

중계기를 이용한 TOA 및 TDOA 기반의 위치추정 기법

전슬비* · 황석승**

Location Estimation Technique Based on TOA and TDOA Using Repeater

Seul-Bi Jeon* · Suk-Seung Hwang**

요약

무인화 기술의 획기적인 발달로 인해, 사용자 또는 객체의 위치를 정확히 추정하는 위치추정기술(Location Detection Technology : LDT)이 매우 중요하게 부각되고 있다. 대표적인 위치추정기술로 도달 시간을 측정하여 위치를 계산하는 TOA(: Time of Arrival)와 신호의 도달 시간차를 이용하여 위치를 계산하는 TDOA(: Time Difference of Arrival) 방식이 있다. 이들 기술은 3개 이상의 기지국들로부터 수신된 신호들을 기반으로 TOA의 경우에는 원을 TDOA의 경우에는 쌍곡선을 그려 교점을 계산해 위치를 추정하는 기술이다. 도심의 경우 전파 음영지역이 많이 발생하는데, 이 문제점을 개선하기 위해 많은 중계기가 설치되어 있다. 이러한 중계기를 거쳐서 수신되는 신호를 기반으로 단말기의 오차를 추정할 시 심각한 오차가 발생하게 된다. 본 논문은 중계기를 거쳐 수신된 신호를 이용하여, 위치를 정확하게 추정할 수 있는 기술을 제안한다. 제안된 기술은 한 개의 중계기와 두 개의 기지국으로부터 수신된 신호를 기반으로 TOA 및 TDOA 기법을 이용하여 단말기의 위치를 추정한다.

ABSTRACT

Due to the epochal development of the unmanned technology, the importance of LDT(: Location Detection Technology), which accurately estimates the location of a user or object, is dramatically increased. TOA(: Time of Arrival), which calculates a location by measuring the arrival time of signals, and TDOA(: Time Difference of Arrival) which calculates it by measuring the difference between two arrival times, are representative LDT methods. Based on the signals received from three or more base stations, TOA calculates an intersection point by drawing circles and TDOA calculates it by drawing hyperbolas. In order to improve the radio shadow area problem, a huge number of repeaters have been installed in the urban area, but the signals received through these repeaters may cause the serious error for estimating a location. In this paper, we propose an efficient location estimation technique using the signal received through the repeater. The proposed approach estimates the location of MS(: Mobile Station) employing TOA and TDOA methods, based on signals received from one repeater and two BS(: Base Station)s.

키워드

Location Detection Technology, Repeater, TDOA, TOA
위치 측위 기술, 중계기, TDOA, TOA

* 조선대학교 전자공학과 IT-Bio 융합시스템 전공(seul.bi0419@naver.com) • Received : Jun. 25, 2022, Revised : Jul. 19, 2022, Accepted : Aug. 17, 2022
• Corresponding Author : Suk-Seung Hwang

** 교신저자 : 조선대학교 전자공학부 IT-Bio 융합시스템
Interdisciplinary Program IT-Bio Convergence System,
전공 School of Electronic Engineering, Chosun University
Email : hwangss@chosun.ac.kr

• 접수일 : 2022. 06. 25
• 수정완료일 : 2022. 07. 19
• 게재확정일 : 2022. 08. 17

I. 서 론

최근, 무선통신 서비스가 발달하면서 단말기(Mobile Station : MS)의 위치를 정확하게 추정하는 신뢰도 높은 위치 추정 기술(Location Detection Technology, LDT)이 필수적인 요소로 자리 잡고 있다[1-2]. 다양한 위치추정 방식들이 있는데, 셀 아이디(Cell ID)로 매칭하여 해당 기지국의 위치를 통해 단말기의 위치를 구하는 Cell ID기법, 신호의 방향각을 이용하여 위치를 계산하는 AOA(Angle of Arrival)기법, 전파의 도달 시간을 측정하여 위치를 계산하는 TOA(Time of Arrival)기법, 서로 다른 기지국에서 송신하는 신호의 도달 시간차를 이용해 위치를 계산하는 TDOA(Time Difference of Arrival)기법 등이 있다[3-6].

많은 통신 장애물이 존재하는 도심의 경우, 원활한 무선통신 서비스를 제공하기 위해서는 장애물에 의한 음영지역을 최소화해야 한다. 음영지역을 없애기 위해서는 기지국 수를 늘려야 하는데, 이 경우 막대한 비용이 발생하므로, 저렴한 비용의 중계기를 많이 설치하고 있다[7-9]. 하지만, 중계기를 거친 신호를 수신하여 단말기의 위치를 추정할 시 기지국으로부터 직접 수신된 신호에 비해 도달 시간이 길어져 심각한 위치추정 오차가 발생하게 된다는 문제점이 있다.

위의 문제점을 개선하기 위해, 본 논문은 중계기를 고려한 TOA와 TDOA 기법 기반의 위치추정 기법을 제안한다. 제안된 위치추정 방식은 중계기를 고려할 수 있도록 TDOA 수식을 변형하여 중계기와 단말기 사이의 도달 시간을 계산한다. 이를 통해 계산된 중계기와 단말기의 거리 및 좌표, 해당 기지국과 단말기의 거리 및 좌표, 다른 기지국과 단말기의 거리 및 좌표를 이용하여 세 개의 원을 그리고 단말기의 위치를 계산한다. 이 과정은 일반적인 TOA 위치추정 방식이다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서 중계기를 고려한 TDOA에 대해 소개하고, 3장에서 두 개의 기지국과 한 개의 중계기를 이용하여 실제적인 단말 위치를 추정하는 TOA 기술에 대해 설명한다. 4장에서 제안된 위치추정 기술의 성능평가를 위한 컴퓨터 시뮬레이션 결과가 제공되고, 5장에서 본 논문의 결론을 맺는다.

II. 중계기를 고려한 변형된 TDOA

TDOA 방식은 서로 다른 기지국들에서 동시에 전송한 신호에 대해 해당 신호가 단말기까지 도달 시간의 차이를 이용하여 쌍곡선을 만들고, 다른 기지국들로부터 형성된 쌍곡선들과의 교점을 계산하여 단말의 위치를 추정한다[10-11]. 본 장에서는 TDOA 기법을 중계기에 적용하여, 중계기와 단말기 사이의 도달 시간을 계산하는 방법을 제시한다.

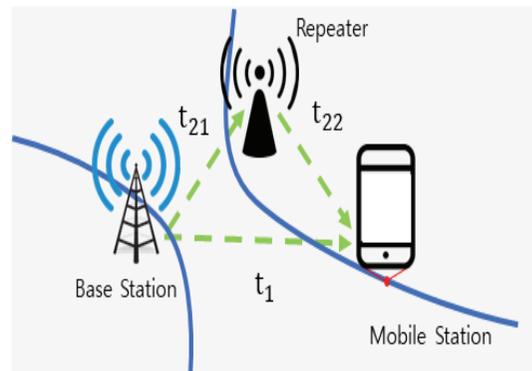


그림 1. 중계기가 포함된 기지국과 단말기 사이의 송수신 개념도

Fig. 1 Concept of signal transmission and reception between BS and MS including repeater

그림 1은 본 논문에서 제시하는 TDOA 방법을 설명하기 위한, 중계기를 포함한 기지국과 단말기 사이의 통신 개념도이다. t_1 은 기지국으로부터 전송된 신호를 단말기가 직접 수신하는데 소요된 시간을 나타낸 것이고, t_2 는 기지국에서 송신된 신호가 중계기를 거쳐 단말기로 수신되는데 소요된 신호로 기지국과 중계기 사이의 도달 시간 t_{21} 과 중계기와 단말기 사이의 도달 시간 t_{22} 의 총 합과 같다. t_{21} 은 기지국과 중계기를 설치할 시 계산할 수 있는 사전에 알고 있는 값이지만, t_{22} 는 알지 못하는 계산해야 하는 값이 된다. 중계기 내부에서의 모든 처리 시간은 t_{21} 에 포함된다고 가정한다. 측정된 t_1 과 t_2 사이의 신호 도달 시간 차이를 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tau_{2,1} = t_2 - t_1 \quad (1)$$

t_{21} , t_{22} 를 식(1)에 적용하면 식(2)를 얻을 수 있다.

$$\tau_{2,1} = t_{21} + t_{22} - t_1 \quad (2)$$

식(2)에서 t_{22} 는 일반적으로 몇 개의 중계기를 거쳐서 도달하는지 알 수 없기 때문에 직접적으로 사용이 불가능하다. 따라서 본 논문에서는 t_{22} 값을 추정(\hat{t}_{22})하기 위해 알 수 있는 값을 $\tau_{2,1}$, t_{21} , t_1 이용하여, 식(3)과 같이 계산할 수 있다.

$$\hat{t}_{22} = \tau_{2,1} - t_{21} + t_1 \quad (3)$$

식(3)에서 \hat{t}_{22} 는 추정된 t_{22} 값을 나타내며, 이 값을 이용하여 중계기와 단말기 사이의 거리를 추정할 수 있고, 그 결과를 단말기의 실제 위치를 추정하기 위한 TOA에 적용한다.

III. 단말기의 위치추정을 위한 TOA

본 장에서는 변형된 TDOA 방식을 사용해 계산된 중계기와 단말기 사이의 도달 시간, 해당 기지국과 단말기 사이의 도달 시간, 다른 기지국과 단말기 사이의 도달 시간을 기반으로 단말기의 실제 위치를 추정하기 위한 TOA 방법을 소개한다.

중계기를 통과하는 신호를 송신한 기지국과 단말기 사이의 거리를 d_1 , 중계기와 단말기 사이의 거리를 d_2 , 신호 수신 가능한 다른 기지국과 단말기 사이의 거리를 d_3 이라고 가정하면, 각 거리는 식(4)와 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} d_1 &= c \times t_1 \\ d_2 &= c \times \hat{t}_{22} \\ d_3 &= c \times t_3 \end{aligned} \quad (4)$$

식(4)에서 c 는 전파의 속도이다. 식(4)에서 계산된 거리와 두 기지국과 중계기의 좌표를 기반으로 세 개의 원을 그려 만나는 교점을 단말기의 위치로 결정한다.

기지국과 단말기 사이의 도달 시간은 수신 신호의

전력을 측정하거나 지면의 개수를 세어 추정하는데, 일반적으로 추정된 시간은 실제 시간보다 길어지게 되어, 식(4)에서 계산된 거리들을 반지름으로 세 개의 원을 그리면 그림 2와 같이 한 점에서 만나지 않고

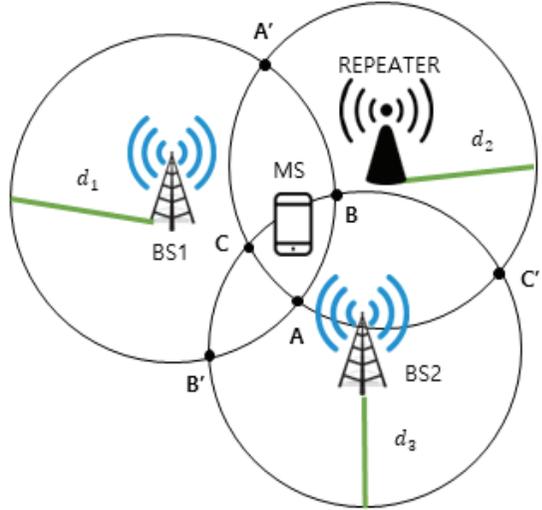


그림 2. 2개의 기지국과 중계기를 이용한 TOA 위치추정

Fig. 2 TOA considering two BSs and one repeater

여섯 개의 교점을 가지게 된다. 그림 2에서 여섯 개의 교점 중 세 개의 내부 교점들 A, B, C를 선택하여야 하는데, 이를 위해 본 논문에서는 [12]에서 제안한 Shortest Distance Approach를 사용한다. 세 개의 내부 교점을 구한 후, 단말기의 추정 좌표(\hat{x}, \hat{y})는 식(5)와 같이 내부 교점들의 평균값을 계산하여 구한다.

$$\begin{aligned} \hat{x} &= \frac{A_x + B_x + C_x}{3} \\ \hat{y} &= \frac{A_y + B_y + C_y}{3} \end{aligned} \quad (5)$$

II장의 변형된 TDOA와 본 장의 TOA를 기반으로 중계기를 고려하여 단말기의 위치를 추정하는 기술에 대한 기본 블록다이어그램이 그림 3에서 보여진다. 수신기는 기지국과 중계기로부터 신호들을 수신하고, 변형된 TDOA를 이용하여, 중계기와 기지국 사이의 거리를 추정한다. 기지국으로부터 직접 수신된 신호를

기반으로 기지국과 단말기의 거리를 추정하고, 다른 가능한 기지국으로부터 수신된 신호를 기반으로 해당 기지국과 중계기 사이의 거리를 추정한다. 마지막으로 두 개의 기지국과 한 개의 중계기의 좌표와 각 거리를 이용하여, 세 개의 원을 그리고, 교점을 계산하여 단말기의 위치를 결정한다.

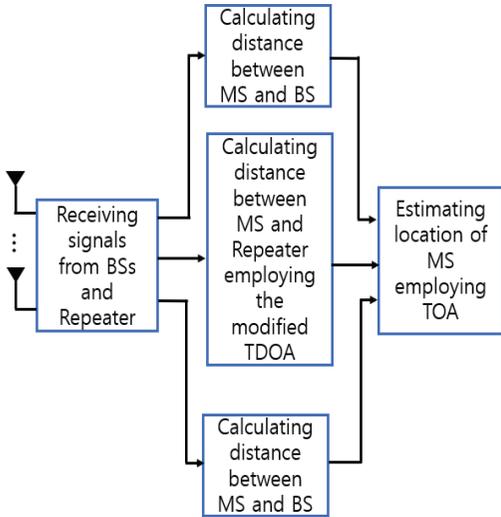


그림 3. 제안된 위치추정 기술의 기본 블록 다이어그램

Fig. 3 Basic block diagram of the proposed location estimation technique

IV. 컴퓨터 시뮬레이션

본 장은 제안된 중계기를 고려한 TDOA 및 TOA 기반의 위치추정 기술에 대한 성능평가를 위한 컴퓨터 시뮬레이션 결과를 제시한다. 시뮬레이션을 위해 두 가지의 시나리오를 고려한다.

1. 시나리오1 (좌표)
 - 단말기: (0~500, 0~500)
 - 기지국: (0, 0), 중계기: (1000, -1500)
 - 두 번째 기지국: (3000, 2500)
2. 시나리오2 (좌표)
 - 단말기: (-300~300, -300~300)

- 기지국: (-2000, 500), 중계기: (-500, 2000)
- 두 번째 기지국: (1000, -1500)

시나리오의 좌표 단위는 미터(m)이고 단말기의 좌표는 주어진 구간 내에서 임의로 변한다고 가정한다. 또한, 두 시나리오 모두 중계기 내부 처리 지연은 $1\mu s$ 로 가정한다. 그림 4는 첫 번째 시나리오에서 단말기의 좌표를 (500, 400)으로 가정하였을 시 배치도를 나타낸다. 그림 5는 두 번째 시나리오에서 단말기의 좌표가 (-100, 300)으로 가정하였을 시 배치도를 나타낸다.

위치추정 성능평가를 위해 실제 위치와 추정 위치의 오차는 식(6)의 RMSE(Root Mean Square Error)를 계산해 판별한다.

$$Error_{position} = \sqrt{\frac{E[(x-\hat{x})^2] + E[(y-\hat{y})^2]}{2}} \quad (6)$$

식(6)에서 (x, y) 는 단말기의 실제 좌표이며, (\hat{x}, \hat{y}) 은 단말기의 추정된 좌표이다. 시뮬레이션은 다양한 반송파 주파수(10MHz, 50MHz, 250MHz, 500MHz, 1GHz)에 대해 시행되었고, 각 주파수당 10,000번 반복하여 RMSE 값을 계산하였다. 모든 반복수행에 단말기의 좌표는 임의로 설정하였다.

그림 6은 첫 번째 시나리오의 RMSE 결과를 보인다. 일반적인 TOA 방법과 비교하기 위해, 가상의 기지국(2000, -500)을 설정하여 일반적인 TOA에 대한 RMSE 값을 계산하였다. 그림 7은 두 번째 시나리오의 RMSE 결과로, 일반적인 TOA를 위한 가상의 기지국의 좌표는 (800, 1500)으로 설정이 되었다. 두 그림으로부터 중계기를 고려한 TDOA와 TOA 기반의 제안된 위치추정 기술이 일반적인 TOA 기술과 비슷한 위치추정 성능을 보임을 확인할 수 있다. 하지만, 일반적인 TOA 기술은 중계기를 고려할 수 없다.

V. 결론

전파음영 현상이 빈번히 발생하는 도심의 원활한 무선통신 서비스를 위해 대량의 중계기가 설치되어 있다. 이러한 중계기를 거쳐 수신되는 신호를 기반으

로 단말기의 위치를 추정할 시 심각한 추정오차가 발생할 수 있다. 본 논문은 이러한 문제를 개선하기 위해, 중계기를 고려한 TDOA 및 TOA를 기반으로 한 위치추정 기술을 제안하였다. 중계기를 고려하기 위해 변형된 TDOA를 이용하여, 중계기와 단말기 사이의 도달 시간과 거리를 계산한다. 계산된 거리와 두 개의 기지국으로부터 수신된 신호를 기반으로 TOA 기법을 이용해 단말기의 위치를 결정한다. 또한, 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 제안된 위치추정 기술의 성능을 확인하였다.

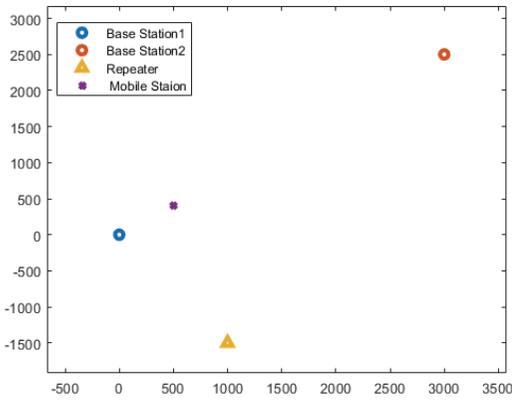


그림 4. 첫 번째 시나리오에 대한 배치도
Fig. 4 Layout for the first scenario

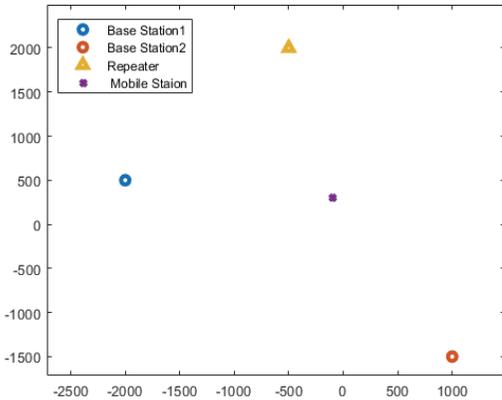


그림 5. 두 번째 시나리오에 대한 배치도
Fig. 5 Layout for the second scenario

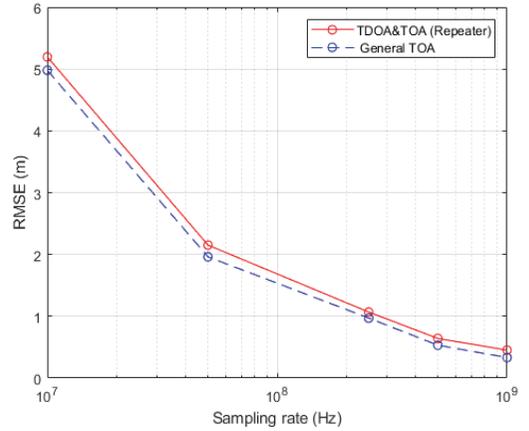


그림 6. 첫 번째 시나리오에 대한 RMSE 커브
Fig. 6 RMSE curve for the first scenario

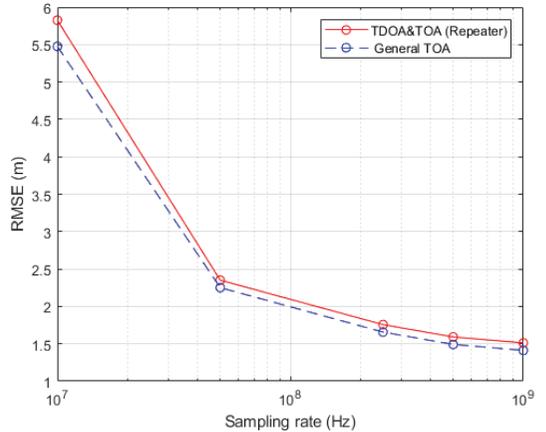


그림 7. 두 번째 시나리오에 대한 RMSE 커브
Fig. 7 RMSE curve for the second scenario

감사의 글

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

이 논문은 2021년도 조선대학교 연구비의 지원을 받아 연구되었음.

References

- [1] S. Hwang, J. Yi, S. Yoon and Y. Kwon, "Appratus and method for positioning in wireless communication system," Korea Patent no. 10-1048444, Nov. 2011.
- [2] J. Kwon and S. Cho, "Performance Analysis of Fingerprinting Method for LTE Positioning according to W-KNN Correlation Techniques in Urban Area," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 16, no. 6, 2021, pp. 1059-1068.
- [3] H. Kong, T. Sung and Y. Kwon, "Comparison of TDOA Location Algorithms for Indoor UWB Positioning," *J. of Institute of Electronic Engineers of Korea*, vol. 42, no. TC-1, 2005, pp. 9-15.
- [4] H. Shim, "Comparative analysis for advanced technologies of the location based service," *J. of the Korea Institute of Information and Communication Engineering*, vol. 16, no. 4, 2012, pp. 853-871.
- [5] S. Kwon, D. Kim, S. Moon, J. Lee, S. Bae, H. Kim, Y. Lim, D. Kim, C. Kim and I. Hwang, "3D Localization for a Launch Vehicle using Virtual TOA, AOA, and TDOA," *J. Institute of Electronics and Information Engineers*, vol. 55, no. 1, 2018, pp. 3-14.
- [6] J. J. Caffery, "A new approach to the geometry of TOA location," *Conf. 52nd Vehicular Technology*, vol. 4, 2000, pp. 1943-1949.
- [7] B. Lee, K. Sung and T. Ban, "A Relay Selection Scheme for Network Security," *J. of the Korea Institute of Information and Communication Engineering*, vol. 20, no. 12, 2016, pp. 2213-2218.
- [8] W. Cho, "Performance Comparison of Differential Distributed Cooperative Networks with Modulation Scheme and Relay Location," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 15, no. 3, 2020, pp.445-450.
- [9] D. Cho, K. Kim, S. Lee, M. Kim, K. Kim, B. Park and H. Ko, "The Design of Smart Antenna Structures for RF Repeater," *J. of the Institute of Convergence Signal processing*, vol. 14, no. 2, 2013, pp. 110-116.
- [10] H. Choi, T. Hah, Y. Kim and K. Kim, "A Study on the Technique of Efficient TDOA Technique Direction Finding Using Drones," *J. of Institute of Internet, Broadcasting and Communication*, vol. 18, no. 4, 2018, pp. 97-104.
- [11] B. Jin, X. Xu and T. Zhang, "Robust Time-Difference-of-Arrival(TDOA) Localization Using Weighted Least Squares with Cone Tangent Plane Constraint," *Sensors*, vol. 18, no. 3, Mar. 2018, p. 778.
- [12] S. Pradhan and S. Hwang, "A TOA Shortest Distance Algorithm for Estimating Mobile Location," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 8, no. 12, Dec. 2013, pp. 1883-1890.

저자 소개

전슬비 (Seul-Bi Jeon)



2021년 조선대학교 전자공학과 졸업(공학사)

2021년 ~ 현재 조선대학교 대학원 전자공학과 석사과정

※ 관심분야: 적응신호처리, 위치추정, 무선통신

황석승 (Suk-Seung Hwang)



1997년 광운대학교 제어계측학과 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