenario

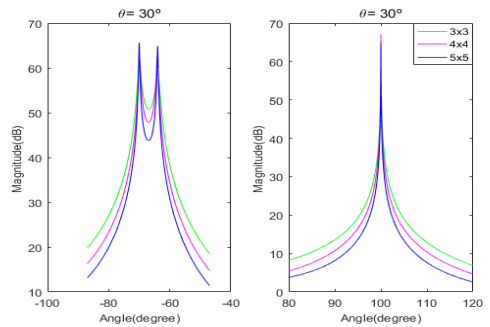


그림 7. 첫 번째 시나리오에 대한 Beamspace MUSIC 알고리즘 공간 스펙트럼
Fig. 7 Spatial spectrum of Beamspace MUSIC for the first scenario

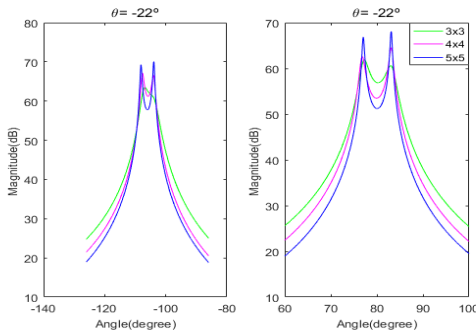


그림 8. 두 번째 시나리오에 대한 Beamspace MUSIC 알고리즘 공간 스펙트럼

Fig. 8 Spatial spectrum of Beamspace MUSIC for the second scenario

V. 결 론

본 논문에서는 전개형 대형 안테나 시스템의 기본이 되는 정방 배열 안테나를 CAPON과 Beamspace MUSIC으로 구성된 캐스케이드 AOA 추정 알고리즘에 적용하였다. 또한, 컴퓨터 시뮬레이션을 통해, 정방 배열 안테나 기반의 캐스케이드 도래각 추정 알고리즘이 우수한 도래각 추정 성능을 가지는 것을 확인하였다. 정방 배열 안테나의 소자 개수가 증가하면, 각 신호원의 도래각 구별 능력이 우수해 진다는 것 또한 확인하였다. 본 논문에서 제시된 도래각 추정 알고리즘은 정보 수집을 목적으로 하는 위성에 사용하기 매우 적합한 것으로 판단된다.

감사의 글

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

이 논문은 2018년도 조선대학교 연구비의 지원을 받아 연구되었음.

References

- [1] S. Lee, J. Lee, E. Kang, and S. Yong, "Technical Trends of X-band Antenna for Space Program," *Current Industrial and Technological Trends in Aerospace*, vol. 11, no. 2, 2013, pp. 81-89.
- [2] M. O. Kolawole, *Satellite Communication Engineering*, New York: CRC Press, 2002.
- [3] E. Kang, S. Lee, S. Ryu, H. Lee, and S. Yong, "States of X Band Phased Array Antenna for Transmission of Earth Exploration Data," *Current Industrial and Technological Trends in Aerospace*, vol. 12, no. 2, 2014, pp. 109-114.
- [4] Y. Shin, K. Kang, H. Lee, J. Kim, J. Kim, J. Lee, N. Kim, M. Park, and B. Lee, "A Study on the Array Antenna for Satellite Broadcasting Receiver," *J. of Korea Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 14, no. 8, 2003, pp. 787-795.
- [5] J. Yun, S. Jeon, J. Choi, and J. Chae, "Satellite Communication Microstrip 8x2 Array Antenna for TX / RX Dual Operation at Ku-band," *J. of Korea Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 13, no. 6, 2002, pp. 574-581.
- [6] R. Sanudin, "Planar Array Desing and Analysis on Direction of Arrival Estimation for Mobile Communication Systems," Doctor's Thesis, *The university of Edinburgh*, 2014.
- [7] H. Lee, "The History and Current Status of Signal Intelligence Satellites," *Current Industrial and Technological Trends in Aerospace*, vol. 11, no. 2, 2013, pp. 111-118.
- [8] 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, 2018, pp. 1207-1212.
- [9] T. Kim and S. Hwnag, "Cascade AOA Estimation Using Uniform Rectangular Array Antenna," *J. of the Korea Institute of Electronics Communications Sciences*, vol. 13, no. 5, 2018, pp. 923-930.

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

