

Range-LIL: RF beamforming 무선충전을 위한 저지연 실내위치인식 기법

김창현*, 김동완**

Range-LIL: Low Latency Indoor Localization Method for RF Beamforming based on Wireless Power Transmission

Changhyun Kim*, Dongwan Kim**

본 논문은 교육부 재원으로 한국연구재단 지원을 받아 수행된 연구임.(NRF-2017R1C1B5074839)

요 약

원거리 무선충전을 위해 RF 빔포밍 무선충전방식이 연구되고 있다. 하지만, RF 빔포밍 무선충전방식은 IoT 디바이스 위치정보를 기반으로 동작하므로, 위치인식을 위한 연산시간이 소요된다. 이는 IoT 디바이스가 이동성을 가질 경우 에너지 효율 문제를 가진다. 본 논문에서는 무선충전을 위한 저지연 실내위치인식 기법을 제안한다. 제안기법은 단일 Access Point(AP)를 사용하여 IoT 디바이스가 위치할 수 있는 최대지점, 최소지점을 파악하여, 두 지점의 사이를 IoT 디바이스가 위치할 수 있는 영역으로 인식한다. 기존기법대비 FLOPs가 약 50% 감소하여 위치인식 소요시간이 줄었다. 또한, 시뮬레이션을 통해 디바이스가 1m/s로 움직이는 환경에서, 제안기법을 활용한 위치인식 시 RF 빔포밍 무선충전 가능 확률이 기존기법 대비 20.4%증가함을 증명하였다.

Abstract

The RF beamforming WPT(Wireless Power Transmission) method is being researched for far-field WPT. The WPT based on the location of the IoT device, so it takes time to calculate for indoor localization. This method has a WPT efficiency problem when the IoT device has mobility. In this paper, we proposed a low latency indoor localization scheme for RF beamforming WPT. The proposed scheme uses a single access point to find the maximum and minimum points that IoT devices can be located. We defined that IoT devices can be located between the maximum and minimum points. By removing AoD(Arrival of Departure) method for indoor localization, FLOPs(Floating point Operations Per second) is reduced about 50%, which reducing indoor localization time. We proved that the probability of RF beamforming WPT using the proposed scheme increase by 20.4% in an environment where the device moves at 1m/s.

Keywords

wireless power transfer(WPT), beamforming, indoor localization, low latency

* 동아대학교 전자공학과 석사과정
- ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8053-1009>
** 동아대학교 전자공학과 교수(교신저자)
- ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2779-9858>

• Received: Dec. 04. 2020, Revised: Jan. 17, 2021, Accepted: Jan. 20, 2021
• Corresponding Author: Dongwan Kim
Dept. of Electronic Engineering Dona-A University Korea.
Tel.: +82-51-200-7708, Email: dongwankim@dau.ac.kr

1. 서 론

유비쿼터스 시대에 도래하여 IoT(Internet of Things) 디바이스를 활용하여 시간과 장소에 구애받지 않고 정보통신망에 접속 가능하여, 실내내비게이션, 헬스케어 및 웹서핑 등 다양한 서비스를 사용할 수 있다. 하지만, 배터리를 사용하는 IoT 디바이스의 경우 배터리 용량에 따른 운용시간에 대한 한계가 존재한다. 이를 해결하기 위해, IoT 디바이스를 시간과 장소에 구애받지 않고 장기적으로 운용 가능케 하기 위한 무선충전 기술에 관심이 증가하고 있다. 무선충전에는 자기유도, 자기공진 및 RF(Radio Frequency) 등 다양한 방법이 있다[1][2]. 자기유도, 자기공진, RF 방식은 최대 수십 cm 까지 무선충전이 가능하여 자택, 연구실 및 가게 등과 같이 수 m 공간을 가지는 실내 공간에 적용하기에는 적합하지 않다[3][4]. 이를 해결하기 위해 수m의 충전거리를 가지는 RF 빔포밍 무선충전방식이 제안되었고, 이는 다중 어레이 안테나를 사용하여 특정 방향에 전력을 집중시키는 방식이다[5][6].

RF 빔포밍 무선충전방식은 그림 1에서 도시한 바와 같이 빔에 방향성을 부여하며, 빔방향에 따라 충전 가능 영역(PR, Positive Range), 충전 불가능 영역(NR, Negative Range)으로 나눌 수 있다. 즉, RF 빔포밍 무선충전방식으로 IoT 디바이스가 위치한 곳을 PR영역으로 만들어 충전하기 위해 IoT 디바이스 위치가 필수적으로 요구된다.

위치인식을 함에 있어 위치인식 소요시간, 정확도 및 가용 AP(Access Point) 수 등이 고려되고 있다. 기존 위치인식 방법은 위치인식 정확도 및 가용 AP수를 중점으로 다룬다. 기존 위치인식 방법에는 삼변측량[7]-[9], Fingerprint[10][11] 및 AoA(Arrival of Angle)[12]-[17] 등의 방법이 있다.

삼변측량기법과 Fingerprint는 다수 AP를 사용한다. 다수 AP를 사용하는 방식은 각 AP 간 통신이 이루어져야 하므로, 위치인식을 위한 통신 횟수 증가를 초래하여 위치인식에 대한 시간이 증가한다. 또한, 다수 AP 간 좌표가 공유되어야 하므로 위치인식 시 좌표 공유 시간으로 인한 위치인식시간이 증가된다. 이를 해결하기 위해 AoA를 활용한 위치

인식 방법 중 AoD(Arrival of Departure)와 함께 활용하여 단일 AP를 사용하는 위치인식 기법이 있다. AP간 좌표 공유로 인한 위치인식 소요시간은 줄었으나, AoD는 AoA와 다르게 다수 번의 신호전송이 필요하여, 위치인식 소요시간을 증가시킨다.

RF 빔포밍 무선충전 시 IoT 디바이스가 이동성을 가질 경우, 위치인식 소요시간은 중요한 요소이다. 예로, 위치인식에 소요되는 시간보다 IoT 디바이스가 이동하여 PR영역을 벗어나는 시간이 짧을 시, IoT 디바이스가 PR영역 내에 존재하지 않아 충전이 불가능하다. IoT 디바이스의 이동성을 보장하며, RF 빔포밍 무선충전이 가능하기 위해서는 위치인식 소요시간을 줄여야한다.

본 논문에서는 무선충전을 위한 저지연 위치인식 방법 Range-LIL을 제안한다. Range-LIL은 단일 AP를 사용하며, 다중경로의 거리 및 각도 정보를 활용한다. 다중경로 정보는 MUSIC(Multiple Signal Classification)을 통해 ToF(Time of Flight), AoA를 추출하며, 해당 정보를 활용하여 Range-LIL 기법을 통해 디바이스가 위치 할 수 있는 영역을 산출한다. 제안기법은 단일 AP를 사용하여 통신 횟수, AP좌표 공유로 인한 위치인식 소요시간을 줄였으며, AoD 기법을 제거함으로써 위치인식 소요시간을 더욱 줄였다. 이는 표 1을 통해 기존 기법과 비교하였다. 이로 인해 위치인식 정확도가 감소했으나, RF 빔포밍 무선충전 시 큰 영향을 주지 않는다. 빔폭만큼의 오차는 RF 빔포밍 무선충전을 위한 위치인식 정확도 측면에서 고려하지 않아도 무방하다.

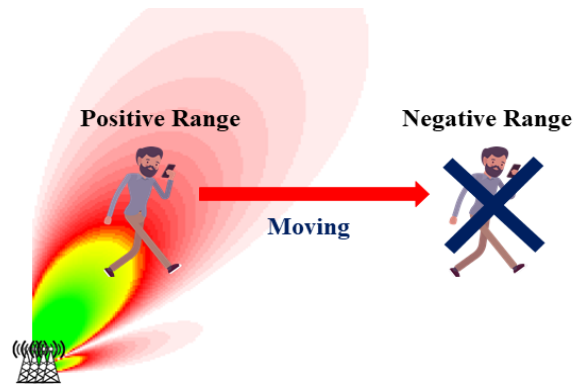


그림 1. RF 빔포밍 WPT의 충전 가능 영역
Fig. 1. Charging range of RF beamforming WPT

표 1. 제안기법, 기존기법의 Multi Access Point 사용유무, AP 좌표 공유 유무 및 AoD기법 사용 유무 비교 표
Table 1. Comparison of Range-LIL and another localization system, Range-LIL is the only single access point solution that requires no coordination and removed AoD

	Underlying method	Multi access point	No coordination	Using AoD
SpotFi[12]	Triangulation	O	X	X
CUPID[16]	Angle of the direct path	X	X	X
MonoLoco [17]	Multipath triangulation	X	O	O
Range-LIL	Multipath range	X	O	X

본 논문구성은 다음과 같다. 2장에서는 실내위치 인식을 위한 기존 연구기법 중 다수 AP를 사용한 방법, 단일 AP를 사용한 방법과 위치인식 시간에 대해 간략히 설명한다. 3장에서는 디바이스가 위치한 영역을 인식하기 위해 다중경로를 활용한 Range-LIL의 알고리즘에 대해 설명한다. 4장에서는 기존 기법과 제안기법의 위치인식 정확도 및 알고리즘 속도를 비교분석하며, 마지막으로 분석 결과 및 제안기법을 활용한 향후 방향을 제시하며 마친다.

II. 관련연구

RF 빔포밍 무선충전은 IoT 디바이스 위치를 기반으로 동작하므로, IoT 디바이스 위치인식 과정이 필수적으로 선행되어야 한다. 위치인식 기법은 다수 AP를 사용한 경우, 단일 AP를 사용한 경우, 또는 ToA(Time of Arrival), RSSI(Received Signal Strength Indication), MUSIC, AoD 등 다양한 기술 기반으로 위치인식 기법을 정리할 수 있다. 또한, 위치인식 함에 있어, 위치인식 정확도, 소요시간 및 가용 AP 수 등이 고려 되어야한다. 본 장에서는 기준에 따른 위치인식방법에 대해 기술한다.

위치인식에 있어 가장 대표적인 방법은 삼변측량법이다[7]-[9]. 삼변측량법은 디바이스 위치를 추정하기 위해 ToA, RSSI 및 ToF 등을 이용하여 다수 AP와 디바이스 간 거리를 추정한다. 각 AP가 중점

이 되고 각 AP와 디바이스 간 거리를 반지름으로 하는 원들의 교점을 디바이스가 위치한 지점이라 하며, 한 지점을 산출하기 위해서는 최소 3개 이상의 AP가 필수적이다. 삼변측량을 위해 다수 AP간 좌표가 공유되어야 하므로, 위치인식 소요시간이 증가를 초래한다. Fingerprint방식은 다수 AP와 디바이스 간 RSSI 값 또는 CSI(Channel State Information) 값을 LUT(Look Up Table)에 저장하고 이를 활용하여 디바이스 위치를 산출하는 방법이다[10][11]. Fingerprint방식은 LUT 형성을 위해 사전작업이 필수적으로 진행되어야 하며, 공간을 그리드 형태로 나누어 각 셀 마다 다수 AP에서 디바이스에 수신된 RSSI, CSI값을 저장한다. 실제 수신된 RSSI, CSI 값을 LUT에 저장된 값을 비교하여 디바이스의 위치를 산출하는 방식이다. Fingerprint 방법은 AP의 이동 및 환경변화에 따라 사전작업이 필수적으로 진행됨으로 인한 번거로움이 존재한다. [12]는 다수 AP를 사용하고, MUSIC 알고리즘을 활용하여 AP와 디바이스 간 AoA를 추출하며, 다수 AP에서 AoA의 연장선들의 교점을 디바이스의 위치라 한다. [12]는 삼변측량기법과 같이 다수 AP 좌표가 공유되어야 하므로, 위치인식 소요시간 증가를 초래한다.

다수 AP사용으로 인한 문제를 해결하기 위해 단일 AP를 사용하여 위치인식 하는 연구가 진행되고 있다[15]-[17]. 단일 AP를 사용한 경우 AP간 좌표 공유가 불필요하여 위치인식 소요시간이 감소된다. [16]은 단일 AP를 사용하며 MUSIC 알고리즘을 통해 직접파 AoA를 추출하고, RSSI를 통해 AP와 디바이스간 거리를 추출하여 디바이스 위치를 인식한다. [16]은 직접파와 다중경로 판별이 힘들고, RSSI는 환경에 영향을 많이 받아 정확도가 떨어진다. [17]은 단일 AP를 사용하며, MUSIC을 활용하여 디바이스에서 AP로 수신되는 직접파와 다중경로의 AoA, ToF정보를 구하며, AoD를 통해 디바이스가 단일 AP와 이루는 각도와 다중경로가 반사되는 지점과 이루는 각도를 추출한다.

그림 2는 [17]방식의 기본적인 설명을 위해 나타낸 그림이다. (θ_1, φ_1) 은 직접파로 인해 추출된 AoA, AoD이며, (θ_2, φ_2) 는 다중경로로 인해 추출된 AoA, AoD값이다.

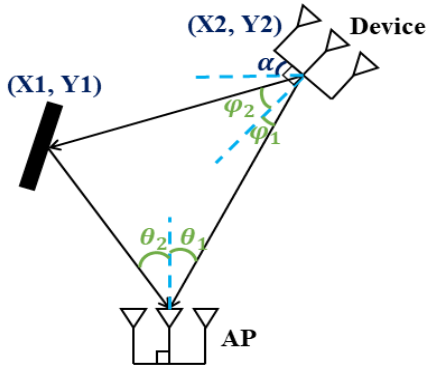


그림 2. AoD, AoA를 사용한 MonoLoco
Fig. 2. MonoLoco method using AoD, AoA

디바이스 위치는 AP를 기준으로 산출 가능하며, 다중경로가 반사된 지점을 $(X1, Y1)$, 디바이스가 위치한 지점을 $(X2, Y2)$ 라 정의하여 정의된 2개 지점과 AP와의 관계를 삼각형 형태로 나타낸다. 이 때, AoA와 AoD로 얻어진 각도, 직접파와 다중경로 간 ToF차이를 활용하여 [17]을 통해 디바이스 위치 $(X2, Y2)$ 를 산출한다. 단일 AP 사용으로 인해 AP 좌표 공유로 인한 위치인식 소요시간이 불필요하여 위치인식 소요시간을 줄일 수 있다. 하지만, AoD 기술은 1번의 통신으로 결과를 낼 수 있는 AoA와 다르게 다수 번의 통신이 이루어져야 한다. 또한, [17]은 AP와 디바이스간 거리가 멀어질 경우, 3개 지점을 정의하기 위한 시행횟수 증가를 초래한다. 그 결과, AoD 기법 사용과 공간크기에 따라 위치인식 소요시간이 증가한다. 결과적으로 삼변측량법, Fingerprint방법은 다수 AP사용으로 인한 위치인식 소요시간 증가를 초래하고, [17]은 AoD 사용으로 인한 위치인식 소요시간을 증가시켜 RF 빔포밍 무선충전을 위한 위치인식 기법으로는 적합하지 않다. 본 논문에서는 이를 해결하기 위해 단일 AP를 사용하며, AoD 기술을 제거한 저지연 위치인식 기법 Range-LIL을 제안한다.

III. 제안 기법

제안기법은 단일 AP를 사용하며, OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing)을 기반으로 각 수신 안테나 별 30개의 부반송파 CSI를 추출한다. 추출한 CSI를 활용하여 직접파와 다중경로 AoA, ToF를 추출하고, 이를 활용하여 IoT 디바이스가 위치할 수

있는 영역을 인식한다. 본 장에서는 다중경로 AoA, ToF 정보를 계산하는 방법을 설명하고, 직접파 및 다중경로 정보를 통해 디바이스가 위치할 수 있는 영역을 추론 할 수 있는 알고리즘을 설명한다.

3.1 AoA, ToF

Range-LIL은 단일 AP와 디바이스 간 직접파 및 다중경로의 AoA와 ToF를 계산 할 수 있는 2D-MUSIC을 통해 추출한다. 추출된 직접파 및 다중경로의 AoA, ToF를 활용하여 디바이스가 위치하는 영역을 추론한다. Range-LIL은 단일 AP를 사용하고 OFDM방식 활용을 통해 각 안테나는 30개 부반송파의 CSI를 추출 할 수 있다. 이는 식 (1)을 통해 나타낸다.

$$Y = HX + n \tag{1}$$

여기서, Y는 수신 데이터, X는 전송 데이터, H는 CSI를 의미하며 n은 노이즈를 의미한다. 각 안테나에서 추출한 90개의 CSI 데이터를 활용하여 AoA 대표적 방법인 MUSIC 알고리즘을 통해 직접파 및 다중경로 각도를 구한다.

3.1.1 MUSIC 알고리즘

MUSIC 알고리즘은 AoA을 위한 대표적 기술이다. MUSIC은 직접파 AoA뿐만 아니라, 다중경로 AoA도 구할 수 있다[18]. Range-LIL은 단일 AP를 사용하며, 단일 AP에 포함된 수신안테나는 3개이다. 수신안테나는 그림 3에 도시한바와 같이 ULA(Uniformed Linear Array)형태를 가지며 일정한 간격으로 배치되어 있다.

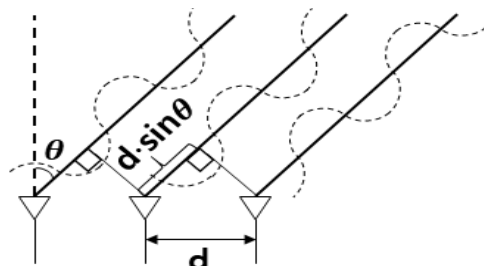


그림 3. 1x3 선형 배열 안테나
Fig. 3. 1x3 uniformed linear array antenna

여기서, θ 는 디바이스가 단일 AP로부터 이루어진 각도, d 는 안테나 간 거리, $d \cdot \sin\theta$ 는 안테나 간 거리로 차이로 생긴 수신신호의 거리차이를 의미한다. Range-LIL은 다중경로는 직접파를 포함하여 k 개의 경로가 있음을 가정하며, 각 안테나는 가장 왼쪽의 안테나를 기준으로 $-2\pi \cdot d \cdot \sin\theta \cdot \lambda$ 만큼 위상 차이를 가진다. 이를 식 (2)와 같이 Φ 라 정의한다.

$$\Phi(\theta_k) = e^{-j2\pi \times d \times \sin(\theta_k) \times \lambda^{-1}} \quad (2)$$

여기서, λ 은 신호 파장, θ_k 는 직접파, 다중경로 각도를 의미한다. 디바이스와 각 안테나 간 거리 차이로 인하여 생긴 수신신호의 위상 차이를 활용하며 이를 Steering 벡터라 부른다. Steering 벡터는 식 (3)과 같다.

$$\vec{a}(\theta_k) = [1, \Phi(\theta_k), \dots, \Phi(\theta_k)^{(M-1)}] \quad (3)$$

여기서, M 은 안테나 수를 의미한다. 본 장에서 활용한 데이터는 OFDM 방식을 활용하여 3개 안테나가 각 30개의 부반송파 CSI 데이터를 가진다. CSI는 행렬형태로 나타내며, 이를 CSI matrix라 칭한다.

$$\text{CSI matrix} = \begin{bmatrix} \text{csi}_{1,1} & \text{csi}_{1,2} & \dots & \text{csi}_{1,30} \\ \text{csi}_{2,1} & \text{csi}_{2,2} & \dots & \text{csi}_{2,30} \\ \text{csi}_{3,1} & \text{csi}_{3,2} & \dots & \text{csi}_{3,30} \end{bmatrix} \quad (4)$$

MUSIC 알고리즘은 AoA추정을 위해 CSI matrix의 상관관계 행렬의 고유값, 고유벡터를 활용한다. CSI matrix를 R_x 라 칭할 때, R_x 의 상관관계를 구하며, 이는 식 (5)와 같다.

$$R_{x,x} = E[R_x R_x^H] \quad (5)$$

여기서, H 는 Hermitian을 의미하며, E 는 평균을 의미한다. 이를 활용하여 직접파, 다중경로의 AoA를 구한다.

$$P_M(\theta_k) = \frac{1}{\vec{a}^H(\theta_k) E_N E_N^H \vec{a}(\theta_k)} \quad (6)$$

여기서, E_N 은 $R_{x,x}$ 에서 가장 작은 고유값을 가지는 $R_{x,x}$ 의 고유벡터 열을 나타내며, 이를 Noise 영역이라 부른다. 직접파와 다중경로를 통해 수신 신호를 바탕으로 산출된 E_N 와 Steering 벡터가 수직 할 때 Peak가 형성되며, 각도에 따라 Peak가 형성된 부분을 다중경로, 직접파 각도라 한다.

3.1.2 2D-MUSIC 알고리즘

MUSIC 알고리즘은 AoA정보만 추출할 수 있었지만, 2D-MUSIC 알고리즘은 ToF정보 또한 추출할 수 있다. MUSIC 알고리즘은 수신안테나 간 거리에 따른 수신신호의 위상 차이를 활용했다. 추가적으로 2D-MUSIC 알고리즘은 안테나에 수신된 30개 부반송파 위상 차이를 활용한다. 이에 따라, Steering 벡터는 부반송파 간 위상 차이를 나타내는 $\Omega(\tau_k)$ 를 추가적으로 사용한다. $\Omega(\tau_k)$ 는 식 (7)로 나타낸다.

$$\Omega(\tau_k) = e^{-j2\pi \times f_\delta \times \tau_k} \quad (7)$$

여기서, f_δ 는 서브캐리어간 주파수 간격을 의미하며, τ_k 는 ToF로 인한 시간차이를 의미한다. 이를 활용하여 steering 벡터는 식 (8)과 같이 정의한다.

$$\vec{a}(\theta_k, \tau_k) = [1, \Omega_\tau^1, \dots, \Omega_\tau^{N-1}, \Phi_\theta, \Omega_\tau^1 \Phi_\theta, \dots, \Omega_\tau^{N-1} \Phi_\theta, \Phi_\theta^{M-1}, \Omega_\tau^1 \Phi_\theta^{M-1}, \dots, \Omega_\tau^{N-1} \Phi_\theta^{M-1}] \quad (8)$$

여기서, N 은 서브캐리어 수를 의미하며 간략하게 표기하기 위해 $\Omega(\tau)$ 는 Ω_τ 로 $\Phi(\theta)$ 는 Φ_θ 으로 표기하였다. 2D-MUSIC 알고리즘의 CSI matrix는 1x90 형태로 나타내며 식 (9)와 같다.

$$\text{CSI matrix} = [\text{csi}_{1,1}, \dots, \text{csi}_{1,30}, \text{csi}_{2,1}, \dots, \text{csi}_{2,30}, \text{csi}_{3,1}, \dots, \text{csi}_{3,30}] \quad (9)$$

식 (8)와 식 (9)를 사용하여 2D-MUSIC 알고리즘을 통해 AoA와 ToF를 측정할 수 있다. Steering 벡터는 1x90, 자기상관 matrix는 90x90으로 구성되어 연산시간 및 복잡성 문제로 인해 위치인식 소요시간을 증가시킬 수 있다. 이를 해결하기 위해 본 장

에서는 CSI matrix 데이터를 Smoothing하여 연산시간을 줄인 2D-MUSIC 알고리즘을 통해 AoA와 ToF를 측정하고자 한다[12]. Smoothing은 서버레이를 활용하는 기법으로 CSI matrix를 그림 4와 같이 30x30로 변형된다. 또한, Steering 벡터는 Smoothing CSI matrix에 맞추어 다음과 같이 변형된다. 이는 식 (10)으로 정의 된다.

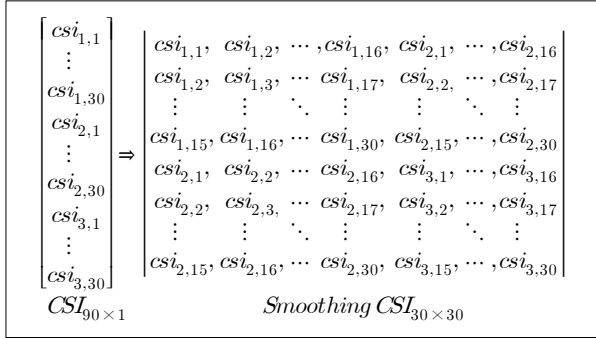


그림 4. Smoothing CSI 매트릭스
Fig. 4. Smoothing CSI matrix

$$\vec{a}(\theta_k, \tau_k) = \left[1, \Omega_\tau^1, \dots, \Omega_\tau^{\frac{N}{2}}, \Phi_\theta, \Phi_\theta, \Omega_\tau^1, \dots, \Omega_\tau^{\frac{N}{2}}, \Phi_\theta \right] \quad (10)$$

Smoothing CSI matrix를 활용하여 MUSIC 알고리즘과 동일하게 진행한다. 그 결과, 식 (11)을 통해 직접파와 다중경로의 AoA, ToF를 구할 수 있다.

$$P_M(\theta_k, \tau_k) = \frac{1}{\vec{a}^H(\theta_k, \tau_k) E_N E_N^H \vec{a}(\theta_k, \tau_k)} \quad (11)$$

3.2 Range-LIL 알고리즘

Range-LIL은 직접파와, 다중경로가 존재하는 환

경에서 단일 AP와 IoT 디바이스 간 직접파, 다중경로의 AoA, ToF를 활용하여 IoT 디바이스가 위치할 수 있는 영역을 인식한다. 2D-MUSIC 알고리즘을 통해 추출된 결과에서 직접파와 다중경로 정보 선별방법은 2D-MUSIC를 사용하여 다중경로 정보 AoA, ToF를 2D로 나타내었을 때, 가장 응집력이 강한 곳을 직접파라 정의한다. 2D-MUSIC을 사용하여 추출된 AoA, ToF는 각도 및 거리라 칭하며, ToF는 식 (12)을 통해 거리로 변환된다.

$$D_i = c \times \tau_i, (i = 1, 2, \dots, k) \quad (12)$$

여기서, c 는 빛의 속도를 의미한다. 위 방식을 통해 단일 AP와 디바이스 간 모든 경로에 대한 각도 및 거리 정보를 추출하였다. 직접파 각도에 대한 가상의 선과 다중경로의 정보를 활용하여 그림 5에서 도시한 바와 같은 순서로 디바이스가 위치할 수 있는 영역을 인식한다.

그림 5의 Step1은 다중경로 환경을 도시한 그림이다. 여기서, θ_d 는 직접파 각도, D_d 는 직접파 거리, $\theta_{A,i}$ 는 다중경로 각도, D_k 는 다중경로 거리를 의미하며, k 는 다중경로 개수를 나타낸다. 여기서, Step1에서 도시한 점선을 기준으로 위쪽을 양, 밑쪽을 음을 가지는 각이라 했을 때, $\theta_{D,i}$ 는 다중경로와 직접파 사이 각을 의미하며 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\theta_{D,i} \begin{cases} \theta_d - \theta_{A,i} (\theta_d > \theta_{A,i}), (i = 1, 2, \dots, k) \\ \theta_{A,i} - \theta_d (\theta_{A,i} > \theta_d), (\frac{\pi}{2} > \theta_{D,i} > -\frac{\pi}{2}) \end{cases}$$

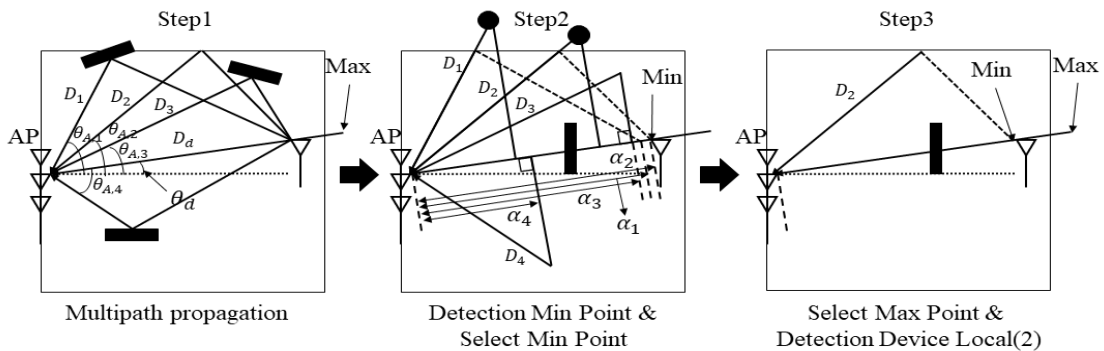


그림 5. Range-LIL 알고리즘 순서도
Fig. 5. Step of Range-LIL algorithm

IoT 디바이스가 위치할 수 있는 최대 지점은 직 접파의 AoA, ToF 정보를 활용하여 구한다. IoT 디 바이스의 Max point는 (x_d, y_d) 로 나타낼 수 있고, 이는 $(D_d \times \cos(\theta_d), D_d \times \sin(\theta_d))$ 로 정의된다. Step2은 디바이스가 위치할 수 있는 최소 지점을 도출 하는 순서이다. Step2에서 도시된 다중경로의 각도 및 거리를 활용하여 만들어진 직각삼각형에서 AP 와 직각부분 좌표 간 거리를 α_i 라 했을 때, 직각부 분의 좌표를 도출 할 수 있다. 해당 좌표는 $(\alpha_i \times \cos(\theta_d), \alpha_i \times \sin(\theta_d))$ 이며, $(x_{a,i}, y_{a,i})$ 라 정 의된다. α_i 는 식 (13)으로부터 구할 수 있다.

$$\alpha_i = \frac{\cos(\theta_{D,i}) \times D_i}{1 + \sin(\theta_{D,i})}, (i = 1, 2, \dots, k) \quad (13)$$

Step2에 도시한바와 같이 직각삼각형을 구성하는 좌표 중 최고, 최저에 위치한 좌표가 설정 공간에서 벗어난 경우, 해당 다중경로의 $(x_{a,i}, y_{a,i})$ 는 새롭게 정의된다. 새롭게 정의하기 위한 다중경로는 Step2 에서 검은색 점으로 표시된 경로이며, Step3에서 도 시한 바와 같이 해당 경로는 설정 공간 벽에 반사 되어 수신되었다고 가정한다. 새롭게 정의한 다중경 로의 $(x_{a,i}, y_{a,i})$ 는 $(\beta_i \times \cos(\theta_d), \beta_i \times \sin(\theta_d))$ 로 새롭게 정의되며, β_i 는 식 (14)를 통해 도출 할 수 있다.

$$d_{\beta,i} = \left\| \frac{S}{2 \tan(\theta_{A,i})}, \frac{S}{2} \right\|_2, \quad (14)$$

$$\theta_{\beta,i} = \arcsin\left(\frac{d_{\beta,i} \times \sin(\theta_{D,i})}{D_i - d_{\beta,i}}\right), (i = 1, 2, \dots, k)$$

$$\beta_i = d_{\beta,i} \times \cos(\theta_{D,i}) + (D_i - d_{\beta,i}) \times \cos(\theta_{\beta,i})$$

여기서, S 는 설정 공간 크기, $d_{\beta,i}$ 는 AP와 설정 공 간의 벽에 반사된 지점 간 거리. $\theta_{\beta,i}$ 는 설정 공간 벽에 반사된 지점과 IoT 디바이스를 연결한 직선과 직접과 각도에 대한 가상의 선 사이 각을 의미한다. 마지막으로 Step3에서 Step2에서 정의된 $(x_{a,i}, y_{a,i})$ 좌표를 활용하여 AP로부터 가장 먼 거리를 가지는 좌표를 디바이스가 위치할 수 있는 최소 지점

(x_{\min}, y_{\min}) 이라 정의한다.

$$(x_{\min}, y_{\min}) = \mathop{\text{max}} \left\| (x_{a,i} - x_{AP}), (y_{a,i} - y_{AP}) \right\|_2 \quad (15)$$

$$(i = 1, 2, \dots, k)$$

여기서, x_{AP}, y_{AP} 는 AP좌표를 의미하고 AP좌표와 (x_{\min}, y_{\min}) 좌표의 거리를 D_{\min} 이라 정의한다. 제 안방식을 통해 (x_{\min}, y_{\min}) 와 (x_d, y_d) 를 구했으며, (x_{\min}, y_{\min}) 와 (x_d, y_d) 사이 영역을 IoT 디바이스가 위치할 수 있는 영역이라 정의한다.

IV. 실험 및 평가

본 장에서는, [17]과 Matlab 시뮬레이션을 통해 기존기법과 제안기법 간 정확도와 위치인식 소요시 간 차이를 나타내고, IoT 디바이스의 정지 상태와 움직임 상태에 따라 위치인식 시간을 고려했을 때 RF 빔포밍 무선충전 가능 비율에 대해 검증하였다. 시뮬레이션을 위한 공간은 $8m \times 4m$ 로 가정하며 AP 위치는 $(0m, 4m)$ 라 한다. 단일 다중경로가 존재함을 가정하며, 단일 다중경로가 반사되는 지점 및 IoT 디바이스 위치는 랜덤하게 설정한다. 그림 6은 시뮬 레이션 환경을 나타낸다.

OFDM 신호 사용하는 통신 데이터를 만들었으 며, 신호 전송 시 중심주파수는 5.32GHz, 대역폭은 40MHz, 부반송파 간 간격은 312.5KHz를 가지며, 시뮬레이션 시 사용한 Packet 수는 10개이다. MUSIC 알고리즘 동작 시 각도는 1도 기준, 거리는 10cm 기준으로 나타내었다. 시뮬레이션에 사용된 파라미 터는 표 2와 같다.

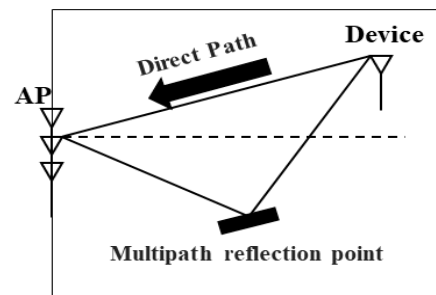


그림 6. 시뮬레이션 환경
Fig. 6. Simulation environment

표 2. OFDM 파라미터
Table 2. OFDM parameter

Parameter	Value
Bandwidth	40MHz
Number of subcarriers	30
AoA range	-90 to +90 degree
AoA steps	181
ToF range	0 to 33.3ns
ToF steps	101

제안기법과 기존기법의 위치 인식 정확성을 측정하기 위해 랜덤으로 배치된 IoT 디바이스 위치와 제안, 기존기법들을 통해 산출된 위치 오차를 구한다. 그리고 OFDM 신호 구현 시간, Packet 전송시간 및 알고리즘 동작시간 등을 고려하여 Code 복잡도에 따라 위치인식 시 소요되는 전체 시간을 비교한다. 마지막으로 RF 빔포밍 무선충전 시 위치인식 결과 좌표에서 AP를 바라보는 방향에 수직이 되는 직선 상 해당 좌표를 중심으로 좌우로 0.5m의 빔폭을 가지며, AP와 좌표의 2배 거리만큼의 빔을 가지는 빔을 형성한다. 이 때, 시행횟수 대비 랜덤으로 배치된 디바이스의 실제 위치에서 무선충전 가능여부에 대한 확률을 나타낸다. 또한, 랜덤으로 배치된 실제 위치에서 알고리즘 동작 시간 동안 IoT 디바이스의 이동성을 고려하여 속도별 무선충전 여부에 대한 확률을 보인다.

Range-LIL은 최소지점과 최대지점의 평균 좌표를 설정하므로, 기존기법 대비 정확성이 감소할 것을 예상하였으며, 그림 7에서 도시한 바와 같이 시뮬레이션을 통해 위치인식 정확성이 평균 1m 정도 낮은 것을 확인하였다.

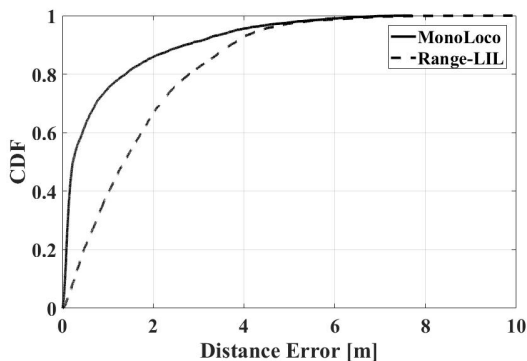


그림 7. 위치오차 CDF
Fig. 7. CDF of location error

Packet 수는 위치인식 소요시간에 큰 영향을 미친다. Packet 수가 증가함에 따라 연산 복잡성 증가로 인하여 위치인식 소요시간이 증가한다. 그림 8은 사용 Packet 수에 따른 Range-LIL의 위치인식 정확성을 나타낸다. 이를 통해, Packet 수가 증가함에 따라 위치인식 정확도가 증가함을 보였다.

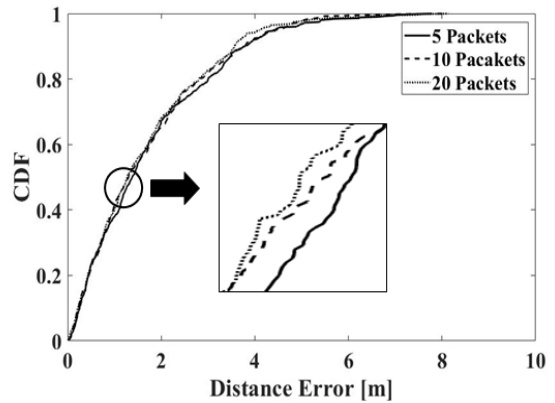


그림 8. Packet 수에 따른 위치오차
Fig. 8. Distance error for 5,10 and 20 packets

표 3은 기존기법과 제안기법의 위치인식 소요시간을 비교한 표이다. 시뮬레이션에서 총 10개의 Packet을 사용하였으며, OFDM 신호 형성 시간, Packet 전달 시간, 알고리즘 연산시간 등을 총 종합해서 평가하였다.

표 3. 두 기법 간 FLOPs 비교
Table 3. Comparison of FLOPs between methods

	MonoLoco	Range-LIL
FLOPs(x10^9)	2.099	1.049
time(s)	1.63	0.8

표 4는 IoT 디바이스가 1m/s 속도를 가졌을 때, 기법 간 위치인식을 통해 도출된 좌표로 RF 빔포밍 무선충전 시 IoT 디바이스가 PR에 속할 확률을 구하였다. 그 결과, 기존기법 대비 제안기법의 PR 확률이 높았다. IoT 디바이스 속도에 따라 기법 간 위치인식을 통해 도출된 좌표로 RF 빔포밍 무선충전 시 IoT 디바이스가 PR에 속할 확률을 구하였다. x축은 IoT 디바이스의 속도를 0~2m/s까지 0.1m/s 간격으로 표시 하였으며, y축은 시행횟수 대비 PR에 속할 확률을 나타낸다.

표 4. 1m/s 속도에서 기법 간 PR 비율 비교

Table 4. Comparison of the ratio of PR between methods at 1m/s

	MonoLoco	Range-LIL
Ratio of PR	14.2%	34.6%

기존기법 대비 제안기법이 앞서 도시한 그림 7을 통해 정확성이 낮음을 보였으나, IoT 디바이스 속도에 따른 시행횟수 대비 PR에 속할 확률은 제안기법이 전체적으로 높은 것을 그림 9를 통해 볼 수 있다. 따라서 RF 빔포밍 무선충전 시 IoT 디바이스의 이동성을 고려한 경우 제안기법이 우수함을 보였다.

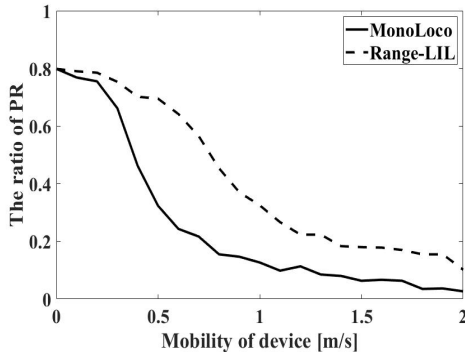


그림 9. IoT 디바이스의 이동성에 따른 PR 비율

Fig. 9. Ratio of PR according to mobility of IoT device

Algorithm Pseudo code : Low-Latency Indoor Localization Method

$\theta_{A,i}$: AoA of multipaths
 D_i : Distance of multipaths
 D_d : Distance of direct path
 θ_d : Angle of direct path
 $\theta_{D,i}$: Difference angle between $\theta_{A,k}$ and θ_d
 $d_{\beta,i}$: Distance between AP and the end of the wall when a line with $\theta_{A,i}$ is drawn from AP
 $\theta_{\beta,i}$: Angle between a line with $\theta_{A,i}$ and a line with $D_i - d_{\beta,i}$ distance between the end point of $d_{\beta,i}$ and point on the line with a angle of $\theta_{A,i}$
 k : The number of multipath
 S : The virtual space size
 x_{AP}, y_{AP} : The AP's location

1. Find angle and distance of multipath is calculated by 2D-MUSIC at multipath propagation and find max point using angle and distance of direct path.

Step 1

Calculate $\theta_{A,i}, D_i$ using 2D-MUSIC algorithm
 $(i = 1, 2, \dots, k)$

Step 2

Calculate $\theta_{D,i}$

$$\theta_{D,i} \begin{cases} \theta_d - \theta_{A,i} (\theta_d > \theta_{A,i}), (i = 1, 2, \dots, k) \\ \theta_{A,i} - \theta_d (\theta_{A,i} > \theta_d), (\frac{\pi}{2} > \theta_{D,i} > -\frac{\pi}{2}) \end{cases}$$

Step 3

Find max point
 $(x_{\max}, y_{\max}) = (D_d \times \cos(\theta_d), D_d \times \sin(\theta_d))$

2. Distance between the point of right triangles and AP are compared to detect min point of the device location

Step 4

Using right triangles find min point $(x_{a,i}, y_{a,i})$

$$\alpha_i = \frac{\cos(\theta_{D,i}) \times D_i}{1 + \sin(\theta_{D,i})}, (i = 1, 2, \dots, k)$$

If $\alpha_i \times \cos(\theta_{A,i}) > \frac{S}{2}$

$$d_{\beta,i} = \left\| \frac{S}{2 \tan(\theta_{A,i})}, \frac{S}{2} \right\|_2,$$

$$\theta_{\beta,i} = \arcsin \left(\frac{d_{\beta,i} \times \sin(\theta_{D,i})}{D_i - d_{\beta,i}} \right), (i = 1, 2, \dots, k)$$

$$\beta_i = d_{\beta,i} \times \cos(\theta_{D,i}) + (D_i - d_{\beta,i}) \times \cos(\theta_{\beta,i})$$

$$x_{a,i} = \beta_i \times \cos(\theta_d), y_{a,i} = \beta_i \times \sin(\theta_d)$$

Else

$$x_{a,i} = \alpha_i \times \cos(\theta_d), y_{a,i} = \alpha_i \times \sin(\theta_d)$$

End

3. Select min point where devices can be located, thus find range where devices can be located

Step 4

Find min point where devices can be located
 $(x_{\min}, y_{\min}) = \min \| (x_{\alpha,i} - x_{AP}), (y_{\alpha,i} - y_{AP}) \|_2$
 $(i = 1, 2, \dots, k)$

Result

Devices can locate between (x_{\min}, y_{\min}) and (x_{\max}, y_{\max})

$$x_{device}, y_{device} = \left(\frac{x_{\max} - x_{\min}}{2}, \frac{y_{\max} - y_{\min}}{2} \right)$$

그림 10. 제안기법 알고리즘 pseudo 코드

Fig. 10. Pseudo code of proposed scheme algorithm

V. 결 론

Range-LIL은 RF 빔포밍 무선충전을 위한 저지연 위치인식기법이다. Range-LIL은 IoT 디바이스가 위치할 수 있는 영역을 산출함으로써, 기존기법 대비 위치인식 정확도는 낮다. 하지만, 기존기법 MonoLoco에서 AoD 기술을 제거함으로써 연산의 복잡성을 감소시키고, AoD 제거에 따른 통신 횟수 감소를 통해 위치인식 소요시간을 줄였다. 이를 통해, IoT 디바이스가 0~2m/s 속도를 가질 때, RF 빔포밍 무선충전 시 시행횟수 대비 PR 확률은 Range-LIL이 기존기법 대비 높은 것을 증명하였다. 그 결과, Range-LIL은 RF 빔포밍 무선충전 시 IoT 디바이스의 이동성을 보장하기 위한 실내위치인식 기법으로 적합하다. 해당 기술은 위치인식 소요시간 감소로 인해 빈번하게 위치인식이 이루어져야 하는 다수의 IoT 디바이스가 이동하는 환경에서도 활용될 수 있다.

보다 높은 속도를 가지는 IoT 디바이스에 RF 빔포밍 무선충전 시 시행횟수 대비 PR 확률을 증가시키기 위해 위치인식 소요시간이 더욱 개선되어야 한다. 개선 방법은 MUSIC 알고리즘 속도 개선 또는, 위치인식 특화 임베디드 시스템 구축이 있다. 이를 통해, 동일 시간 대비 다수의 Packet을 사용함으로써 위치인식 정확성 증가를 시킬 수 있으며, RF 빔포밍 무선충전 시 시행횟수 대비 PR 확률을 증가시킬 수 있다.

References

[1] S. Y. Hui, "Planar wireless charging technology for portable electronic products and Qi", in Proc. IEEE, Vol. 101, No. 6, pp. 1290-1301, Jun. 2013.

[2] J. S. Hoa et al., "Wireless power transfer to deep-tissue microimplants", in Proc. Nat. Acad. Sci., Vol. 111, No. 22, pp. 7974-7979, Jun. 2014.

[3] J. Charthad, N. Dolatsha, A. Rekhi, and A. Arb-abian, "System-level analysis of far-field radio frequency power delivery for mm-sized

sensor nodes", IEEE Trans. Circuits Syst. I, Reg. Papers, Vol. 63, No. 2, pp. 300-311, Feb. 2016.

[4] V. Talla, B. Kellogg, B. Ransford, S. Naderiparizi, S. Gollakota, and J. R. Smith, "Powering the next billion devices with Wi-Fi", in Proc. 11th ACM Conf. Emerg. Netw. Experim. Technol., Heidelberg Germany, Article No. 4, 1-13, Dec. 2015.

[5] E. Visotsky and U. Madhow, "Optimal beamforming using transmit antenna arrays", in Proc. IEEE Veh. Technol. Conf. (VTC), Houston, TX, USA, Vol. 1, pp. 851-856, Jul. 1999.

[6] P. S. Yedavalli, T. Riihonen, X. Wang and J. M. Rabaey, "Far-field RF wireless power transfer with blind adaptive beamforming for Internet of Things devices", IEEE Access, Vol. 5, pp. 1743-1752, Mar. 2017.

[7] R. Javaid, R. Qureshi, and R. N. Enam, "RSSI based node localization using trilateration in wireless sensor network", Bahria University Journal of Information & Communication Technologies, Vol. 8, No. 2, pp. 58-64, Dec. 2015.

[8] H. Liu, H. Darabi, P. Banerjee, and J. Liu, "Survey of wireless indoor positioning techniques and systems", IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics-part c (applications and reviews), Vol. 37, No. 6, pp. 1067-1080, Nov. 2007.

[9] X. Fafoutis, E. Mellios, N. Twomey, T. Diethel, G. Hilton, and R. Piechocki, "An rssi-based wall prediction model for residential floor map construction", in 2015 IEEE 2nd World Forum on Internet of Things (WF-IoT), Milan, Italy, pp. 357-362, Dec. 2015.

[10] Suining He and S. H. Gary Chan, "Wi-Fi Fingerprint-Based Indoor Positioning: Recent Advances and Comparisons", IEEE Communications Surveys & Tutorials, Vol. 18, No. 1, pp. 466-490, First quarter. 2016.

[11] S. Lee, N. Lee, J. Ahn, J. Kim, B. Moon, S.

Jung, and D. Han, "Construction of an indoor positioning system for home iot applications", In 2017 IEEE International Conference on Communications (ICC), Paris, France, pp. 1-7, May 2017.

- [12] M. Kotaru, K. Joshi, D. Bharadia, and S. Katti, "SpotFi: Decimeter Level Localization Using WiFi", SIGCOMM '15: Proceedings of the 2015 ACM Conference on Special Interest Group on Data Communication, London, United Kingdom, pp. 269-282, Aug. 2015.
- [13] Z. Tian, Z. Li, M. Zhou, Y. Jin, and Z. Wu, "PILA: Sub-meter localization using CSI from commodity Wi-Fi devices", Sensors, Vol. 16, No. 10, pp. 1664, Oct. 2016.
- [14] A. U. Ahmed, R. Arablouei, F. de Hoog, B. Kusy, R. Jurdak, and N. Bergmann, "Estimating angle-of-arrival and time-of-flight for multipath components using wifi channel state information", Sensors, Vol. 18, No. 6, pp. 1753, May 2018.
- [15] D. Vasisht, S. Kumar, and D. Katabi, "Decimeter-level localization with a single WiFi access point", in Proc. Usenix Conf. Netw. Syst. Des. Implementation, Santa Clara, CA, USA, pp. 165-178, Mar. 2016.
- [16] S. Sen, J. Lee, K. H. Kim, and P. Congdon, "Avoiding multipath to revive inbuilding WiFi localization", in Proc. 11th Annu. Int. Conf. MobiSys, Taipei Taiwan, pp. 249-262, Jun. 2013.
- [17] E. Soltanaghaei, A. Kalyanaraman, and K. Whitehouse. "Multipath triangulation: Decimeter-level wifi localization and orientation with a single unaided receiver", MobiSys '18: In Proc. 16th Annual International Conf. on Mobile Systems, Applications, and Services, Munich, Germany, pp. 376-388, Jun. 2018.
- [18] H. Tang, "DOA Estimation Based on MUSIC Algorithm", 2014; <https://pdfs.semanticscholar.org/5ff7/806b44e60d41c21429e1ad2755d72bba41d7.pdf>. [accessed: Sept. 07. 2019].

저자소개

김 창 현 (Changhyun Kim)



2019년 2월 : 동아대학교 전자공학과(공학사)
 2019년 3월 ~ 현재 : 동아대학교 전자공학과(석사과정 재학 중)
 관심분야 : 무선전력전송, IoT 기반 융합 시스템 설계, 무선 센서 네트워크

김 동 완 (Dongwan Kim)



2003년 8월 : 고려대학교(공학사)
 2006년 2월 : 포항공과대학교(공학석사)
 2015년 2월 : 고려대학교(공학박사)
 2017년 3월 ~ 현재 : 동아대학교 전자공학과 조교수
 관심분야 : 무선전력전송, Edge 컴퓨팅, 저전력 임베디드 시스템 설계