

2-소자 모노펄스 안테나와 I/Q 복조기를 이용한 4-빔 방향탐지

Four-Beam Direction Finding Using Two-Element Monopulse Antenna and I/Q Demodulator

장 병 준

Byung-Jun Jang

요 약

일반적으로 배열 안테나 기반의 방향탐지 시스템은 안테나 개수와 동일한 개수의 수신기를 갖는 디지털 빔포밍 방식으로 구현하거나, 수신기는 하나이지만 복수개의 위상천이기를 갖는 RF 빔포밍 방식으로 구현한다. 두 경우 모두 하드웨어 구성이 복잡하다는 단점이 있다. 본 논문에서는 위상천이기 없이도 I/Q 복조기의 직교성을 이용하여 수신기 1개와 2개의 안테나 만으로 4개의 빔패턴을 생성하여 방향탐지할 수 있는 새로운 방법을 제안하였다. 제안한 방법은 180° 하이브리드를 이용한 합/차 패턴과 I/Q 복조기의 직교성을 이용하는 것이다. 제안의 타당성을 검증하기 위하여 블루투스 응용에 위한 컴퓨터 모의실험을 수행하였다. 모의실험 결과 제안한 방식으로 방향탐지 시스템을 효과적으로 구현할 수 있음을 검증하였다.

Abstract

In general, a direction finding system based on array antennas is implemented using a digital beamforming method with the same number of receivers as antennas, or using an RF beamforming method where a single receiver has a plurality of phase shifters. However, both approaches require complicated hardware configurations, which is a major disadvantage. In this paper, we propose a new method to generate 4-beam patterns using only two antennas and a single receiver with a sum and difference pattern of 180° hybrid, and the orthogonality of an I/Q demodulator. To verify the proposed method, we applied it to a Bluetooth direction finding system. The simulation results demonstrated that it is possible to implement an effective direction finding system using the proposed method.

Key words: Direction Finding, Beam-Ofing, RF Switch, Time Modulated Array, Angle of Arrival

I. 서 론

지금까지 방향탐지 기술은 주로 국방이나 전파감시 분야에서 주로 사용되어왔으나, 최근 5G 이동통신, 무선 LAN 등으로 그 응용이 확대되고 있다. 심지어는 Bluetooth와 같은 저전력 IoT(Internet of Things) 시스템에서도 최근

위치기반 서비스를 위한 방향탐지 기술이 도입되고 있다^[1].

일반적으로 배열안테나 기반의 방향탐지 시스템의 구성은 디지털단에서의 빔을 형성하는 법과 RF단에서의 빔을 형성하는 것으로 구분할 수 있으며, 두 방식 모두 동시에 생성할 수 있는 빔의 개수는 수신기의 개수와 동일하다. 따라서 저전력 응용을 위해 수신기가 하나밖에 없는

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

국민대학교 전자공학과(Department of Electrical Engineering, Kookmin University)

· Manuscript received July 2, 2019 ; Revised September 17, 2019 ; Accepted October 16, 2019. (ID No. 20190702-006S)

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

경우, 위상천이기나 Butler Matrix 등의 RF 회로를 이용하여 복수개의 빔을 구성한 후 스위치를 이용하여 순차적으로 수신기에 연결하는 RF 빔포밍 방식으로 구현된다. 하지만 RF 빔포밍 회로는 파장의 함수이므로, 수 GHz 이하에서는 회로의 크기가 커져 사용하기 어렵고, 빔이 시간에 따라 순차적으로 생성되므로 목표물이 빠르게 이동하는 경우 성능이 저하된다^{[2]~[4]}.

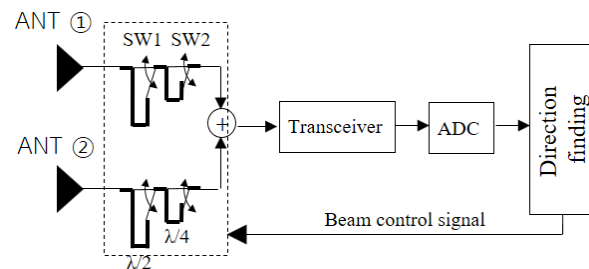
따라서 Bluetooth와 같은 저전력 시스템에 방향탐지 기술이 적용될 경우, 구현이 간단한 RF스위치를 이용하여 빔포밍 회로를 구현하는 연구가 시도되고 있다. 예를 들어 RF 스위치를 ON/OFF 시간을 조절하여 하모닉 빔을 형성하는 TMA(Time Modulated Array) 방식^[5]이나, 안테나를 선택적으로 ON/OFF하는 OABF(On-off Analog Beam Forming) 방식^[6] 등이 제안되고 있다. 하지만 안테나가 2개밖에 없는 경우, 빔을 2개밖에 구현할 수 없어 방향탐지 성능에 한계가 있다.

이에 본 논문에서는 2개 안테나와 하나의 수신기가 있는 방향탐지 시스템에서 4개의 빔을 갖는 획기적인 방법을 제안한다. 제안한 방식은 2-소자 모노펄스 안테나의 합/차 패턴과 직접변환 방식의 무선통신 수신기에서 일반적으로 사용되는 I/Q 복조기의 직교성을 유기적으로 결합하는 방법이다. 제안한 방식은 I/Q 복조기가 90° 위상차를 갖는 두 개의 신호(I와 Q)를 출력한다는 점에 착안하여 이를 180° 하이브리드와 RF 스위치와 결합함으로써 2개의 안테나 간에 -90°, 0°, 90° 및 180°의 4가지 위상차를 갖도록 하는 것이다. 제안한 방식은 한 번의 스위치 조절만으로 4개의 빔을 생성할 수 있을 뿐만 아니라, 하드웨어가 간단하므로 저가로 방향탐지 시스템을 구현해야만 하는 저전력 IoT 무선통신에 적용될 수 있을 것이다.

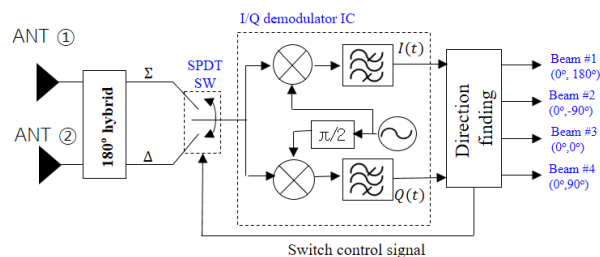
본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저 II장에서 제안한 방향탐지 방식의 동작원리를 설명하고, III장에서 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 검증한다. 마지막으로 IV장에서 결론을 맺는다.

II. 제안 아이디어

2소자 안테나를 갖는 단일채널 방향탐지 시스템을 구현하기 위해서는 그림 1(a)와 같이 스위치와 지연선로를



(a) 2 bit 위상천이기를 갖는 2소자 방향탐지
(a) 2-element direction finding with 2 bit phase shifter



(b) 제안한 방향탐지 방법
(b) RF beamforming with 2 bit phase shifter

그림 1. 일반적인 빔포밍 안테나 구성

Fig. 1. Configuration of general beamforming antenna.

이용한 디지털 위상천이기 4개를 이용한 RF 빔포밍 방식으로 구현하여야 하는데, 이 경우 수 GHz 이하로 주파수가 낮을 경우 위상천이기의 크기가 커져 구현이 어려워진다. 물론 집중정수 소자를 이용하여 RFIC로 설계할 수 있으나, 이 경우 전력소모 및 가격이 비싸지는 문제가 발생한다^[7]. 특히, 180° 위상천이기는 크기가 커서 구현이 쉽지 않다. 또한, 한번에 하나의 빔이 형성되므로 총 4번의 스위치 조절이 필요하다.

이러한 단점을 극복하기 위하여 본 논문에서 제안한 방식은 그림 1(b)와 같다. 제안한 방식은 별도의 위상천이기 없이 180° 하이브리드, SPDT(Single Pole Double Throw) 스위치만을 추가하여 0° 위상과 180° 위상을 구현하고, I/Q 복조기에 내장된 90° 위상천이기와 결합하여 ±90° 위상차를 만들어 낼 수 있다. 최근 디지털통신 수신기는 대부분 직접변환 방식의 I/Q 복조기를 사용하며, 동위상 성분인 I(In-phase) 신호와 I신호와 90° 위상차를 갖는 Q(Quadrature-phase) 신호를 생성하기 위하여 90° 위상천이기를 내장하고 있으므로 이를 재활용하는 것이다.

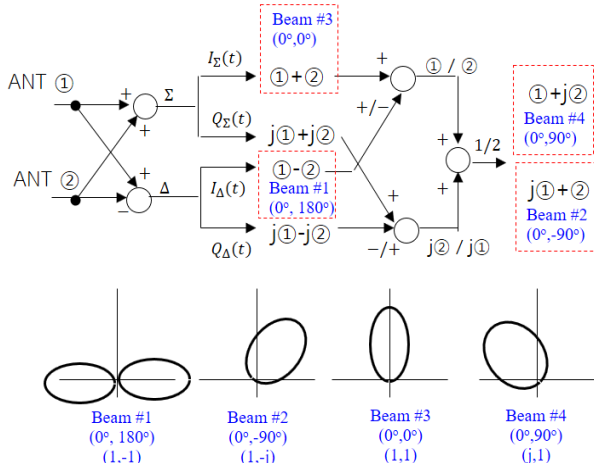


그림 2. 제안한 방식의 빔형성 과정

Fig. 2. Multi-beam generation precedure of suggested method.

그림 2는 제안한 2-소자 모노필스 안테나와 I/Q 복조기를 이용한 4빔 형성과정을 보여준다. 송신기가 특정시간에 식 (1)과 같이 s_0 의 심볼 데이터를 주파수 상향변환하여 신호 $s(t)$ 를 송신한다고 가정한다.

$$s(t) = A s_0 \cos(\omega_0 t + \phi_0) \quad (1)$$

여기서 A 는 송신신호의 크기, ω_0 는 반송파신호의 각주파수, ϕ_0 는 초기위상에 해당되며, 여기서는 0이라 가정한다. 수신기는 반파장 떨어진 두 개의 안테나로 구성되는 경우, 수신신호는 far-field를 가정하여 평면파 근사하면 각각 $r(t)$ 와 $r(t)e^{j\theta}$ 가 된다. 여기서 $\theta = (\lambda/2)\sin\phi$, ϕ 는 수신안테나의 중심을 기준으로 송신기의 안테나 사이를 이루는 각도가 된다. 예를 들어 수신안테나와 송신안테나가 직선으로 정렬된 경우 ϕ 는 0° 가 된다. 이 안테나 출력은 180° 하이브리드를 거쳐 두 안테나 신호의 합(Σ) 또는 차(Δ)를 출력하게 된다. 하이브리드의 출력은 RF 스위치에 의해 선택할 수 있으므로 RF 스위치의 출력 $y(t)$ 는 식 (2)와 같이 주어진다.

$$y(t) = \begin{cases} r(t) + r(t)e^{j\theta}, & \text{or} \\ r(t) - r(t)e^{j\theta}; \end{cases} \quad (2)$$

이제 직교복조기에 의해 기저대역으로 변환되어 출력된 I신호와 Q신호는 스위치 상태에 따라 식 (3) 및 식 (4)

와 같이 주어진다. 이때 크기는 수신과정에서 정규화하였다고 가정한다.

$$I(t) = \begin{cases} s_0 + s_0 e^{j\theta}, & \text{or} \\ s_0 - s_0 e^{j\theta}; \end{cases} \quad (3)$$

$$Q(t) = \begin{cases} j(s_0 + s_0 e^{j\theta}), & \text{or} \\ j(s_0 - s_0 e^{j\theta}); \end{cases} \quad (4)$$

이제 식 (3)과 식 (4)로부터 다음과 같은 4개의 빔코딩 벡터를 구할 수 있다. 180° 하이브리드 출력이 동위상으로 더해지도록 스위치를 조정할 경우, I와 Q데이터의 심볼을 각각 I_Σ , Q_Σ 라 하고, 180° 하이브리드 출력이 마이너스 위상으로 더해지도록 스위치를 조정할 경우, I와 Q데이터의 심볼을 각각 I_Δ , Q_Δ 라 하자. 그러면 4개의 빔벡터는 각각 식 (5)와 같이 주어진다.

$$\begin{bmatrix} 1, -1 \\ 1, -j \\ 1, 1 \\ 1, j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_0 - s_0 e^{j\theta} \\ s_0 - j s_0 e^{j\theta} \\ s_0 + s_0 e^{j\theta} \\ s_0 + j s_0 e^{j\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_\Delta \\ (I_\Sigma + I_\Delta)/2 + (Q_\Sigma - Q_\Delta)/2 \\ I_\Sigma \\ (I_\Sigma - I_\Delta)/2 + (Q_\Sigma + Q_\Delta)/2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

식 (5)의 첫 번째 행인 빔 (1, -1)은 두 안테나의 출력이 차(Δ) 상태로 더해진 경우로 각각의 안테나에 $(0^\circ, 180^\circ)$ 위상이 더해진 경우에 해당한다. 세 번째 행은 두 안테나의 출력이 동위상으로 더해진 합(Σ) 상태일 경우로 각각의 안테나 출력이 바로 더해지는 경우이다. 두 번째 행의 빔은 식 (3)의 첫 번째 식과 두 번째 식을 더하여 $2s_0$ 를 만들고, 식 (4)의 두 식을 빼서 $j2s_0 e^{j\theta}$ 를 만든 후 두 식을 빼고 2로 나누는 경우로 두 안테나의 출력에 각각 $(0^\circ, -90^\circ)$ 의 위상이 더해진 경우가 된다. 마지막 행의 빔은 식 (3)의 첫 번째 식과 두 번째 식을 더하여 $2s_0$ 를 만들고, 식 (4)의 두 식을 빼서 $j2s_0 e^{j\theta}$ 를 만든 후 두 식을 더하고 2로 나누는 경우로 두 안테나의 출력에 각각 $(0^\circ, 90^\circ)$ 의 위상이 더해진 경우가 된다. 이와 같이 본 논문에서 제안한 방식은 심볼구간 중간에 스위치를 한 번만 조정함으로써 입사각도에 따라 4개의 빔에 해당되는 크기의 변화를 가상으로 구하는 방식이다.

표 1. 입사각도에 따른 빔별 크기

Table 1. Magnitude of beam as a function of incidence angles.

Incidence angle [degree]	Phase difference θ [rad]	Beam #3 (0°, 0°)	Beam #1 (0°, 180°)	Beam #4 (0°, 90°)	Beam #2 (90°, 0°)
0	0	s_0	0	$s_0/2$	$s_0/2$
30	$\pi/2$	$s_0/2$	$s_0/2$	s_0	0
-30	$-\pi/2$	$s_0/2$	$s_0/2$	0	s_0

이를 기초로 수신신호의 입사각이 0°, 30°, -30°인 3가지 경우에 대한 각각의 빔에 대한 크기 변화는 표 1과 같다. 입사각도가 0°인 경우 빔벡터 (0°, 0°)인 SUM 빔에서 최대값이 나오는 반면 (0°, 90°)빔과 (0°, -90°)빔의 경우 크기가 반으로 줄어들게 된다. 반면 입사각도가 30°인 경우는 (0°, 90°)인 빔에서 최대값이 나오며, 입사각도가 -30°인 경우는 (0°, -90°)인 빔에서 최대가 됨을 알 수 있다. 이와 같이 제안한 방식을 이용하면 복잡한 위상천이 없이도 2소자 안테나의 경우 4개의 빔을 간단히 생성할 수 있음을 알 수 있다.

III. 시뮬레이션 검증

제안한 방식을 검증하기 위하여 Bluetooth 5.1 규격에 적용하였다. Bluetooth 5.1에서는 Bluetooth 패킷의 끝에 CTE(Constant Tone Extension)라는 CW 신호를 전송한다. Bluetooth 송신기는 주파수 편차 ± 250 kHz를 갖는 FSK(Frequency Shift Keying) 변조방식을 사용하는데, 만약에 '0'과 '1'이 랜덤하게 분포하는 디지털신호 대신에 '1'이 연속으로 있는 신호의 경우, 중심주파수보다 +250 kHz 높은 CW 신호가 송신되므로 이를 CTE 구간에서 사용한다^[3].

이렇게 송신된 중심주파수보다 +250 kHz 높은 CW 신호를 수신한 BLE 수신기는 각각의 안테나에 입력된 신호의 위상차를 계산하여 BLE 송신신호의 입사각을 계산하게 된다. 이 때 RF 스위칭이 이루어지는 시간(2 μ sec)은 오차가 있을 수 있으므로 제외하고, 스위칭 동작이 완료된 후 2 μ sec의 시간만큼 각각의 안테나에서 수신된 데이터를 비교한다. 만약 두 개의 안테나가 반파장 떨어져 있을 때 수신안테나에 수직방향에서 입사되는 신호는 두

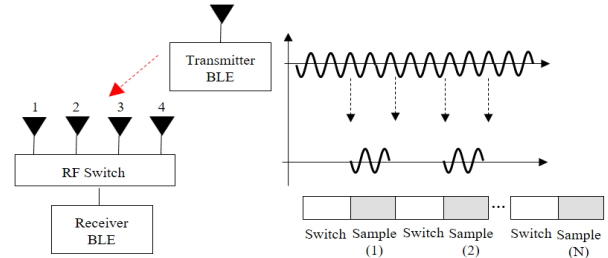


그림 3. Bluetooth 5.1 규격의 방향탐지 원리

Fig. 3. Principle of Bluetooth 5.1 direction finding.

안테나 간 위상차가 없다. 하지만 특정 방향에서 수신되는 신호는 두 안테나 간 위상차가 발생하는 원리를 이용하는 것이다. 하지만, 국부발진기의 주파수 편차에 의한 오차나 반송파 주파수의 차이에 의해 위상이 변하게 되므로 이에 대한 적절한 교정 및 보상이 필수적이다^{[1],[8]}.

이러한 Bluetooth 5.1 규격에 본 논문에서 제안한 방식을 적용하여 컴퓨터 모의실험을 실시하였다. 본 논문에서 제안한 방식은 동일한 심볼을 송신하는 경우에 적용될 뿐만 아니라, Bluetooth와 같이 beacon 신호를 전송할 때에도 적용될 수 있다. 먼저 신호의 입사각도를 안테나에 수직인 면을 기준으로 각각, 0°, 10° 및 30°로 입사될 경우 I신호와 Q신호의 변화가 그림 4에 나타나 있다. Bluetooth 규격처럼 처음 2 μ sec 간격으로 신호의 출력과 스위칭 구간으로 정하고, 10 μ sec 동안 신호의 파형 변화를 관찰하였다. 처음 2 μ sec는 합 신호가 다음의 4 μ sec에서 6 μ sec의 시간구간은 차 신호가 출력된다. 0°방향으로 입사되는 경우에는 차 신호가 0이며, 각도가 커짐에 따라 차신호의 크기가 커짐을 알 수 있다.

다음으로 180° 하이브리드 만을 이용하여 모노펄스 방식으로 2개의 빔만을 형성하는 경우와 본 논문에서 제안한 4개의 빔을 형성하는 경우의 성능을 비교하였다.

I/Q 복조기를 사용하지 않고 모노펄스 방식만을 사용하는 경우, 빔이 합빔과 차빔의 2개가 있으므로 방향을 추정하기 위해서는 합과 차의 출력의 비(R)를 구하여야 한다. R 을 dB 단위로 표시하면 식 (6)과 같이 주어진다.

$$R = 10 \log \frac{|I_{\Sigma} + jQ_{\Sigma}|}{|I_{\Delta} + jQ_{\Delta}|} \quad (6)$$

그림 4의 결과를 이용하여 모노펄스 방식만을 사용하

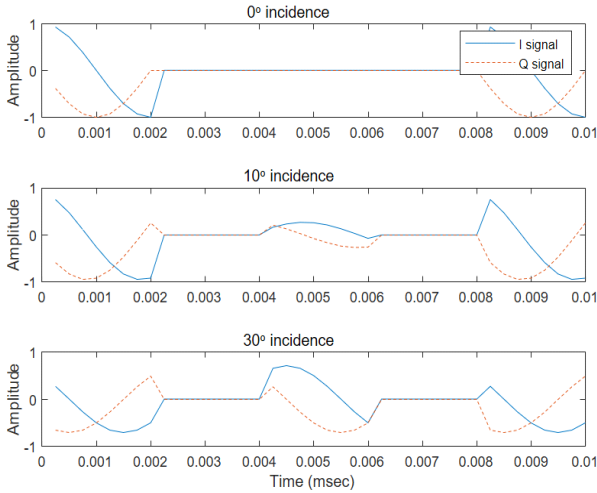


그림 4. 입사각의 함수로서의 I와 Q
Fig. 4. I and Q as a function of incident angle.

는 경우, 결과는 그림 5의 실선과 같다. 그림에서 보는 바와 같이 안테나에 수직으로 입사하는 경우에는 최대값을 가지며, 입사각도가 수직에서 벌어짐에 따라 크기가 작아지게 된다. 수직에서 $\pm 30^\circ$ 위치에서 합 신호와 차 신호의 크기는 같아지며, 그 이상으로 입사각도가 커지면 차 신호가 합 신호보다 더 커지게 된다. 그림 5에서 알 수 있듯이 모노펄스 방식만을 사용할 경우, 좌우 입사각의 구분이 어려울 뿐만 아니라, 각도에 따라 변화가 크므로 방향탐지에 대한 상대민감도가 각도에 따라 차이가 큼을 알 수 있다.

반면, 본 논문에서 제안한 방식을 이용하면 한 번의 스위치 동작만으로 입사각도에 따라 4개의 빔 별 크기의 변화를 알 수 있으므로 방향탐지 성능이 우수하다. 제안한 방식의도대로 방향을 탐지하기 위해서는 식 (5)를 이용하여 입사각도에 따른 4개의 빔의 크기 변화를 구하고, 각도별로 4개의 빔 중에서 가장 크기가 큰 빔 2개를 추출한 후 그 크기의 비를 비교하는 과정이 필요하다. 이러한 과정은 간단한 프로그래밍으로 가능하므로 쉽게 구현할 수 있다. 또한 그림 5에 나타낸 바와 같이 제안한 방식의 경우, 안테나 정면의 180° 전체에 대하여 가장 큰 빔 2개의 크기의 변화는 ± 2 dB의 범위 내에 존재하므로 각도에 변화에 따른 방향탐지 성능의 열화가 없다는 장점이 있음을 알 수 있다.

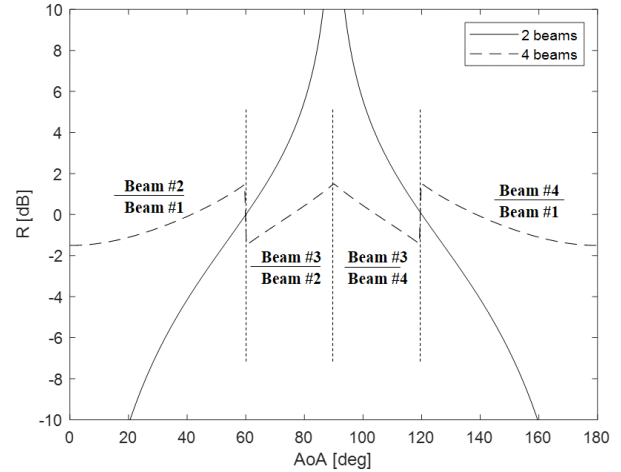


그림 5. 입사각도와 빔 선택에 따른 방향탐지 성능 비교
Fig. 5. Performance comparison of monopulse system and our suggested system as a function of incident angle.

IV. 결 론

본 연구에서는 단일채널 방향탐지 시스템에서 구현이 어려운 위상천이기를 사용하지 않고도 4개의 빔을 생성할 수 있는 새로운 빔형성 아이디어를 제안하였다. 제안한 아이디어는 직교변환방식의 수신기에서 일반적으로 사용하는 I/Q복조기에 내장된 90° 위상천이를 이용하여, 180° 하이브리드와 RF스위치만을 이용하여 안테나 간의 위상차를 다양하게 생성하는 것이다. 이렇게 함으로써 위상천이기가 없이도 2개의 안테나만으로 4개의 빔을 갖는 빔포밍 시스템을 구현할 수 있었다. 제안한 방식은 하드웨어가 간단하여 저자격으로 시스템을 구성할 수 있다. 또한 심볼 내 스위치의 한 번의 조작만으로도 4개의 빔에 해당하는 크기를 구할 수 있으므로 beacon 방식 외에 다양한 디지털통신 방식에 적용할 수 있다. 향후 본 연구의 아이디어를 바탕으로 실제 방향탐지시스템을 제작하여 검증할 예정이다.

References

- [1] 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.
- [2] S. Park, S. Kim, J. Sohn, and H. Shin, "Design of a 28 GHz switched beamforming antenna system based on 4×4 butler matrix", *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 26, no. 10, pp. 875-884, Oct. 2015.
- [3] J. S. Song, S. Seo, H. J. Kim, S. C. Cho, and J. H. Oh, "Design of beamforming scheme using single RF chain based on SPA antenna", *The Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences*, vol. 41, no. 6, pp. 689-697, Jun. 2016.
- [4] J. Wang, Z. Lan, C. S. Sum, C. W. Pyo, J. Gao, and T. Baykas, et al., "Beamforming codebook design and performance evaluation for 60 GHz wideband WPANs", in *2009 IEEE 70th Vehicular Technology Conference Fall*, Anchorage, AK, 2009, pp. 1-6.
- [5] 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.
- [6] S. Zhang, C. Guo, T. Wang, and W. Zhang, "On-off analog beamforming for massive MIMO", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 67, no. 5, pp. 4113-4123, May 2018.
- [7] M. Hangai, M. Hieda, N. Yunoue, Y. Sasaki, and M. Miyazaki, "S- and C-band ultra-compact phase shifters based on all-pass networks", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 58, no. 1, pp. 41-47, Jan. 2010.
- [8] 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, India, 2019, pp. 53-65.

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, 무선통신시스템, 전파응용