

저전력 IoT 무선통신을 위한 스위치 배열 안테나 빔포밍

Switched Array Antenna Beamforming for Low-Power IoT Wireless Communication

(Invited Paper)

장 병 준 · 용 지 호 · 추 호 성*

Byung-Jun Jang · Jihao Rong · Hosung Choo*

요 약

최근 5G 이동통신과 레이더 분야에서 빔포밍 기술이 활발하게 적용됨에 따라 과거 빔포밍이 적용되지 않았던 기술 분야에서도 빔포밍 기술이 적용되고 있다. 이 중에서 저전력 IoT 무선통신의 경우에는 전력소모 및 가격 등의 이슈로 인해 전통적인 빔포밍 기술을 바로 적용할 수 없으므로 저전력 동작이 가능한 스위치 배열 안테나 기반의 단일채널 빔포밍 기술이 필요하다. 이에 본 논문에서는 저전력 IoT 무선통신에서 빔포밍 기술의 요구조건과 함께 최근 스위치 배열 안테나 빔포밍 기술이 적용된 블루투스(bluetooth) 5.1 규격의 특성을 살펴본다. 또한, 자체 제작한 2소자 스위치 배열 안테나를 통해 방향탐지 실험결과를 제시하였다. 이를 통해 향후 다양한 저전력 IoT 무선통신 분야에서 빔포밍 기술이 어떻게 적용될지 시사점을 제시하고자 한다.

Abstract

Beamforming technology has been extensively applied in the field of 5G mobile communication and radar in recent years; it has also been applied in technological fields where it was not previously utilized. Conventional beamforming technology cannot be applied immediately to low-power IoT wireless communication because of issues such as high power consumption and price; thus, single-channel beamforming technology capable of low-power operation using switched array antennas is required. Therefore, in this paper, we examine the characteristics of the Bluetooth 5.1 standard, according to which a recent switched array antenna single-channel beamforming technology is applied, along with the requirements of the beamforming technology in low-power IoT wireless communication. In addition, the experimental results of direction finding using a two-element switch array antenna are presented. Based on this, we suggest the implications of applying beamforming technology in various low-power IoT wireless communication fields.

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

I. 서 론

과거 위성통신이나 국방 분야 등에 주로 사용되던 빔포밍 기술은 최근 이동통신과 레이더 등의 분야로 활용

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

국민대학교 전자공학과(Department of Electrical Engineering, Kookmin University)

*홍익대학교 전기전자공학과(School of Electronic and Electrical Engineering, Hongik University)

· Manuscript received July 22, 2020 ; Revised August 4, 2020 ; Accepted August 8, 2020. (ID No. 20200722-003S)

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

범위가 확장되고 있다. 이동통신의 경우, LTE 기반 4G 이동통신 때 처음 등장한 디지털 빔포밍 방식이 3.5GHz를 사용하는 5G에서는 본격적으로 사용되고 있다. 또한, 28 GHz 주파수를 사용하는 5G 시스템에서는 RF 빔포밍 방식이 사용될 예정이다. 레이더 분야의 경우, 과거 빔포밍 기술은 국방레이더 등에서 주로 사용된 고성능 고가의 기술이었으나, 최근 차량충돌 레이더를 시작으로 다양한 저가격의 산업용, 생활용 레이더 응용이 활발해지고 있다 [1],[2].

그럼에도 불구하고 빔포밍 기술은 여전히 전력소모가 많고, 가격이 비싸다는 단점이 있다. 그 이유는 빔포밍 방식 중 다중 빔 동시 처리가 가능한 디지털 빔포밍 방식의 경우 안테나별로 송수신기가 필요하므로 전력소모와 가격이 송수신기의 수만큼 커지게 되기 때문이다. 반면에 송수신기가 하나인 RF 빔포밍 방식을 사용하게 되면 전력소모는 많지 않지만, 빔포밍 구현을 위한 위상천이기 등의 RF회로가 필요한데, 위상천이기의 크기는 파장의 함수이므로 주파수가 낮을 경우, 회로의 크기가 커지게 된다. 따라서 RF 빔포밍 방식은 수 GHz 이상에서만 주로 사용이 된다. 따라서 수 GHz 이하를 사용하는 저전력 IoT (internet of things) 무선통신 기술에서 빔포밍 기술을 적용하는 것은 디지털 빔포밍 방식의 경우, 전력소모의 문제로 RF 빔포밍 방식의 경우 크기의 문제로 구현이 쉽지 않다[3].

따라서 저전력 IoT 무선통신에서 저전력 빔포밍 기술을 적용하려면 위상천이기와 같이 크기가 큰 RF회로가 없이 단일 송수신기와 복수개의 안테나를 연결할 수 있는 스위치 배열 안테나(switched antenna array) 구조의 빔포밍 기술이 필요하다[4]. 또한, RF 스위치 동작과 연계된 별도의 빔포밍 신호처리 기법이 사용되어야 한다. 스위치 배열 안테나 기술은 복수 개의 안테나와 수신기 사이에 RF 스위치를 연결하고, 디지털 대역에서 빔포밍 회로를 구현하는 것으로 그 구조가 간단하여 현재까지 다양한 연구가 진행되어 왔다. 최근에는 스위치 배열 안테나 기반 빔포밍 기술이 실제 상용화 수준까지 발전하였으며, 대표적인 예로 2019년 발표된 Bluetooth 5.1 표준이 있다[5].

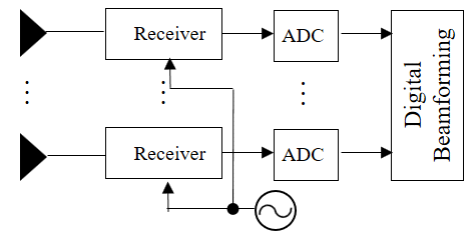
이러한 동향에 발맞추어 본 논문에서는 스위치 배열 안테나 구조의 특징과 저전력 IoT 무선통신에 적용될 때

요구되는 특성을 살펴보고, 실제 Bluetooth에 어떻게 적용되었는지에 대해 기술적인 특징을 살펴보고자 한다. 또한, 실제 실험결과를 제시한다. 이를 통해 향후 다양한 저전력 IoT 무선통신 분야에서 빔포밍 기술이 향후 어떻게 적용될지 시사점을 제시하고, 결론을 맺고자 한다.

II. 빔포밍 기술과 IoT

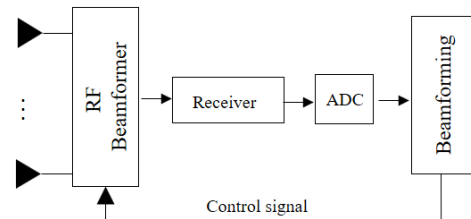
2-1 빔포밍 기술의 분류

빔포밍 기술은 크게 디지털 빔포밍 기술과 RF 빔포밍 기술로 분류할 수 있다[3]. 그림 1은 수신기의 경우에 적용된 다양한 빔포밍 기술의 구성을 보여준다. 먼저, 그림



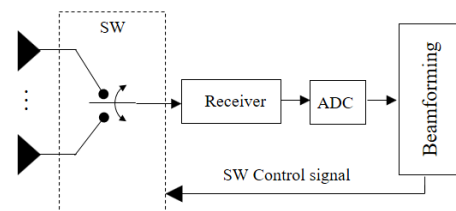
(a) 디지털 빔포밍

(a) Digital beamforming



(b) RF 빔포밍

(b) RF beamforming



(c) RF 스위치 빔포밍

(c) RF switch beamforming

그림 1. 빔포밍 기술의 분류

Fig. 1. Classification of beamforming technologies.

1(a)의 디지털 빔포밍 방식은 수신기의 수만큼 여러 개의 빔을 동시에 생성할 수 있을 뿐만 아니라, 수신신호에 직접 빔포밍 연산이 적용되므로 빔포밍 속도가 매우 빠르다. 반면, 안테나 별로 수신기가 필요하므로 전력소모, 가격, 복잡도 등이 수신기의 수만큼 커지며, 동기 및 수신기 간의 시간지연이 있지 않도록 수신기의 특성을 동일하게 유지할 필요가 있다.

다음으로, 그림 1(b)의 RF 빔포밍 방식은 수신기가 하나이므로 한번에 하나의 빔만을 생성할 수 있을 뿐만 아니라, RF 단에서 빔을 생성해야 하므로 빔생성 속도가 느리다. 또한, 전력소모는 많지 않지만 빔포밍 구현을 위한 위상천이기(phase shifter) 회로가 필요하게 되는데, 위상천이기는 파장의 함수이므로 주파수가 낮을 경우 회로의 크기가 커지게 된다. 따라서 RF빔포밍 방식은 수 GHz 이상에서 주로 사용이 된다. RF빔포밍 방식의 대표적인 예로 28 GHz를 사용하는 5G 기술이 있다. 결론적으로 Sub-GHz나 6 GHz 이하를 사용하는 저전력 IoT(internet of things) 무선통신 기술에서 빔포밍 기술을 적용하는 것은 디지털 빔포밍 방식의 경우, 전력소모의 문제로 RF 빔포밍 방식의 경우 크기의 문제로 구현이 쉽지 않다.

이에 따라 최근 새롭게 대두되는 빔포밍 방식으로 그림 1(c)와 같은 RF 스위치를 이용한 스위치 배열 안테나 구조의 빔포밍 기술이 있다. 이 방식은 디지털 빔포밍과 RF빔포밍의 장점만을 사용한 것으로 각 안테나별로 수신된 신호들의 통계적 특성이 스위칭 시간 동안 변하지 않는다면 기저대역에서 가상의 다중 신호를 생성할 수 있으므로 디지털 빔포밍 기술과 동일한 효과를 낼 수가 있다. 또한, RF 스위치의 설계는 위상천이기에 비해 크기가 작고 전력소모가 거의 없으므로 수 GHz 이하에서도 쉽게 구현할 수 있다. 단, 채널환경이 빠르게 변하는 경우에는 안테나별로 수신된 신호들의 시간특성이 안테나 스위칭 동작 중에 변하게 되므로 사용이 어렵다는 단점이 있다. 하지만 Bluetooth와 같은 근거리 무선통신의 경우 LOS 환경에서는 통신채널의 시간적인 변화가 빠르지 않으므로 RF스위칭 기반 빔포밍 방식을 충분히 적용할 수 있다.

2.2 스위치 배열 안테나 빔포밍 기술의 요구조건

스위치 배열 안테나 구조의 빔포밍 기술은 RF 스위치

특성이 빔포밍 회로에 영향을 크게 주므로 먼저 RF 스위치의 동작을 이해할 필요가 있다. 일반적으로 상용 RF 스위치는 TDD(time division duplexing) 방식의 무선통신 시스템에서 송수신기와 안테나 연결을 위해 개발된 SPDT(single pole double throw) 스위치 부품이 대부분이다. 예를 들어 그림 2는 Peregrine SemiconductorTM사의 RF CMOS 기반의 SPDT Switch인 PE4251를 이용하여 2.45 GHz에서 제작된 2소자 스위치 배열 안테나의 사진과 스위치의 시간특성을 보여준다^[6]. RF SPDT 스위치의 경우, 제어신호(CTRL)에 따라 2개의 안테나 입력 중 하나가 출력으로 연결되고, 연결되지 않는 안테나는 50 Ω으로 종단된다. 스위치의 스위칭속도는 보통 10 %에서 90 %까지 변하는 Turn-on 시간(T_{ON}) 또는 Turn-off 시간(T_{OFF})으로 표기하는 것이 보통이며, 위 RF스위치의 경우 300 nsec가 된다.

보통 RF스위치의 스위칭속도가 300 nsec이므로 협대역 신호의 빔포밍을 위한 데이터 추출에 큰 문제가 없는 것으로 오해할 수 있다. 하지만 스위칭 시간인 T_{on} 의 의미는 그림 2와 같이 스위치의 상태가 변화하는 과도기 상태로

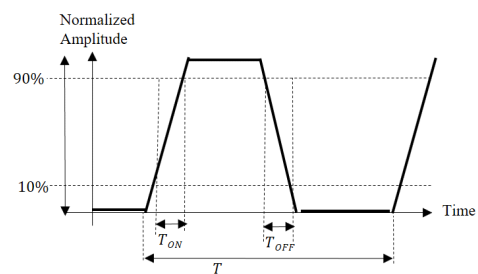
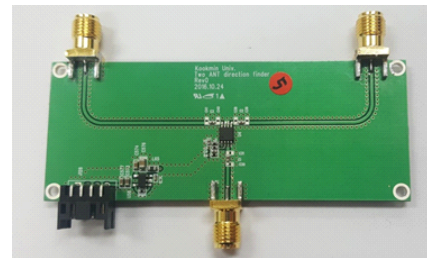


그림 2. 일반적인 RF 스위치의 구성 및 스위칭 규칙

Fig. 2. Configuration of typical RF switch and its switching characteristics.

서 이 상태에서는 스위치의 정확한 상태가 확인되지 않는다는 것을 의미한다. 따라서 스위칭 과정에서의 시간은 오류가 가능하므로 빔포밍 신호처리 과정에서 생략할 필요가 있다.

다음으로 RF 스위치의 경우, 진폭오차 및 위상오차가 있게 된다. 따라서 이를 사전에 보상하지 않으면 빔포밍 오차가 발생한다. 다행히 IoT 주파수의 경우, PCB 설계 시 50 Ω 선로의 길이만 주의한다면 진폭오차와 위상오차는 최소화할 수 있다. 2.4GHz에서 제작된 그림 2의 스위치 보드의 경우 0.1 dB 이하의 진폭오차와 1° 이하의 위상오차가 발생함을 측정을 통해 확인할 수 있었다^[7].

마지막으로 RF 주파수를 기저대역 신호로 전송하는데 있어 수신기에서 발생하는 위상오차가 있다. 이러한 위상오차는 디지털빔포밍 방식을 사용할 경우에 주로 문제가 되어 보통의 경우, 발진기를 공유하게 되면 어느 정도 위상오차를 줄일 수 있다고 알려져 있다. 하지만 참고 문헌 [8]에 의하면 국부발진기를 공유하여도 수신기 간에 시간차, 클럭타이밍 등의 오차가 발생할 수 있다고 발표된 바 있으며, 이를 극복하기 위해 수신기 간의 교정(calibration) 과정이 필수적이다. 다행히 RF 스위칭 빔포밍의 경우 단일채널 송수신기를 가지므로 이러한 문제가 발생하지 않는다는 장점이 있어 큰 문제가 되지 않는다. 결론적으로 스위치 배열 안테나의 경우, 위상오차를 최소화하는 안테나와 스위치가 설계되고, 스위치 동작 시 오류만 적절히 제거할 수 있다면 채널환경이 시간에 따라 빠르게 변화하지 않는 무선환경에서 다양한 디지털빔포밍 기법을 적용할 수 있음을 알 수 있다.

III. Bluetooth 5.1 빔포밍

앞서 II장에서 살펴본 스위치 배열 안테나를 이용한 빔포밍 회로의 요구조건을 살펴보았다. 본 절에서는 최근 표준화된 Bluetooth 기술에서 스위치 배열 안테나 기반 빔포밍 회로의 요구조건을 어떻게 해결하고 있는지 살펴본다.

스마트폰, 노트북 PC, 무선마우스, 무선 키보드 등의 저전력 휴대용 정보기기 간의 무선 접속용으로 개발된 Bluetooth 기술은 반경 10 m내에서 점대점(point-to-point) 및 점대다(point-to-multipoint) 방식으로 음성 및 데이터

전송이 가능한 무선기술이다. 두 개 이상의 Bluetooth 기기가 ad-hoc 방식으로 피코넷(piconet)을 형성하게 되며, 최대 8개의 서로 다른 기기들이 네트워크를 형성할 수 있다. 비면허 대역인 2.4GHz 대역의 주파수를 사용하며, 허가 없이 사용할 수 있으나 출력은 최대 100 mW 이하로 작다. Bluetooth는 지금도 지속적으로 발전하고 있으며, 2019년 발표한 최신 Bluetooth 규격인 Bluetooth 5.1 규격에서는 스위치 배열 안테나 기반이 방향탐지 기능이 추가되어 블루투스 기기의 방향을 안테나 간의 위상차를 통해 추정하고 있다.

Bluetooth 5.1에서는 그림 3과 같은 프레임 구조를 갖는다. 기존 Bluetooth 프레임 구조에서는 통신을 위해 '1'과 '0'의 정보가 혼재되어 있으며, FSK(frequency shift keying) 방식의 모델을 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 배열 안테나 특성을 이용하려면 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(continuous wave) 신호가 생성한다. 수신기가 직접변환(direct conversion) 방식의 수신기를 사용하는 경우,

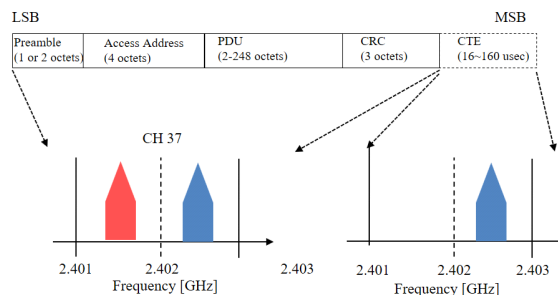


그림 3. Bluetooth 5.1의 프레임 구조 및 신호 특성
Fig. 3. Frame structure and signal characteristics of Bluetooth 5.1 standard.

수신기는 CTE 구간 동안 기저대역에서 +250 kHz의 정현파 신호가 수신될 것이다.

이제 Bluetooth에서 스위치배열 안테나가 어떻게 응용되는지 살펴보자. Bluetooth 규격에서는 수신기에 스위치 배열 안테나가 있는 경우를 AoA(angle of arrival)라 한다. AoA의 경우, 송신기는 CTE 구간 동안 중심주파수로부터 250 kHz 높은 신호를 송신하는 경우, 수신 안테나에 입사되는 위상은 그림 4(a)와 같이 입사각도 θ 에 따른 위상차 $d \sin \theta$ 를 가지게 된다. 따라서 그림 4(b)와 같이 수신기에 4개의 스위치 배열 안테나가 있다고 가정하면, 안테나 사이의 간격이 반파장으로 동일하다면 4개의 안테나 간의 위상차는 동일하다. 이때 II장에서 살펴본 바와 같이 스위치 동작에서는 신호의 오류가 있을 수 있으므로 스위치 동작 중의 샘플은 버리고, 스위치 동작이 완료된 후의 샘플만을 취하여 위상차를 계산하게 된다. Bluetooth 5.1 규격에서는 스위치 전환 시 발생할 수 있는 오차는 스

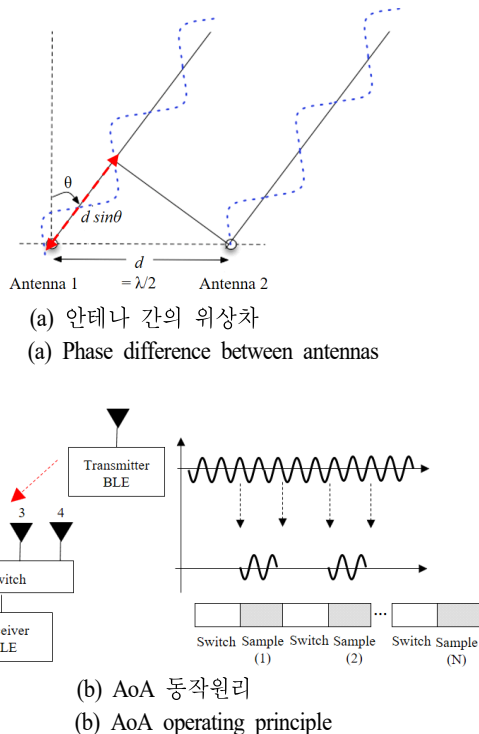


그림 4. 안테나 간의 위상차 및 블루투스 5.1의 위상 획득 과정

Fig. 4. Phase difference between antennas and phase difference calculation of Bluetooth 5.1 standard.

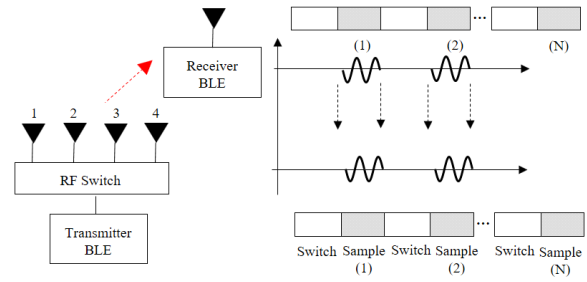


그림 5. Bluetooth 5.1 규격의 AoD 원리

Fig. 5. AoD principle of Bluetooth 5.1 beamforming.

위치가 바뀌는 시간(2 usec) 동안의 데이터는 사용하지 않고 버리고, 스위치가 바뀐 후 2 usec의 시간의 위상을 측정한다. 보통 250 kHz의 low IF 신호를 4 MHz 주파수로 샘플링한다면 2 usec의 데이터 샘플은 8개 샘플에 해당하면 한 주기에 해당한다. 안테나 간의 위상차는 보정이 필요할 뿐만 아니라, 수신기의 LO의 변화에 따라라도 변화하므로 규격에서는 전체 CTE 구간인 160 usec 동안 총 37번까지 안테나 간의 위상차를 구하고, 이를 평균하여 잡음을 제거하도록 하고 있다.

다음으로 Bluetooth 5.1에서는 그림 5와 같이 송신기에 배열 안테나가 있는 경우를 AoD(angle of departure)라고 분리하여 명칭하고 있다. AoD에서는 CTE 구간에 중심주파수로부터 250 kHz 높은 정현파 신호를 송신하는 것은 동일하나, 안테나 간의 스위칭 구간의 데이터 오류는 제거해야 하므로 이를 위해서 송신부 스위칭 구간 동안에 데이터를 송신하지 않도록 하는 것만 차이가 있다.

IV. 2소자 스위치 배열 안테나 실험

앞에서 살펴본 스위치 배열 안테나를 실제 제작하고, 이를 활용하여 신호의 방향을 탐지하는 실험을 진행하였다. 동작주파수는 국내 IoT 주파수 대역인 910 MHz 대역을 사용하였으며, 사용한 안테나는 자체 제작한 비발디 안테나를 사용하였다. 그림 2의 SPDT 스위치를 $\lambda/2$ 떨어진 2개의 수신 안테나에 연결하여 2소자 스위치 배열 안테나를 구성하였다. 신호처리를 위해 SDR(software defined radio)을 스위치 출력단자에 연결하여 방향탐지 시스템을 완성하였다. SDR 출력은 USB 케이블을 통해 PC로 연결된다. PC에서는 MATLAB/Simulink를 통해 SDR의

I/Q신호를 수신할 수 있다^[9]. 이렇게 수신된 I/Q신호를 기반으로 Matlab/Simulink에서 실시간으로 SDR을 제어함과 다양한 빔포밍 알고리즘이 구현된다. 본 실험에서는 참고 문헌 [10]에서 제시한 방향탐지 알고리즘을 MATLAB으로 구현하여 적용하였다.

실험은 특별한 전파 차폐시설이 없는 일반 실험실 환경에서 진행하였다. 먼저, 송신기는 Sub-GHz 대역인 910.01 MHz의 CW(continuous wave) 신호를 RF신호발생기(AgilentTM N5182)로 생성한 후, 나무로 만들어진 삼각플대에 설치된 지향성 비발디 안테나를 통해 수신안테나 방향을 신호를 송신하도록 하였다. 수신안테나는 사무책상 위에 설치하였다. 송신안테나와 수신안테나 사이의 거리는 1.3 m로 일정하게 유지한 상태에서 송신안테나의 위치를 조정하였다. 각도는 -30° 에서부터 $+30^\circ$ 까지 10° 간격으로 방향탐지 성능을 확인하였다. SPDT 스위치와 안테나 연결 시 케이블을 사용하였으나, 위상오차가 5° 정도로 측정되어 5° 이하의 결과가 나온다면 제작한 스위치 배열 안테나 기반 방향탐지 시스템이 적절하게 동작한다고 판단할 수 있다. 사용된 SDR은 저가의 RTL-SDR을 사용하였고, RTL-SDR의 수신 주파수는 Simulink로 조정할 수 있는데, 이 값을 Low-IF 구조가 되도록 910.0 MHz로 조정하여 송수신 주파수차 Δf 를 10 kHz가 되도록 하였다.

측정결과와 그림 6(b)와 같다. 특별한 교정과정이나 전파 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 철제문이나 계측기가 설치된 철제 캐비닛 등의 영향을 받는 것으로 판단된다. 이러한 실험을 통해 스위치 배열 안테나를 IoT 무선통신에 쉽게 적용할 수 있음을 알 수 있고, 최소한의 하드웨어만으로 다양한 빔포밍 알고리즘이 디지털 신호처리로 구현될 수 있음을 확인할 수 있었다.

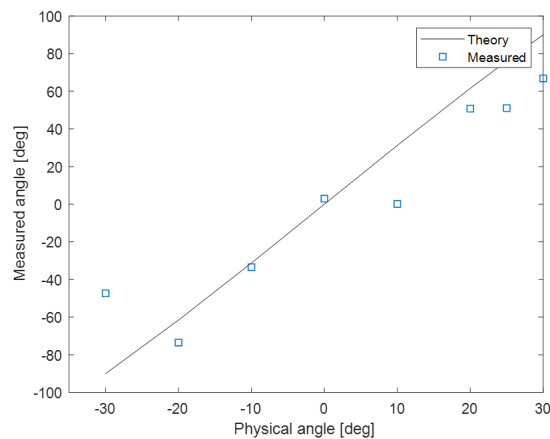
V. 결 론

본 논문에서는 최근 관심이 집중되고 있는 스위치 배



(a) 스위치 배열 안테나 실험 환경

(a) Measurement environment of switched array antenna



(b) 측정 결과

(b) Measured results

그림 6. 스위치 배열 안테나 실험 환경 및 결과

Fig. 6. Measurement of switched array antenna and results.

열 안테나 빔포밍 기술의 특징과 함께 최근 발표된 블루투스(Bluetooth) 5.1 규격의 적용 사례를 살펴보았다. 또한, 2소재 스위치 배열 안테나를 제작하여, 방향탐지 시스템을 구축한 결과 성공적으로 방향탐지가 가능함을 확인하였다. 본 논문을 통해 스위치 배열 안테나 구조는 IoT 무선통신에 적용될 경우, 저전력 복잡한 하드웨어가 필요없이도 다양한 빔포밍 기술의 장점을 취할 수 있음을 알 수 있었다. 앞으로 Bluetooth 외에도 다양한 저전력 IoT 무선통신이나 생활형 레이다 분야에서 스위치 배열 안테나 기반 빔포밍 기술이 다양하게 적용될 것으로 사료된다.

References

- [1] F. Gross, *Smart Antennas for Wireless Communications with MATLAB*, New York, NY, McGraw Hill, 2005.
- [2] J. W. Yu, "MIMO/3-D beamforming antenna," *The Proceeding of the Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 25, no. 6, pp. 3-11, Nov. 2014.
- [3] 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.
- [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] 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*, 2019, pp. 53-65.
- [6] Peregrine Semiconductor, "PE4251 Datasheet," 2019. <https://www.psemi.com/products/rf-switches/pe4251>
- [7] 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.
- [8] M. Miyazawa, J. Mitsugi, Y. Kawakita, and H. Ichikawa, "Monopulse switching to cancel phase offset in array antenna comprising multiple COTS SDRs," in *2016 International Conference on RFID Technology and Applications(RFID-TA)*, Sep. 2016, pp. 21-23.
- [9] R. W. Stewart, K. W. Barlee, *Software Defined Radio Using MATLAB & Simulink and the RTL-SDR*, Glasgow, Strahclyde Academic Media, 2015.
- [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.

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

용 지 호 [국민대학교/석사]

<https://orcid.org/0000-0003-2511-877X>



2011년 9월: 삼아대학교 전자정보공학과 (공학사)

2016년 2월: 고려대학교 어학원

2020년~현재: 국민대학교 전자공학과 석사과정

[주 관심분야] 통신시스템, 실내 무선 빔포밍

추 호 성 [홍익대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0002-8409-6964>



1998년 2월: 한양대학교 전파공학과 (공학사)

2000년 8월: 미국 University of Texas at Austin 전자전기공학부 (공학석사)

2003년 5월: 미국 University of Texas at Austin 전자전기공학부 (공학박사)

2003년 6월 ~ 현재: 홍익대학교 전자전기

공학부 교수

[주 관심분야] 초소형 안테나, 최적화 알고리즘을 이용한 안테나 설계, 차량 및 항공기 안테나