

하나의 SDR을 이용한 Bluetooth 5.1 AoD 방향탐지 시스템

Implementation of a Bluetooth 5.1 Angle of Departure (AoD) Direction Finding System Using an Software-Defined Radio (SDR)

신재현 · 장병준

Jae-Hyun Shin · Byung-Jun Jang

요약

최근 블루투스(Bluetooth) 5.1 규격에서 RF 스위치와 배열안테나를 이용한 방향탐지 기술이 도입된 이후 다양한 위치 기반 서비스가 등장하는 중이다. Bluetooth 5.1 방향탐지 기술은 수신기에 배열안테나를 사용하는 Angle of Arrival(AoA)과 송신기에 배열안테나를 사용하는 Angle of Departure(AoD)로 나눌 수 있다. 특히, AoD의 경우, Bluetooth 5.1 비컨 송신기와 기존 스마트폰을 이용해 실내 위치기반서비스를 쉽게 구현할 수 있어 관심이 집중되고 있다. 하지만 AoD 시스템의 성능에 대한 이론적인 연구와 실제 구현 방법에 대한 연구는 부족한 상태이다. 이에 본 논문에서는 Bluetooth 5.1 규격의 특성을 이론적으로 살펴 성능의 한계를 살펴보고, 상용 SDR 1개와 자체 제작한 2소자 스위치 배열 안테나를 이용해 Bluetooth 5.1 AoD 시스템을 구현하는 방법을 제시하였다. 본 연구결과는 향후 다양한 Bluetooth 5.1 AoD 응용 서비스의 성능 분석 및 시스템 설계에 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

Abstract

Since the introduction of direction detection technology in the Bluetooth 5.1 standard that use array antennas and radio frequency (RF) switches, various location-based services have emerged. Bluetooth 5.1 direction finding technology can be categorized into two types: Angle of Arrival (AoA), which uses an array antenna for the receiver, and Angle of Departure (AoD), which uses an array antenna for the transmitter. Particularly, AoD has been attracting attention, on account of its easy implementation in indoor location-based services, using a Bluetooth 5.1 beacon transmitter and an existing smartphone. However, theoretical studies on the performance of AoD systems and studies on their actual implementation methods are insufficient. Therefore, in this study, we theoretically examine the characteristics of the Bluetooth 5.1 standard, to examine the limitations of its performance, and subsequently propose a method to effortlessly implement a Bluetooth 5.1 AoD system, using a commercial Software-Defined Radio (SDR), and a two-element switch array antenna fabricated by us. The results of this study are expected to be used for performance analysis and system design of various Bluetooth 5.1 AoD application services in the future.

Key words: Bluetooth, Switched Array Antenna, Direction Finding, Angle of Arrival, Angle of Departure, Localization

「이 연구는 2019년도 삼성전자 미래기술육성센터 연구비(SRFC-IT1801-06)의 지원으로 연구되었음.」

국민대학교 전자공학과(Department of Electrical Engineering, Kookmin University)

· Manuscript received April 20, 2021 ; Revised May 11, 2021 ; Accepted May 31, 2021. (ID No. 20210420-042)

· Corresponding Author: Byung-Jun Jang (e-mail: bjjang@kookmin.ac.kr)

I. 서 론

과거 위성통신이나 국방 분야 등에서 주로 사용되던 배열안테나를 이용한 방향탐지 기술이 최근에는 다양한 분야로 확대되고 있다. 예를 들어 이동통신의 경우, LTE 기반 4G 이동통신까지는 안테나 빔 특성이 고정되어 있었으나, 5G부터는 사용자의 변화에 능동적으로 빔의 방향을 바꾸게 되었고, 이를 위해 다양한 방향탐지 기술이 사용되고 있다. 또한, 과거에는 소형, 저가, 저전력이 요구되어 방향탐지 기술을 사용할 수 없었던 IoT(internet of things) 기술에도 방향탐지 기술이 도입되고 있다^{[1][2]}. IoT 기술에 방향탐지 기술이 도입된 첫 번째 사례로 2019년 발표된 블루투스(Bluetooth) 5.1 규격이 있다. Bluetooth 5.1 기술에서 사용되는 방향탐지 기술로는 수신기에 배열안테나를 사용하는 Angle of Arrival(AoA)와 송신기에 배열안테나를 사용하는 Angle of Departure(AoD)로 나눌 수 있다. 이 중에서 AoD의 경우, Bluetooth 5.1 비컨(beacon) 송신기에 배열 안테나를 사용하기만 하면 기존 스마트폰의 Bluetooth 수신기의 변경없이 다양한 실내 위치기반서비스를 구현할 수 있어 관심이 집중되고 있다^{[2][3]}.

블루투스 5.1 방향탐지 기술에서는 저가, 저전력 요구 조건을 만족하기 위하여 위상천이기와 같이 크기가 큰 RF회로를 사용하지 않고 단일 송수신기와 복수개의 안테나를 RF스위치로만 연결되는 스위치 배열 안테나(switched antenna array) 구조를 사용한다. 이러한 스위치 배열 안테나의 경우, 공간상에 빔이 형성된다기보다는 시간적으로 분리된 각각의 안테나의 빔 특성을 조합하여 기저대역에서 송신기나 수신기의 방향을 계산하는 방식을 사용한다^[4]. 이러한 방식은 기존의 디지털 빔포밍이나 RF빔포밍 방식과는 달라 아직까지 학계에는 잘 알려져 있지 않다. 따라서 실제 구현 시 어느 정도 방향탐지 성능을 보이는지 알 수 없다. 이에 본 논문에서는 Bluetooth 5.1 규격의 특성을 이론적으로 살펴 방향탐지 성능 및 성능의 한계를 살펴보고자 한다.

한편, Bluetooth 5.1 AoA/AoD 시스템의 실제 구현 방법에 대한 연구도 매우 부족한 상태이다. 다행히 최근 상용 SDR(software defined radio)의 등장으로 특정 Bluetooth IC를 사용하지 않더라도 SDR과 PC를 연결하면 쉽게 방향

탐지 시스템을 구현할 수 있다^[5]. 이에 본 논문에서는 상용 SDR과 자체 제작한 2소자 스위치 배열 안테나를 이용해 Bluetooth AoA와 AoD 시스템을 구현하여, 구현 시 주요 고려사항 역시 살펴보고자 한다.

본 논문의 구성은 2장에서 Bluetooth 5.1에서 사용하는 위상차 기반 방향탐지의 원리를 살펴보고, 3장에서 실제 Bluetooth 5.1에서 실제로 위상차 기반 방향탐지 원리가 어떻게 구현되었는지를 살펴본다. 4장에서는 SDR를 이용한 Bluetooth 5.1 AoA/AoD 시스템의 구현 방법과 실험 결과를 보여주고, 5장에서 결론을 맺는다. 본 연구를 통해 Bluetooth 5.1에 대한 이해가 높아지고, 유사한 IoT 시스템에 방향탐지 기능이 포함되기를 기대한다.

II. 위상차 기반 단일채널 방향탐지 원리

2-1 안테나 간의 위상차 특성

그림 1은 안테나 간 위상차를 이용한 방향탐지의 원리를 보여준다. 그림 1의 왼편과 같이 하나의 송신기가 CW(continuous wave) 신호를 송신하는 경우, 수신기에서 2개의 안테나가 원역장(far field)에 위치한다고 가정한다면 두 안테나에 입사되는 전파는 송신기와 이루는 각도 ϕ 에 따라 위상차가 발생한다. 두 안테나의 간격이 반파장($\lambda/2$)인 경우 두 안테나에 입사된 신호의 위상차 $\Delta\theta$ 는 식 (1)과 같다^[6].

$$\Delta\theta = 2\pi \frac{d \cos\phi}{\lambda} = \pi \cos\phi \quad (1)$$

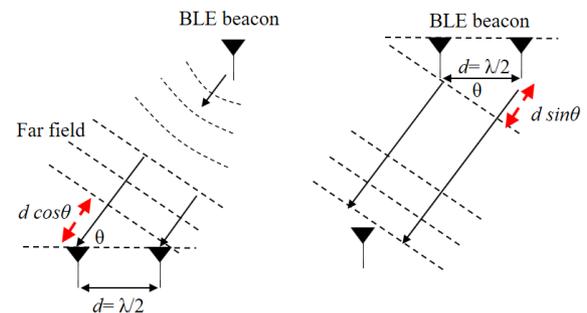


그림 1. 안테나 간의 위상차에 의한 AoA/AoD 방향 탐지
Fig. 1. AoA/AoD direction finding by phase difference between antennas.

이제 식 (1)을 이용하여 송신기의 방향(ϕ)는 식 (2)로 주어진다.

$$\phi = \cos^{-1}\left(\frac{\Delta\theta}{\pi}\right) \quad (2)$$

마찬가지로 그림 1의 오른쪽과 같이 두 개의 비콘 송신기가 신호를 송신하는 경우를 AoD라고 하며, AoD에서 하나의 안테나로 입사되는 전파는 송신안테나와 이루는 각도에 따라 위상차가 발생한다. 두 개의 송신안테나의 간격이 반파장 ($\lambda/2$)인 경우, 송신기의 방향(ϕ)은 식 (3)으로 주어진다.

$$\phi = \sin^{-1}\left(\frac{\Delta\theta}{\pi}\right) \quad (3)$$

식 (2)와 식 (3)으로부터 비콘 송신기의 방향은 안테나 간의 위상차로부터 구할 수 있음을 알 수 있다. 그림 2의 위쪽 그림은 식 (2)와 식 (3)을 통해 구한 안테나 간의 위상차에 따른 도래각의 변화를 보여준다. 그림에서 알 수 있듯이, 도래각이 $\pm 45^\circ$ 이내인 경우에는 위상차의 변화와 도래각의 변화가 일정한 반면, 그 이상으로 벌어진 경우 도래각에 따른 위상차의 변화가 작아 오차가 증가할 수 있음을 알 수 있다.

도래각에 따른 위상차의 변화의 민감도를 알기 위해 식 (3)을 미분하면 식 (4)와 같다.

$$\frac{d\phi}{d\Delta\theta} = \frac{1}{\sqrt{\pi^2 - \Delta\theta^2}} \quad (4)$$

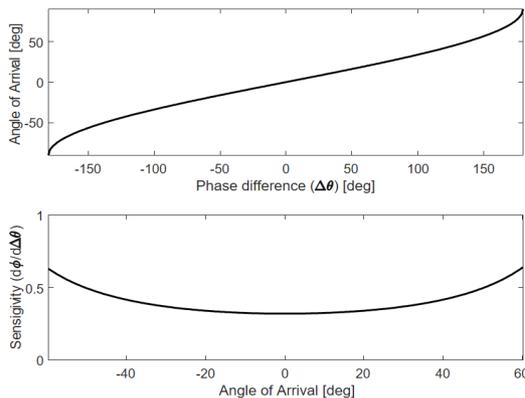


그림 2. 안테나 위상차와 도래각 특성
Fig. 2. Characteristics of phase difference between antennas and angle of arrival.

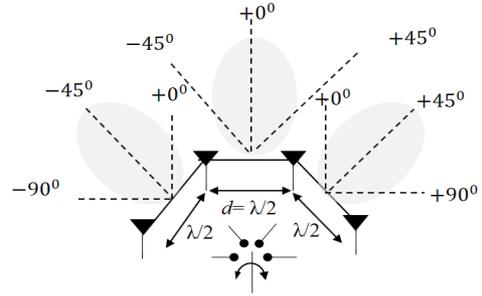


그림 3. 4소자 스위치 안테나를 이용한 도래각 탐지
Fig. 3. AoA direction finding using 4 element switched antenna array.

식 (4)를 이용하여 도래각에 따른 민감도는 그림 2의 아래쪽에 나타나 있다. 도래각이 커질수록 민감도가 커짐을 알 수 있다.

이상의 결과로부터 두 개의 안테나 사이에 입사되는 신호의 도래각이 $\pm 45^\circ$ 이내인 경우에 안테나 간의 위상차를 통해 입사되는 신호의 방향을 균일하게 추정할 수 있음을 알 수 있다. 방향탐지할 각도가 최대 $\pm 90^\circ$ 인 영역인 경우에는 그림 3과 같이 안테나 4개를 이용하여 방향탐지를 할 수 있다. 그림 3을 AoA의 경우에 적용하면 사람의 들고 다니는 수신기는 전면에 있는 신호의 방향을 탐지하므로 전면 방향인 최대 $\pm 90^\circ$ 인 영역을 탐지하는 경우로 볼 수 있다. AoD에 적용하는 경우, 벽에 부착하는 송신기의 방향을 탐지할 때 벽면에 붙은 송신기는 최대 $\pm 90^\circ$ 인 영역으로 신호를 송신하므로 이 범위만을 탐지 대상이다. 따라서 그림 3과 같이 스위치 배열안테나를 구성하고, 2개의 안테나 쌍 3개의 위상차를 측정하여 위상차를 비교하면 최대 $\pm 90^\circ$ 인 영역에서 어느 정도 균일한 방향 탐지 성능을 얻을 수 있다.

2.2 단일채널 송수신기를 갖는 경우

일반적인 방향탐지 기술에서는 안테나 간의 위상차를 측정하기 위해서는 각각의 안테나별로 수신기가 필요하다. 하지만, Bluetooth와 같은 저가, 저전력 무선기기들은 하드웨어 비용과 전력소모를 줄이기 위해 수신기가 하나인 단일채널 구조를 가지므로 RF스위치를 이용하여 수신기와 안테나가 연결된다. 이 경우, 안테나 간의 위상차를 계산할 때 RF스위치의 영향을 고려해야 한다.

그림 1과 같이 두 개의 안테나가 하나의 수신기에 RF 스위치를 통해 연결되는 경우를 살펴보자. 스위치가 이상적인 경우를 가정하여 첫 번째 슬롯시간(t_{slot})에 첫 번째 안테나(A_1)에 연결된다면 위상 $\theta_{slot1,A1}$ 은 식 (5)와 같다.

$$\theta_{slot1,A1} = 2\pi ft + \theta_{A1}, \text{ for } 0 \leq t \leq t_{slot} \quad (5)$$

다음으로 두 번째 슬롯시간에 두 번째 안테나(A_2)에 연결된다면 위상 $\theta_{slot2,A2}$ 은 식 (6)과 같다.

$$\theta_{slot2,A2} = 2\pi ft + \theta_{A2}, \text{ for } t_{slot} \leq t \leq 2t_{slot} \quad (6)$$

이제 두 슬롯 간의 위상차는 식 (7)과 같다.

$$\Delta\theta_{slot} = \theta_{slot2,A2} - \theta_{slot1,A1} = \Delta\theta + 2\pi ft_{slot} \quad (7)$$

식 (7)로부터 단일 채널 수신기를 갖는 경우의 안테나 간의 위상차는 다중 채널 수신기와 달리 신호의 동작 주파수와 슬롯시간을 고려해서 계산해야 함을 알 수 있다. 이때 주파수와 슬롯시간의 곱(ft_{slot})을 1로 조정하면 두 슬롯 간의 위상차 $\Delta\theta_{slot}$ 은 안테나에 입사된 신호의 위상차 $\Delta\theta$ 와 같아지게 되어 스위치에 의한 시간 차이에 의한 안테나 간의 위상지연 효과를 사라지게 할 수 있다.

III. Bluetooth 5.1 AoD 방향탐지

3-1 Bluetooth 5.1 개요

Bluetooth는 도입 당시 스마트폰, 노트북 PC, 무선마우스, 무선 키보드 등의 저전력 휴대용 정보기기 간의 무선 접속용으로 개발된 기술로 반경 10 m 내에서 음성 및 데이터 전송이 가능한 무선 PAN(wireless personal area network) 기술이다. Bluetooth는 비면허 대역인 2.4 GHz 대역의 주파수를 사용하여 허가 없이 사용할 수 있다. Bluetooth 기기 중에 비콘(beacon) 송신기는 송신만 하는 작은 디바이스로 쇼핑센터, 음식점, 박물관, 미술관, 영화관 등을 방문한 고객의 스마트폰에 할인 쿠폰이나 상세 설명 등의 데이터를 전송할 수 있다. 이러한 Bluetooth 비콘의 대표적인 예로 애플의 iBeacon과 Google의 Eddystone이 있다. 비콘 서비스가 제대로 활용되기 위해서는 비콘의 정확한 위치 추정이 필요한데 이전에는 비콘 신호의 RSSI(received signal strength indicator) 값을 이용하였다. 하지만 이

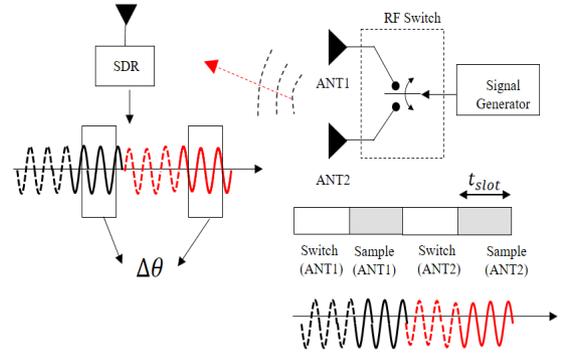


그림 4. Bluetooth 5.1 AoD 프레임 구조 및 신호 특성
Fig. 4. Frame structure and signal characteristics of Bluetooth 5.1 standard.

경우 오차가 커서 정확한 위치추정이 어려웠다. 이를 극복하기 위하여 2019년 발표한 Bluetooth 5.1 규격에서는 스위치 배열 안테나 기반의 방향탐지 기능이 추가되었다.

Bluetooth 5.1에서는 그림 4와 같은 패킷 구조를 갖는다. 기존 Bluetooth 패킷 구조에서는 통신을 위해 ‘1’과 ‘0’의 정보가 혼재되어 있으며, FSK(frequency shift keying) 방식의 모뎀을 사용한다. 따라서 ‘0’의 경우, 중심 주파수로부터 250 kHz 낮은 신호의 스펙트럼을 ‘1’의 경우에는 중심주파수로부터 250 kHz 높은 주파수 성분을 갖게 된다. 일반적인 디지털 신호는 ‘0’과 ‘1’은 랜덤하게 분포되므로 이 경우 신호에 따라 주파수와 위상이 변하게 되어 안테나 사이의 위상차도 랜덤하게 변하게 된다. 따라서 위상차 기반의 방향탐지를 위해서 위상이 변화가 일정한 단일 주파수 신호의 송신이 필요하다. 이를 위해 Bluetooth 5.1에서는 기존 Bluetooth 패킷의 끝에 CTE(constant tone extension)이라는 구간을 추가하였다. CTE 구간에서는 ‘1’이 연속으로 있는 가상의 디지털 신호를 생성하는데, 이렇게 되면 FSK 방식에서 중심주파수보다 250 kHz 높은 CW 신호가 생성한다. 수신기가 직접변환(direct conversion) 방식의 수신기를 사용하는 경우, 수신기는 CTE 구간 동안 기저대역에서 +250 kHz의 정현파 신호가 수신될 것이다.

3-2 Bluetooth 5.1 방향탐지

Bluetooth 5.1의 CTE 구간 동안 CW 신호가 송신되는

원리를 이용하면 RF 스위치와 단일채널 송수신기를 이용하여 안테나 간의 위상차를 이용한 방향탐지가 가능하다.

이제 Bluetooth 5.1에서 스위치배열 안테나가 어떻게 응용되는지 살펴보자. Bluetooth 5.1 비콘은 CTE 구간동안 중심주파수로부터 250kHz 높은 CW신호를 송신하게 된다. 이때 Bluetooth 5.1 규격에서는 RF 스위치 변환을 위한 t_{slot} 을 1 μsec 또는 2 μsec 로 정할 수 있는데 식 (7)에 의해 슬롯간의 위상차는 식 (8)과 같다.

$$\Delta\theta_{slot} = \begin{cases} \Delta\theta + 2\pi ft_{slot} = \Delta\theta + \pi/2, & t_{slot} = 1\mu\text{sec} \\ \Delta\theta + 2\pi ft_{slot} = \Delta\theta + \pi, & t_{slot} = 2\mu\text{sec} \end{cases} \quad (8)$$

실제 시스템에서는 RF 스위치가 이상적이지 않기 때문에 슬롯 시간은 스위치 슬롯(switch slot)과 샘플 슬롯(sample slot)으로 나뉘며, 스위치 슬롯 구간에서는 데이터를 샘플링하지 않는다. 따라서 실제 환경에서는 식 (8)처럼 인접한 두 슬롯의 위상차가 아닌 스위치 슬롯을 고려해야 하며, 위상차는 식 (9)와 같다.

$$\Delta\theta_{slot} = \Delta\theta + 2\pi f(t_{sample} + t_{switch}) \quad (9)$$

Bluetooth 송신기는 CTE 구간에서 중심주파수보다 250 kHz 높은 신호를 송신하므로 식 (9)를 정리하면 식 (10)과 같다.

$$\Delta\theta_{slot} = \begin{cases} \Delta\theta + \pi, & t_{slot} = 1\mu\text{sec} \\ \Delta\theta + 2\pi = \Delta\theta, & t_{slot} = 2\mu\text{sec} \end{cases} \quad (10)$$

그림 4와 같이 패킷의 CTE 구간 동안 슬롯이 4개 있고, 이 중 2개의 슬롯은 RF스위치의 스위칭 동작 시 오류를 줄이기 위하여 제외한다면, 두 번째 슬롯과 4번째 슬롯은 각각 ANT1과 ANT2의 신호의 입사 신호가 되고, 식 (10)에 의해 슬롯 변경에 따른 위상차는 2π 가 되므로 두 슬롯의 CW 신호의 위상차는 안테나에 입사된 경로에 의한 위상차와 동일하게 된다.

Bluetooth 5.1 표준에서는 전체 CTE 구간이 최대 160 μsec 이므로 복수개의 슬롯을 구성할 수 있어 안테나를 2개 이상 연결하는 것이 가능하다. 보통 그림 3과 같이 4개를 연결하는 것이 일반적이다. 또한 같은 안테나에 대해 여러 번 안테나 간의 위상차를 구할 수 있으므로 이를 평균하면 잡음에 의한 효과도 제거할 수 있다^{[6],[7]}.

IV. SDR을 이용한 Bluetooth AoD 구현 결과

4-1 Bluetooth 5.1 AoD 시스템 구현

앞에서 살펴본 Bluetooth 5.1의 위상차 기반 단일채널 방향탐지 시스템을 계측기와 SDR을 이용하여 구현하였다. 송신기는 Bluetooth 비콘 주파수인 채널 37번(2402 MHz)의 CW 신호를 RF신호발생기(AgilenTM N5182)로 생성한 후 이를 자체 제작한 SPDT(Single pole double throw) 스위치를 거쳐 $\lambda/2$ 이격된 2.4 GHz에서 동작하는 상용 모노폴 안테나 2개로 연결된다. RF 스위치의 동작은 Function Generator로 $2t_{slot}$ 에 따라 구형파를 발생시켜 스위치를 제어하므로 2개의 안테나는 교대로 신호로 방사하게 된다^[8].

수신부는 송신부와 동일한 상용 모노폴 안테나를 이용하여 2.4 GHz 신호를 수신하고, 상용 SDR인 RTL-SDR을 거쳐 주파수 하향 변환되어 기저대역신호를 생성한다. 이 기저대역신호는 USB 케이블을 통해 PC로 연결되는데, PC에서는 MATLAB/Simulink를 통해 SDR의 I/Q 신호를 수신할 수 있다^[9]. 이렇게 수신된 I/Q 신호를 기반으로 Matlab/Simulink에서 실시간으로 SDR을 제어하고 위상차를 계산하는 다양한 알고리즘이 구현될 수 있다^{[9],[10]}.

방향탐지를 위한 양질의 데이터를 얻기 위해 I/Q 샘플링 윈도우(I/Q sampling window)라는 시작점으로부터 0.125 μsec 이후, 끝점으로부터 0.125 μsec 이전까지의 0.75 μsec 구간에서 IQ샘플링이 이루어진다. 2 μsec 샘플 슬롯에서는 그림 5와 같이 처음 1 μsec 구간은 제외하고 이후

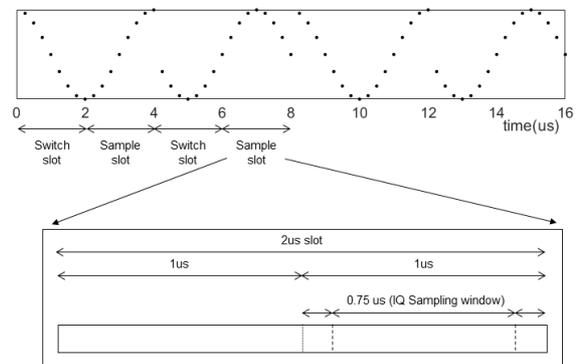


그림 5. 2 μsec 샘플 슬롯에서 I/Q 샘플링 윈도우
Fig. 5. I/Q sampling window for 2 μsec sample slots.

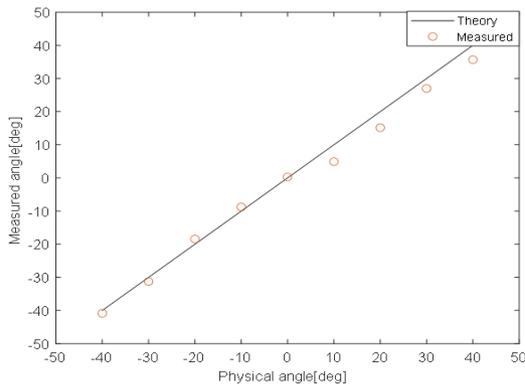
1 μsec 구간에서 I/Q 샘플링 윈도우를 통해 샘플링이 진행된다. 예를 들어 CTE 구간의 250 kHz의 정현파 신호를 4 MHz로 샘플링 한다면 정현파 한주기에 16개 샘플이 가능하며 이 중 8개 데이터는 스위치 슬롯이므로 제외한다. 나머지 8개 데이터는 샘플 슬롯으로 처음 4개 데이터는 제외하고 4개의 데이터만 샘플링한다.

4-2 Bluetooth 5.1 AoD 실험 결과

실험은 특별한 전파 차폐시설이 없는 일반 실험실 환경에서 진행하였고, 실험 환경과 실험 결과는 그림 6과 같다. 그림 6(a)와 같이 송신기는 책상 위에 고정시키고, 수신기는 나무로 만들어진 삼각플대에 놓고 각도를 바꾸



(a) AoD 실험 환경
(a) Measurement environment of AoD



(b) 측정 결과
(b) Measured results

그림 6. AoD 실험 환경 및 결과

Fig. 6. Measurement of AoD and results.

면서 AoD를 측정하였다. 거리는 1.3 m, 각도는 -30° 에서부터 $+30^\circ$ 까지 10° 간격으로 실험을 진행하였다. 측정 결과는 그림 6(b)와 같다.

각도는 -40° 에서부터 $+40^\circ$ 까지 10° 간격으로 방향탐지 성능을 확인하였다. SPDT 스위치와 안테나 연결 시 케이블을 사용하였으나 위상오차가 최대 5° 정도로 측정되어 5° 이하의 결과가 나온다면 제작한 스위치 배열 안테나 기반 방향탐지 시스템이 적절하게 동작한다고 판단할 수 있다.

특별한 교정과정이나 전자파 차폐시설에서 측정하지 않았음에도 불구하고 LOS 환경이므로 이론값과 실제 방향탐지 결과가 잘 일치함을 알 수 있다. 특정 각도에서 오차가 발생하여 반복 측정해도 동일한 결과가 발생하는 것으로 보아 해당 각도에서 전파환경이 철재문이나 계층기가 설치된 철제 캐비닛 등의 영향을 받는 것으로 판단된다.

V. 결론

본 논문에서는 최근 관심이 집중되고 있는 Bluetooth 5.1 AoD 시스템의 원리를 살펴보았다. Bluetooth 5.1 AoD 시스템은 비컨에 안테나와 RF스위치만을 추가함으로써 기존의 단일 안테나를 갖는 Bluetooth 수신기로 다양한 위치 기반 서비스를 제공할 수 있음을 확인할 수 있었다. 확인된 결과는 SDR을 이용하여 Bluetooth 환경과 동일한 시스템을 구축하였고, 예측한 바와 같이 AoD 측정이 가능함을 확인하였다. 본 논문을 통해 Bluetooth AoD 시스템에 대한 관심이 높아지고 지속적인 연구가 진행되기를 기대한다.

References

- [1] F. Gross, *Smart Antennas for Wireless Communications with MATLAB*, New York, NY, McGraw Hill, 2005.
- [2] B. J. Jang, "Direction finding technology: Tutorial, review, and research prospects", *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 30, no. 8, pp. 607-617, Aug. 2019.
- [3] N. B. Suryavanshi, K. V. Reddy, and V. R. Chandrika,

- "Direction finding capability in bluetooth 5.1 standard," in *2019 International Conference on Ubiquitous Communications and Network Computing*, Bangalore, 2019, pp. 53-65.
- [4] W. J. Liao, S. H. Chang, H. C. Liu, L. K. Li, C. Y. Hsieh, and C. C. Yao, "A beam switching array antenna for direction-of-arrival applications," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 53, no. 7, pp. 1601-1606, Jul. 2011.
- [5] R. W. Stewart, K. W. Barlee, *Software Defined Radio using MATLAB & Simulink and the RTL-SDR*, Glasgow, University of Strathclyd, 2015.
- [6] C. Huang, Y. Zhuang, H. Liu, J. Li, and W. Wang, "A performance evaluation framework for direction finding using BLE AoA/AoD receivers," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 8, no. 5, pp. 3331-3345, Mar. 2021.
- [7] F. A. Toasa, L. Tello-Oquendo, C. R. Peñafiel-Ojeda, and G. Cuzco, "Experimental demonstration for indoor localization based on AoA of bluetooth 5.1 using software defined radio," in *2021 IEEE 18th Annual Consumer Communications & Networking Conference(CCNC)*, Las Vegas, NV, Jan. 2021, pp. 1-4.
- [8] pSemi, "PE4251 datasheet." Available: <https://www.psemi.com/products/rf-switches/pe4251>
- [9] S. Lee, H. Yoon, H. Choo, and B. J. Jang, "Implementation of real-time direction finding system using time-modulated array with two antenna elements and one USRP", *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 28, no. 4, pp. 347-350, Apr. 2017.
- [10] B. J. Jang, "Four-beam direction finding using two-element monopulse antenna and I/Q demodulator", *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 30, no. 10, pp. 785-790, Oct. 2019.
- [11] B. J. Jang, J. Rong, and H. Choo, "Switched array antenna beamforming for low-power Iot wireless communication", *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 31, no. 8, pp. 713-720, Aug. 2020.

신 재 현 [국민대학교/학부생]

<https://orcid.org/0000-0002-3091-6410>



2016년 3월 ~ 현재 : 국민대학교 전자공학부 재학
[주 관심분야] RF회로 및 시스템, 무선시스템, 전파응용

장 병 준 [국민대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0002-5295-6050>



1990년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학사)
1992년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학석사)
1997년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학박사)
1995년 3월~1999년 1월: LG전자(주)
1999년 1월~2003년 9월: 한국전자통신연구원 무선방송연구소
2003년 10월~2005년 8월: 정보통신연구진흥원
2013년 9월~2015년 8월: 미래창조과학부 민간전문가(CP)
2005년 9월~현재: 국민대학교 전자정보통신공학부 교수
[주 관심분야] RF회로 및 시스템, 무선시스템, 전파응용