

## 방향탐지기술: 튜토리얼, 최신동향 및 연구전망

### Direction Finding Technology: Tutorial, Review, and Research Prospects

장 병 준

Byung-Jun Jang

#### 요 약

방향탐지는 원래 전파감시 분야에 사용되는 전통적인 기술이었다. 또한 레이더에서 목표물의 방향을 탐지하는 것은 기본적으로 안테나기반 방향탐지 기술을 사용하므로 레이더 분야의 핵심기술이 되었다. 최근에는 이동통신기술이 MIMO 기반의 다중안테나를 사용함에 따라 이동통신 분야의 핵심기술이 되었고, 심지어 블루투스(Bluetooth) 등 IoT 분야에서도 방향탐지 기술을 사용하려는 시도가 확대되고 있다. 이와 같이 다양한 분야에서 방향탐지 기술의 중요성이 높아지고 있지만, 아직까지도 전파감시, 레이더, 무선통신의 하위기술로서 별개로 다루어지고 있는 상황이다. 이에 본 논문에서는 독자들이 방향탐지 기술을 체계적으로 이해하는데 도움을 주고자 방향탐지기술을 그 원리를 기준으로 체계적으로 분류하고, 각각의 특징과 최신 연구개발 동향을 중심으로 분석하였다.

#### Abstract

Direction finding is a traditional technique that was initially used in radio surveillance. Since its inception, antenna-based direction finding technology has become the core technology in various fields, such as radar(to find the direction of the target) and mobile communication(where MIMO-based multi-antennas are used). Moreover, use of the direction finding technology in the field of IoT, such as in Bluetooth, is increasing. Thus, the importance of direction finding technology is growing in various fields. However, it continues to be treated as a sub-technology of radio surveillance, radar, and wireless communication. The aim of this paper is to help readers systematically understand direction finding technology. Accordingly, a systematic classification and analysis of each characteristic of direction finding technology, along with recent research and development trends for it, are discussed in the paper.

Key words: Direction Finding, Angle of Arrival, Radar, MIMO, Beamforming, Localization

#### I. 서 론

방향탐지(direction finding: DF)는 오래전부터 전파감시, 레이더, 그리고 무선통신 분야에서 중요한 주제였으며, 그동안 군방 및 민수 분야 모두에서 많은 연구가 진행되어 왔다<sup>[1]</sup>. 레이더는 전파를 사용하여 목표물의 거리, 방

향, 속도를 측정하는 기술인데, 거리와 속도는 레이더의 송신파형과 수신 파형 간의 변화를 이용하여 측정하는데 반하여, 방향은 레이더기술이라기보다는 DF 기술을 이용한다고 볼 수 있다. 무선통신의 경우에는 정보전달이 중요하므로 송신기의 방향 또는 위치를 아는 것이 그동안 주요 관심사가 아니었으나, 최근 MIMO(Multiple-Input

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

국민대학교 전자공학과(Department of Electrical Engineering, Kookmin University)

· Manuscript received August 1, 2019 ; Revised August 26, 2019 ; Accepted August 26, 2019. (ID No. 20190801-001S)

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

Multiple-Output) 기반의 다중안테나 신호처리기술이 일반화됨에 따라 디지털 빔포밍을 이용한 다양한 DF 기술의 적용되고 있다. 예를 들어 이동통신에서는 LTE 규격에서 빔포밍 기술이 도입된 이후 5G부터는 빔포밍 기반 DF 기술이 일반화되고 있고, Wi-Fi에서도 MIMO 기반 DF 기술이 기본적으로 포함되어 있다. 게다가 2019년 발표된 Bluetooth 5.1 규격과 같은 저전력시스템에서도 DF 기술이 포함됨에 따라 DF 기술의 응용범위는 모든 통신 분야로 확대될 전망이다<sup>[2]~[4]</sup>.

이와 같이 다양한 분야에서 DF 기술의 중요성이 높아지고 있지만, 아직까지도 DF 기술은 전파감시, 레이다, 무선통신의 하위기술로서 별개로 다루어지고 있는 상황이다. 심지어는 DF라고 하면 불법무선국을 관리하기 위해 사용되는 고성능 광대역 전파감시장치라는 선입견이 강한 것도 사실이다<sup>[5]</sup>. 물론 전파감시기술이 DF의 핵심 응용분야이긴 하지만, 이러한 선입견은 앞으로 중요도가 높아지고 있는 DF 기술의 확산에 걸림돌이 될 수 있다. 이에 본 논문에서는 특정 분야에 치우치지 않고 DF의 핵심원리부터 최신 응용까지 전체적으로 살핍으로써 독자들이 DF 기술을 체계적으로 이해할 수 있도록 하는데 그 목적이 있다.

일반적으로 DF 기술은 송신기의 포함 여부에 따라 능동형(active) 방식과 수동형(passive) 방식으로 분류할 수 있다. 능동형 방식은 레이다에서 볼 수 있는데, 신호를 송신한 후 이 신호가 목표물에 맞고 역산란되는 신호를 수신하여 목표물의 방향을 탐지하게 된다. 반면에 무선통신에서는 송신기없이 수신기만으로 다른 송신기에서 송신된 신호를 분석하여 송신기의 방향을 탐지하는 수동형(passive) DF 기술을 사용하게 된다. 수동형 DF 기술은 다시 위치기반 서비스 등의 목적으로 특정 송신기의 신호만을 찾는 협대역 DF와 전파감시 등의 목적으로 불특정 무선통신의 방향탐지를 위한 광대역 DF로 나눌 수 있다. 이러한 분류방식은 DF 기술의 응용 및 하드웨어 구성에 따라 분류한 것으로 DF 기술의 원리와는 큰 관련이 없다.

이에 본 논문에서는 DF 원리를 기준으로 표 1과 같이 DF 기술을 분류하였다. 이는 기본적으로 DF 기술이 안테나의 특성을 이용하여 방향을 계산하는 안테나기술임에 착안한 것이다. 먼저 DF 기술을 배열안테나의 특성을 이

표 1. 방향탐지 기술의 분류

Table 1. Classification of direction finding technologies.

		Technology
DF based on antenna directivity		- Directional antenna maximum-signal DF - Monopulse DF
DF based on array antenna	Single channel	- Pseudo-doppler DF - Beam-switching array - Time modulated array (TMA) - Phase comparison interferometer
	Multiple channel	- Classical DF - Subspace DF - Neural network, AI based DF

용하는지 여부에 따라 분류하였다. 안테나 지향성 기반 DF는 배열안테나 특성을 이용하지 않고 안테나의 지향성 특성만을 이용한 것이다. 다음으로 배열안테나 기반 DF는 다시 배열안테나의 특성을 이용하되 수신기는 하드웨어의 복잡성을 피하기 위하여 싱글채널로 구성하는 방법과 안테나별 다중채널로 구성하는 것으로 분류될 수 있다. 싱글채널의 경우 하드웨어의 구성에 따라 분류하였고, 다중채널의 경우에는 하드웨어는 동일하나 다양한 DF 알고리즘을 구현할 수 있어 일반적으로 어떤 알고리즘을 사용하느냐에 따라 분류되므로 이를 따랐다.

본 논문의 구성은 표 1에 분류된 순서대로 DF 기술의 원리와 특징, 장단점 등을 설명한다. 특히, 각각의 최신 응용 예 및 연구 전망을 포함하고 마지막에 결론을 맺는다.

## II. 안테나 지향성 기반 DF

일반적으로 안테나 자체가 지향성이 높으면 빔폭이 좁아진다. 따라서 빔폭이 좁은 안테나에 신호가 입력되는 경우 빔폭의 지향각도가 바로 송신기나 목표물의 방향이라고 할 수 있다. 하지만 빔폭이 좁다는 것은 방향탐지할 각도가 좁음을 의미하므로 빔폭은 좁으면서도 방향탐지 각도는 넓을 필요가 있다.

### 2-1 지향성 안테나 이용 DF

먼저, 정확한 DF와 넓은 DF 각도를 동시에 얻기 위해 빔폭이 좁은 안테나를 기계적으로 회전시키면서 각각의

회전각도별 신호의 크기를 측정하고, 가장 큰 신호세기가 수신되는 회전각도를 송신기의 방향으로 찾는 DF 방법이 있다. 이 방식은 사람이 지향성 안테나를 들고 움직이거나 모터를 이용하여 일정한 속도로 안테나를 회전시키는 방식인데, 빔폭이 좁은 지향성 안테나 하나와 수신기 하나만으로도 360° 전 범위를 갖는 DF 시스템을 구현할 수 있다. 따라서 초창기 레이더 등에 광범위하게 보급되었다. 하지만 DF할 신호원이 기계적인 회전시간보다 짧은 시간 간격으로 송신하는 신호라면 DF 시스템이 탐지 못할 확률이 있다. 또한 기계적인 회전에 따른 마모, 회전하는 안테나와 수신기의 연결의 어려움 등의 문제가 발생할 수 있다. 이러한 문제는 레이더 시스템에 치명적인 단점이 된다. 이러한 단점에도 불구하고, 시스템이 간단하므로 지금도 다양한 분야에서 사용되고 있다. 그림 1에 지향성 안테나를 이용한 최대신호기반 DF 시스템의 동작원리를 보여준다. 지향성 안테나의 회전각도에 따라 송신기의 신호가 커지거나 작아지므로 가장 큰 신호를 송신기의 방향으로 정하게 된다<sup>[1][3]</sup>.

### 2.2 모노펄스 기반 DF

기계적인 회전방식의 단점을 극복하기 위해 전기적인 DF 기술이 필요하다. 전기적인 DF 기술 중 가장 간단한 방식으로 모노펄스 기반 DF 기술이 있다. 모노펄스 기반

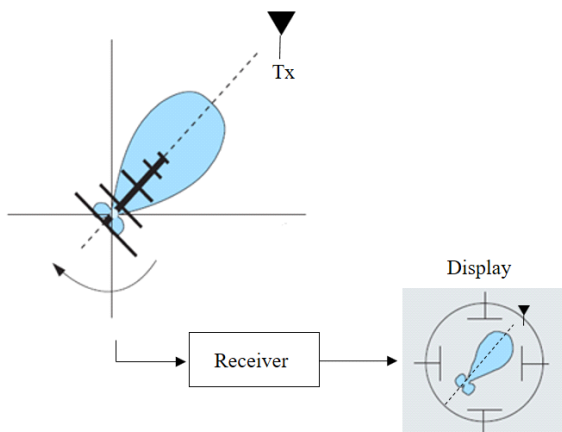


그림 1. 지향성 안테나 이용 최대신호기반 방향탐지  
Fig. 1. Maximum-signal direction finding based on directional antenna.

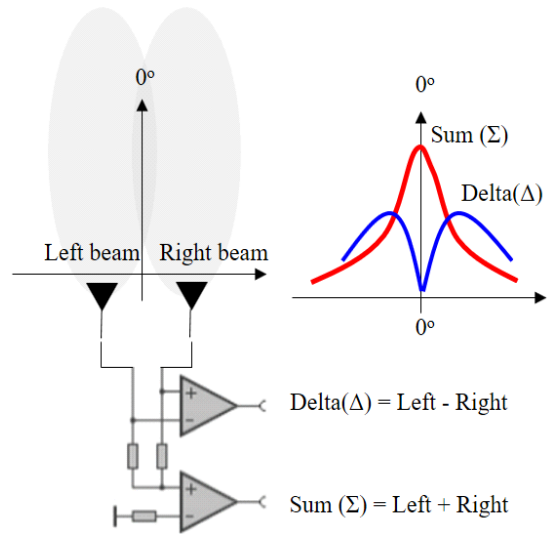


그림 2. 모노펄스 방향탐지  
Fig. 2. Monopulse direction finding.

DF의 원리는 그림 2와 같다. 두 개의 안테나의 빔을 중심축을 기준으로 각각 left 빔과 right 빔으로 구성하고, 두 빔의 크기를 더한 Sum( $\Sigma$ ) 채널과 두 빔의 크기를 뺀 Delta( $\Delta$ ) 채널의 빔을 형성한다.  $\Sigma$ 채널은 안테나에 수직한 방향으로 최대크기를 갖는 반면,  $\Delta$ 채널은 최소값을 가지게 되며, 각도가 중심축에서 벗어남에 따라  $\Sigma$ 채널의 크기는 작아지고,  $\Delta$ 채널의 크기는 커지게 된다. 따라서 각도에 따른 두 빔의 차이를 이용하면 송신기가 위치한 각도를 찾을 수 있다.  $\Sigma$ 채널과  $\Delta$ 채널의 크기는 전력합성기와 180° 하이브리드를 이용하여 RF회로로 간단히 구현할 수 있어 구현이 쉽다<sup>[6]</sup>.

이와 같이 모노펄스 기반 DF 기술은 그 구성이 간단하다는 장점이 있지만, 방향 탐지의 정확도와 탐지각도 간의 트레이드오프(trade-off)가 있게 된다. 즉, DF의 정확도를 높이면 탐지각도가 좁아지고, 탐지각도를 넓히면 DF 정확도가 낮아진다. 이를 분석하기 위하여 그림 3과 같이 두 개의 이상적인 Gaussian 빔을 갖는 경우를 가정하면 빔의 방사패턴은 식 (1)과 같다<sup>[7]</sup>.

$$P = \exp\left(-K\left(\frac{\theta}{\theta_0}\right)^2\right) \quad (1)$$

여기서  $\theta$ 는 주빔에서부터 측정되는 각도,  $\theta_0$ 는 안테나의

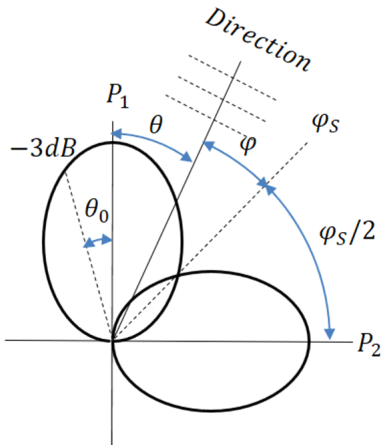


그림 3. 두 개의 Gaussian 빔의 진폭 비교  
Fig. 3. The amplitude comparison of two Gaussian beams.

3 dB 빔폭,  $K$ 는 비례상수이다.

이제 첫 번째 빔에 수신되는 신호의 전력은  $P_1$ , 두 번째 빔에서 수신되는 신호의 전력은  $P_2$ 라 하면 이 값은 식 (2) 및 식 (3)과 같이 주어진다.

$$P_1 = \exp\left(-K\left(\frac{\psi_s/2 - \psi}{\theta_0}\right)^2\right) \quad (2)$$

$$P_2 = \exp\left(-K\left(\frac{\psi_s/2 + \psi}{\theta_0}\right)^2\right) \quad (3)$$

여기서  $\psi_s$ 는 최대 빔방향 간 각도(squint angle)로 그림 3의 경우  $90^\circ$ 이다.  $\psi$ 는 빔의 두 빔의 중간점에서부터 반시계방향으로 측정되는 각도이다. 이제 첫 번째 수신되는 신호의 전력과 두 번째 빔에서 수신되는 신호의 전력의 비,  $R$ 은 식 (4)와 같이 주어진다.

$$R = 10 \log \frac{P_1}{P_2} = \frac{10K \log e}{\theta_0^2} \left[ \left(\frac{\psi_s}{2} + \psi\right)^2 - \left(\frac{\psi_s}{2} - \psi\right)^2 \right] \quad (4)$$

식 (4)의 괄호를 정리하여  $\psi$ 를 계산하면 식 (5)와 같이 주어진다.

$$\psi = \frac{\theta_0^2 R}{20K \psi_s \log e} = \frac{\theta_0^2 R}{6 \psi_s} \quad (5)$$

식 (5)로부터  $\psi_s$ 와  $\theta_0$ 가 정해져 있을 때  $R$ 이 측정되면 방향탐지할 송신기의 각도  $\psi$ 가 선형식으로 계산된다. 실제 진폭을 비교할 빔폭이 일정하지 않다면 식 (5)와 도래 각 계산이 선형적으로 주어지지 않으므로 식 (4)를 기준으로 도래각 별로 LUT(Look Up Table)을 만들고, LUT를 참조하여 도래각을 추정하게 된다.

식 (5)에서 모노펄스 두 빔의 각도  $\psi_s$ 와 두 빔의 3 dB 빔폭  $\theta_0$ 에 따른  $\psi$  추정의 상대민감도(relative sensitivity)를 구하기 위하여 식 (5)를  $\psi_s$ 와  $\theta_0$ 에 따라 각각 미분하여 계산하면 식 (6) 및 식 (7)과 같다.

$$\left| \frac{d\psi/d\psi_s}{\psi} \right| = \frac{1}{\psi_s} \quad (6)$$

$$\left| \frac{d\psi/d\theta_0}{\psi} \right| = \frac{2}{\theta_0} \quad (7)$$

식 (6)과 식 (7)로부터 두 개의 빔 간의 진폭비교를 이용한 모노펄스 기반 DF 시스템의 성능은 두 빔의 간격이 좁을수록, 각각의 빔의 3 dB 빔폭이 좁을수록 민감도는 비례하여 우수함을 알 수 있다. 따라서 모노펄스 레이다에서 일반적으로 빔폭이 좁은 2개의 인접한 두 개의 빔을 사용하는 이유가 여기에 있다.

좁은 빔폭을 갖는 두 개의 인접한 빔을 이용하는 모노펄스 DF의 예로 미사일 등에 사용되는 추적 레이다가 있다. 미사일 등에 장착되는 군사용 추적 레이다는 미사일 정면에 있는 목표물의 정확한 방향만을 찾기 때문에 넓은 탐지 각도가 필요 없다. 단, 2차원 평면상에 빔을 추적하기 위하여 상하좌우 2개의 모노펄스 시스템, 즉 4개의 빔을 갖는 모노펄스 DF 시스템을 구성해야 한다<sup>[6]</sup>.

만약 모노펄스 방식의 추적레이다와 달리  $360^\circ$  전체에 대해 DF 시스템을 꾸밀 경우에는 그림 4와 같이 4개의 다이폴 안테나를 사용하여 구성할 수 있다. 안테나 2개만 사용할 경우에는 앞/뒤의 구분이 어려우므로 안테나 4개를 사용하여 앞/뒤와 좌/우를 구분하게 된다. 이러한 방식을 Watson-Watt 방식의 DF 시스템이라고 부르며, 전파감시 시스템에서 주로 사용된다. 이 방식은 기본적으로 방향탐지 각도는 넓지만 무지향성 안테나를 사용하므로 방향탐지 정확도는 낮다<sup>[1]</sup>.

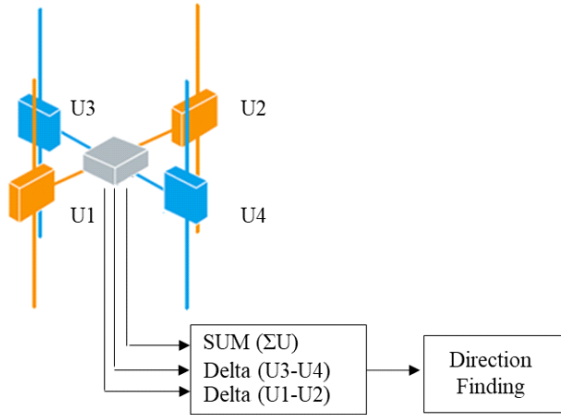
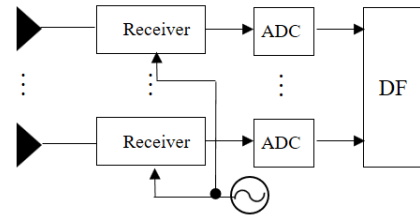


그림 4. Watson-Watt 방식의 모노펄스 방향탐지  
Fig. 4. Watson-Watt monopulse direction finding.

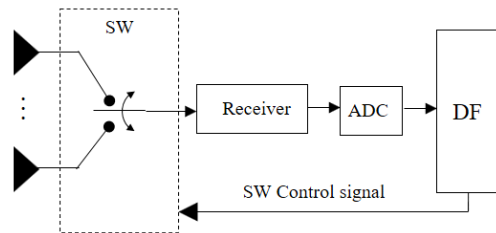
### III. 배열 안테나 기반 단일채널 DF

앞에서 안테나의 지향성을 이용하여 DF 시스템을 구성하는 방법에 대해 살펴보았다. 이 장에서는 배열안테나 특성을 이용한 DF 기술에 대해 알아본다. 배열안테나에 입사되는 전파가 평면파라고 가정하면 각각의 안테나에 입사되는 위상의 변화가 발생한다. 이 위상의 변화는 안테나 간격의 함수이며, 이를 배열인자(array factor: AF)라고 한다. 이러한 AF 특성을 이용하는 방식을 배열안테나 기반 DF라 한다. 배열안테나 기반 DF는 그림 5(a)와 같이 안테나 개수와 동일한 수신기를 갖는 다중채널 방식으로 구현하거나, 그림 5(b)와 같이 수신기가 하나인 단일채널 방식으로 분류할 수 있다. 다중채널에서는 수신기에 의한 위상지연이 없어야 하므로 국부발진기(local oscillator)를 공유하여, 수신기별로 위상지연이 없도록 구현되어야 한다. 단일채널의 경우에는 전력결합기를 이용하거나 스위치를 이용하여 안테나를 순차적으로 수신기에 연결해야 하는데, 스위치 연결 시점에서 왜곡이 있을 수 있으므로 이를 최소화하여야 한다<sup>[1]</sup>.

기본적으로 다중채널의 경우, 수신기의 수만큼의 신호를 동시에 DF하는 것이 가능하지만, 다중수신기 간의 동기 필요성, 전력 소모 문제, 가격, 복잡도 등의 어려움이 있다. 따라서 여러 개의 송신기를 동시에 DF할 필요가 없는 DF 응용의 경우 단일채널 DF에 최근 관심이 집중되고 있다<sup>[2],[3],[9]~[11]</sup>.



(a) 다중채널 DF  
(a) Multiple channel DF



(b) 단일 채널 DF  
(b) Single channel DF

그림 5. 배열안테나 기반 DF  
Fig. 5. Direction finding based on array antenna.

### 3-1 단일채널 기반 Pseudo-Doppler DF

단일채널 방식의 대표적인 사례로 배열안테나를 기계적으로 회전시킴에 따라 발생하는 도플러 효과를 이용한 Pseudo-doppler DF 기술이 있다. 그림 6과 같이 안테나에 수신되는 신호가 각속도  $\omega_0$ 와 파장  $\lambda_0$ 를 갖는 CW(Continuous Wave) 신호라 하자. 안테나 소자가 반경  $R$ 을 갖는 원주를 따라 회전된다면 수신신호는 회전각속도  $\omega_r$ 에 따

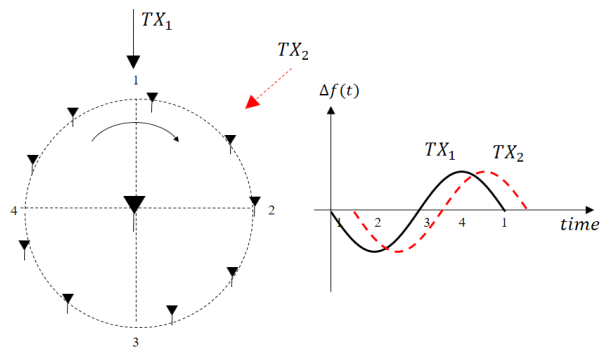


그림 6. Pseudo-Doppler 방향탐지의 원리  
Fig. 6. Principle of pseudo-Doppler direction finding.

라 주파수 변조가 될 것이다. 즉, 안테나에 수직방향으로 신호가 입사되는 경우 수신 안테나의 위치가 1번 위치에서 3번 위치까지 회전할 때는 도플러 주파수가 -값을 가지지만 3번 위치에서 다시 1번 위치로 갈 경우에는 도플러 주파수가 + 값을 가지게 된다. 이 주파수 변조된 신호는 식 (8)과 같이 주어진다.

$$u(t) = A \cos \left[ \omega_o t + \frac{2\pi R}{\lambda_0} \cos(\omega_r t - \alpha) + \phi \right] \quad (8)$$

여기서  $\alpha$ 는 방향탐지할 신호의 수신각도를 의미하고,  $\phi$ 는 초기위상을 의미한다. 이제 식 (8)의 순시주파수를 구하기 위해 위상을 미분하면 식 (9)와 같다.

$$\omega(t) = \frac{d\phi(t)}{dt} = \omega_o - \frac{2\pi R}{\lambda_0} \omega_r \sin(\omega_r t - \alpha) \quad (9)$$

이제 DC 성분  $\omega_o$ 를 저역통과필터로 제거하면 복조된 도플러 주파수 신호는 다음과 같다.

$$S_D = \frac{2\pi R}{\lambda_0} \omega_r \sin(\omega_r t - \alpha) \quad (10)$$

식 (10)을 기준신호  $\sin(\omega_r t)$ 와 비교하면 신호의 수신 방향  $\alpha$ 를 계산할 수 있다.

실제 도플러 방식의 방향탐지에서 안테나를 기계적으로 회전하는 것이 쉽지 않으므로 실제로는 안테나를 원상에 배치시키고, 스위치를 이용하여 각각의 안테나의 수신신호를 수신하거나 기준 안테나를 가운데 놓고 기생안테나를 원주에 배치하는 등의 방법을 사용한다. 이러한 방식의 대표적인 사례로 공항에서 사용하는 TACAN(Tactical Air Navigation) 시스템이 있다. TACAN 시스템은 중앙에 위치한 안테나 근방에 15 Hz의 기생안테나 1개와 원주를 따라 9개의 기생안테나 소자를 이용하여 135 Hz의 진폭변조된 신호를 공간상에서 생성한다. 지금도 많은 공항에서 항공기가 착륙할 때 올바른 방향을 유도하기 위하여 TACAN 시스템이 사용되고 있다<sup>[8]</sup>.

### 3-2 빔스위칭 이용 DF

그림 5(b)와 같이 복수개의 배열안테나를 하나의 수신기에 연결하기 위해서는 RF 스위치가 필요하다. RF스위

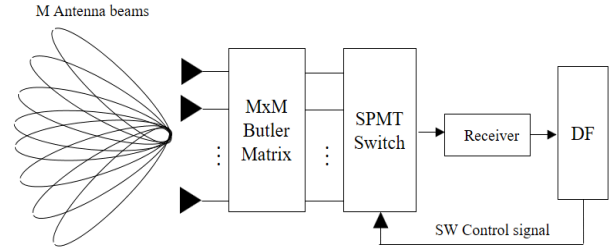


그림 7. 다중빔 스위칭 안테나를 이용한 방향탐지  
Fig. 7. Direction finding of multiple beam switching antenna.

치는 안테나 2개인 경우 SPDT(Single Pole Double Throw) 스위치로 구성되며, 안테나가 M개의 경우 SPMT(Single Pole Multiple Throw)가 된다. 이러한 RF 스위치를 이용하여 방사패턴 특성이 다른 빔을 선택적으로 스위칭하고, 각각의 빔 별로 수신신호를 저장한 후 이를 비교하면 수신신호의 방향을 알 수 있다. 이 방식을 Beam switching array(BSA)라고 하며, 그 구성은 그림 7과 같다. 그림에서 반파장 간격으로 배열된 M개의 안테나와  $M \times M$  Butler Matrix<sup>[9]</sup>를 이용하여 각도별로 지향각이 다른 M개의 빔을 생성하고 이를 SPMT 스위치로 선택하게 된다.

지향각도가 다른 빔을 생성하는 방법은 Butler Matrix 이외에도 기생 안테나<sup>[10]</sup>, 렌즈안테나, 위상천이기 등을 이용할 수 있다. 이러한 방식은 밀리미터파 5G 시스템이나 60 GHz 대역의 IEEE 802.11.ad Wi-Fi 시스템에서 일반적으로 사용되는 방식이다. 이 경우, 핫스팟 지역에서 기지국은 방사패턴이 다른 몇 개의 빔을 순차적으로 스위칭하면서 송신하고, 수신기는 각각의 빔에 대한 수신신호의 크기를 피드백한다. 밀리미터파 대역에서는 전파의 직진성이 강하므로 가장 큰 신호가 수신되는 빔의 방향이 단말기가 위치한 방향이 된다. 이 방식은 복잡한 알고리즘 없이 빔 스위칭 동작만으로 DF를 구현할 수 있어 빠른 빔형성 시간이 요구되는 무선통신에서 관심이 높다<sup>[2]</sup>.

### 3-3 스위치만을 이용한 단일채널 DF

3-2절의 빔스위칭 안테나의 경우, 지향각도가 다른 빔을 만들기 위해 Butler Matrix와 같은 빔형성회로가 필요하다. 이러한 빔형성회로는 보통 파장 단위의 전송선로를



이용한 마이크로파 회로기술로 구성되는데, 주파수가 낮을 경우 그 크기가 매우 크다. 따라서 수 GHz 이하에서는 소형화가 어렵다. 이에 따라 최근 수 빔성형회로 없이 수 GHz 이하에서도 단일채널 DF 기술을 구현하기 위한 연구가 다양하게 진행되고 있다.

빔성형회로가 필요없는 단일채널 DF 방식의 첫 번째 예로 그림 8과 같이 반파장 이격된 2개의 안테나와 SPDT 스위치만으로 DF를 할 수 있는 Time-modulated array(TMA)가 있다. TMA에서는 SPDT 스위치를 제어하여 스위칭 주파수의 하모닉 주파수( $f_m$ )에서 부엽(sidelobe)을 발생시키고, 부엽의 크기를 주엽(mainlobe)의 크기와 비교하면 외부 신호원의 입사방향을 쉽게 계산할 수 있다. 즉, TMA를 Fourier 해석하게 되면 반송파 주파수에서 Sum( $\Sigma$ ) 채널의 특성을 가지고, 첫 번째 스위칭 주파수에서 Delta( $\Delta$ ) 채널의 빔 특성을 가지므로 모노펄스 DF에서 필요한 Sum( $\Sigma$ ) 채널과 Delta( $\Delta$ ) 채널 생성회로 없이도 기저대역 신호를 FFT연산하는 것만으로도 DF가 가능하다<sup>[11]</sup>. 최근 이러한 TMA 특성을 이용하여 원격에 위치한 무선기기의 위치를 파악하여 무선으로 전력을 송신하는 시스템 등에 대한 연구도 활발하다<sup>[12]</sup>.

스위치만을 이용하여 DF를 구현하는 또 다른 예로 2019년 발표된 BLE 5.1 규격의 DF 기술이 있다. BLE 5.1에서는 DF 기술을 구현하기 위하여 그림 9와 같이 기존 Bluetooth 패키트의 끝에 CTE(Constant Tone Extension)라는 CW 신호를 전송한다. Bluetooth 송신기는 주파수편차

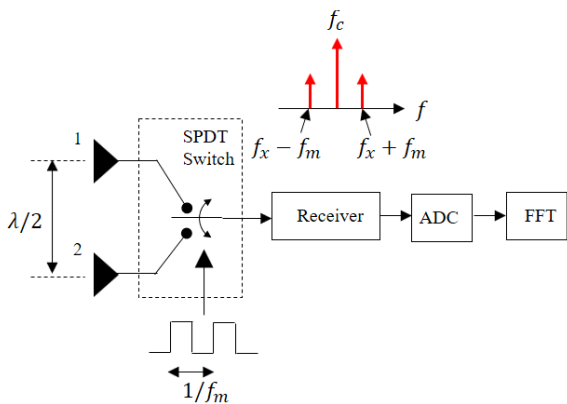


그림 8. TMA 방향탐지 원리  
Fig. 8. Principle of time-modulated array direction finding.

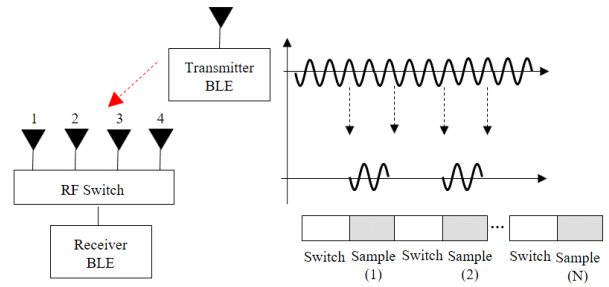


그림 9. Bluetooth 5.1규격의 방향탐지 원리  
Fig. 9. Principle of Bluetooth 5.1 direction finding.

$\pm 250$  kHz를 갖는 FSK(Frequency Shift Keying) 변조방식을 사용하는데, 만약에 ‘0’과 ‘1’이 랜덤하게 분포하는 디지털 신호 대신에 ‘1’이 연속으로 있는 신호의 경우 중심주파수보다 +250 kHz 높은 CW 신호가 송신되므로 이를 CTE구간에서 사용한다<sup>[3]</sup>.

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 usec)은 오차가 있을 수 있으므로 제외하고, 스위칭 동작이 완료된 후 2 usec의 시간만큼 각각의 안테나에서 수신된 데이터를 비교한다. 만약 두 개의 안테나가 반파장 떨어져 있을 때 수신안테나에 수직방향에서 입사되는 신호는 두 안테나 간 위상차가 없다. 하지만 특정 방향에서 수신되는 신호는 두 안테나 간 위상차가 발생하는 원리를 이용하는 것이다. 단, 위상정보를 DF하는 경우, 국부발진기의 주파수 편차에 의한 오차나 반송파 주파수의 차이에 의해 위상이 변할 수 있으므로 이에 대한 적절한 교정 및 보상이 필수적이다. 이렇게 각각의 안테나의 이격거리에 따라 인가되는 신호의 위상차이를 계산하는 방법을 보통은 위상비교 간섭계(phase comparison interferometer)라 부르며, 전파천문학에서 처음으로 사용되었다. 전파천문학에서는 파장 간격보다 멀리 떨어진 전파망원경에 입사되는 신호의 위상차로부터 별의 방향을 탐지하는 방식이다<sup>[13]</sup>.

#### IV. 배열 안테나 기반 다중채널 DF

마지막으로 배열안테나 기반 다중채널 DF 기술에 대

해 살펴보자. 다중채널수신기는 각각의 수신기의 출력을 동시에 병렬고속신호처리를 하게 되면 단일채널 수신기가 할 수 없는 복잡한 DF 기능을 수행할 수 있다. 예를 들어 단일채널 수신기에서는 한 개의 신호만을 DF할 수 있는데 반하여, 다중채널 수신기는 보통 수신기의 개수만큼의 신호를 동시에 DF하는 것이 가능하다.

이러한 다중채널 DF의 구성은 그림 5(a)와 같다. 앞에서 살펴본 단일채널 DF 시스템이 다양한 하드웨어 구조를 갖는데 반하여, 다중채널 DF의 하드웨어는 거의 동일한 구조를 가지며, 신호처리 방식만이 차이가 있다. 따라서 다중채널 DF 기술은 그림 10과 같이 어떠한 알고리즘을 사용하는지에 따라 분류된다. 과거 고전적인 알고리즘을 사용한 DF방식에서 행렬 기반의 알고리즘의 발달로 Subspace 기반의 MUSIC, ESPRIT 등의 방식으로 발전되었고, 최근에는 AI 기반의 신경망 알고리즘 등으로 확장되고 있다<sup>[14],[15]</sup>.

다중채널 DF 기술은 복잡한 알고리즘의 구현 및 계산 시간이 오래 걸린다는 문제가 있으나, 최근 고속 신호처리 IC 기술의 발전으로 점차 해결되고 있다. 특히, 다중신호를 실시간으로 DF할 수 있어 고성능 레이더 등의 여러 목표물을 동시에 DF하기 위해서는 반드시 필요한 기술이다. 또한, 최근 5G 이동통신에서 MIMO 기반 빔포밍 기술이 대중화됨에 따라 관심이 집중되고 있다.

다중채널 기반 DF를 이해하기 위한 수신신호 모델은 그림 11과 같다<sup>[14]</sup>. 배열안테나는 균일한 간격(보통은  $\lambda/2$ )으로 배치되어 있고, 각각의 안테나는 가중치 벡터( $\bar{w}$ )로 위상을 조절할 수 있다고 가정한다. 각각의 다른 방향각

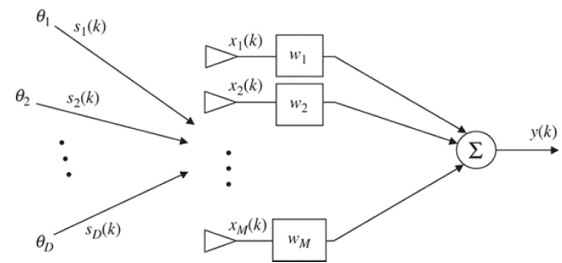


그림 11. M개의 안테나를 갖는 배열 안테나 모델  
Fig. 11. M-element array antenna with arriving signals.

도에서 D개의 신호가 입사될 경우 k번째 시간샘플에서 수신신호는 AWGN 잡음환경에서 식 (11)과 같이 표현할 수 있다.

$$y(k) = \bar{w}^T \cdot \bar{x}(k) \tag{11}$$

여기서 첨자 T는 벡터의 전치를 의미하며, 안테나에 입력된 신호벡터  $\bar{x}(k)$ 는 다음 식 (12)와 같다.

$$\begin{aligned} \bar{x}(k) &= [\bar{a}(\theta_1) \bar{a}(\theta_2) \dots \bar{a}(\theta_D)] \cdot \begin{bmatrix} s_1(k) \\ s_2(k) \\ \vdots \\ s_D(k) \end{bmatrix} + \bar{n}(k) \\ &= \bar{A} \cdot \bar{s}(k) + \bar{n}(k) \end{aligned} \tag{12}$$

그리고  $\bar{w}(k) = [w_1 \ w_2 \ \dots \ w_M]^T$ 로 배열안테나의 가중치 계수를 의미하며,  $\bar{s}(k)$ 와  $\bar{n}(k)$ 는 각각 k번째 시간샘플에서 입사신호벡터와 AWGN 특성의 잡음신호벡터를 의미한다.  $\bar{a}(\theta_i)$ 는 도래각  $\theta_i$ 에서의 배열안테나의 방사패턴이며,  $\bar{A}$ 는  $M \times D$  행렬이 된다. 이제  $M \times M$ 의 배열상관행렬(또는 분산행렬)  $\bar{R}_{xx}$ 를 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\begin{aligned} \bar{R}_{xx} &= E[\bar{x} \cdot \bar{x}^H] = E[(\bar{A}\bar{s} + \bar{n})(\bar{s}^H \bar{A}^H + \bar{n}^H)] \\ &= \bar{A} E[\bar{s} \bar{s}^H] \bar{A}^H + E[\bar{n} \bar{n}^H] \\ &= \bar{A} \bar{R}_{ss} \bar{A}^H + \bar{R}_{nn} \end{aligned} \tag{13}$$

여기서  $\bar{R}_{ss}$ 는 신호상관행렬로  $D \times D$  행렬이 되며,  $\bar{R}_{nn}$ 는 잡음상관행렬로  $M \times M$  행렬이 된다. 배열안테나의 상관행렬  $\bar{R}_{xx}$ 와 신호상관행렬  $\bar{R}_{ss}$ 는 해당시스템이 Ergodic 랜덤 프로세스라고 가정하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

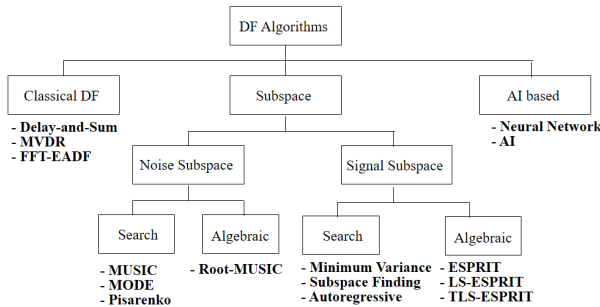


그림 10. 다중 채널 방향탐지 알고리즘 분류  
Fig. 10. Classification of multi-channel direction finding.



$$\begin{aligned} \bar{R}_{xx} &= \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \bar{x}(k) \bar{x}^H(k) \\ \bar{R}_{ss} &= \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \bar{s}(k) \bar{s}^H(k) \end{aligned} \quad (14)$$

여기서 참고로 입사신호가 uncorrelated라면  $\bar{R}_{ss}$ 는 대각선에서만 값을 갖는 대각행렬이 되며,  $M \times D$  행렬  $\bar{A}$ 는 모든 열이 다른 값을 갖는다. 이제 배열안테나를 이용한 신호처리 알고리즘의 목적은 각도의 함수인 Pseudospectrum  $P(\theta)$ 를 찾는 것으로 이 함수를 구하는 방법에 따라 다양한 알고리즘이 존재한다.

이제 배열안테나의 가중치가 균일하다면 Barlett AoA 알고리즘이라 부르며, 이 경우 Pseudospectrum  $P(\theta)$ 를 식 (15)와 같이 정의할 수 있다.

$$P_B(\theta) = \bar{a}^H(\theta) \bar{R}_{xx} \bar{a}(\theta) \quad (15)$$

여기서 식 (15)는 다음 식 (16)과 같은 표현으로 모든 입사신호에 대한 공간상의 Fourier 변환을 의미한다.

$$P_B(\theta) = \left| \sum_{i=1}^D \sum_{m=1}^M e^{j(m-1)kd(\sin\theta - \sin\theta_i)} \right|^2 \quad (16)$$

다음으로 minimum variance distortionless response(MVDR)을 살펴보자. 이 방법은 한쪽 방향으로 입사되는 전력은 Maximum likelihood 추정을 하고, 그 외 다른 방향으로 들어오는 신호의 경우에는 간섭으로 처리하여 추정하는 기법이다. 따라서 방향추정의 목표는 신호도 간섭비(signal-to-interference ratio: SIR)를 최대로 하는 것이다. 신호상관행렬  $\bar{R}_{ss}$ 는 대각행렬이라고 가정하며, 배열안테나 가중치는 다음 식으로 주어진다.

$$\bar{w} = \frac{\bar{R}_{xx}^{-1} \bar{a}(\theta)}{\bar{a}^H(\theta) \bar{R}_{xx}^{-1} \bar{a}(\theta)} \quad (17)$$

여기서  $\bar{R}_{ss}$ 는 가중치가 곱해지지 않은 배열상관행렬이 된다.

$$P_C(\theta) = \frac{1}{\bar{a}^H(\theta) \bar{R}_{xx}^{-1} \bar{a}(\theta)} \quad (18)$$

위에 제시한 균일 가중치를 갖는 경우와 MVDR 가중

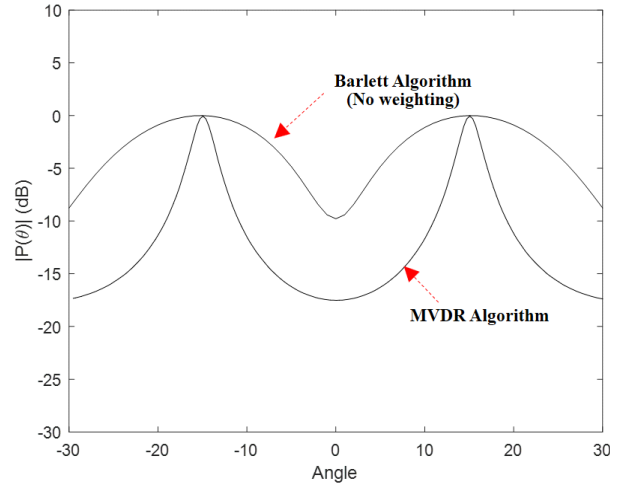


그림 12. 다중 채널 DF 알고리즘 비교  
Fig. 12. Performance comparison between two direction finding algorithms.

치를 갖는 경우의 성능을 비교하기 위해 MATLAB 시뮬레이션을 하였다. 성능비교를 위해  $\lambda/2$  간격의 안테나 소자가 6개 ( $M=6$ )인 선형배열안테나에서 같은 크기의 신호원 2개 ( $s_1, s_2$ )가  $\pm 15^\circ$  방향에서 입사된다고 가정하였다. 이때 잡음신호의 분산이  $0.1(\sigma_n^2 = 0.1)$ 이라고 가정하고, 가중치가 균일한 Barlett AoA 알고리즘과 가중치를 MVDR 알고리즘으로 구현한 경우를 그림 12에 비교하여 나타내었다. 두 개의 신호원의 DF 성능이 배열안테나별로 가중치를 주는 경우가 우수함을 알 수 있다. 이 외에도 복잡한 알고리즘을 사용하는 경우 성능은 더욱 우수한 반면 계산의 복잡도는 증가한다.

최근에는 AI 기반 DF 기술이 등장하고 있다. AI 알고리즘의 경우, 복잡한 수식이 없이 사전학습만을 이용하여 DF가 가능하므로 최근 AI기술의 보급확산에 따라 관심이 집중되고 있다<sup>[15]</sup>. 하지만 아직까지는 경험적으로 신경망을 구성하므로 응용 및 채널 환경에 따라 AI 기반 DF 기술이 의미가 있는지를 파악하기 위하여 추가적인 연구가 필요한 것으로 판단된다.

## V. 결 론

본 논문에서는 최근 관심이 집중되고 있는 방향탐지

기술을 그 특징에 따라 분류하고, 각각의 핵심원리부터 최신 응용까지 살펴보았다. 이를 통하여 방향탐지 기술은 전통적인 전파감시와 레이더 분야뿐만 아니라, 최근에는 무선통신 분야로까지 확대되고 있음을 알 수 있었다. 게다가 고속의 이동통신이나 Wi-Fi 뿐만 아니라, Bluetooth와 같은 저가, 저전력 무선통신과 시스템으로도 확장되고 있다. 이와 같이 방향탐지 기술은 앞으로도 다양한 분야에서 발전할 것으로 예상되며, 방향탐지를 이용한 다양한 응용시스템이 지속적으로 등장할 것으로 보인다.

### References

- [1] G. Kratschmer "Introduction into theory of direction finding," in *Radiomonitoring & Radiolocation 2010/2011, Munich*, Rhode & Schwarz, 2010.
- [2] E. Rastorgueva-Foi, M. Costa, M. Koivisto, K. Leppanen, and M. Valkama, "Dynamic beam selection for beam-RSRP based direction finding in mmW 5G networks," in *2018 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation(IPIN)*, Nantes, 2018, pp. 1-6.
- [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*, 2019, pp. 53-65.
- [4] J. W. Yu, "MIMO/3-D beamforming antenna", *The Proceeding of the Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, Nov. 2014, vol. 25, no. 6, pp. 3-11.
- [5] M. S. Lee, I. S. Na, J. H. Go, and J. O. Park, "Development trends of electromagnetic wave localization technology", *The Proceeding of the Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, Nov. 2016, vol. 27, no. 6, pp. 44-49.
- [6] D. J. An, J. H. Lee, "Performance of amplitude comparison monopulse radar", *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 29, no. 12, pp. 969-975, Dec. 2018.
- [7] T. B. Le, J. Vesely, "A beam coding technique for direction finding of moving object," in *2019 29th International Conference Radioelektronika*, Pardubice, 2019, pp. 1-6.
- [8] S. J. Park, K. H. Koo, "Design and implementation of mobile electronically scanned TACAN antenna", *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 26, no. 1, pp. 54-62, Jan. 2015.
- [9] S. Park, S. Kim, J. Sohn, and H. Shin, "Design of a 28 GHz switched beamforming antenna system based on 4x4 Butler matrix", *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 26, no. 10, pp. 875-884, Oct. 2015.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] D. Masotti, A. Costanzo, M. Del Prete, and V. Rizzoli, "Time-modulation of linear arrays for real-time reconfigurable wireless power transmission," in *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 64, no. 2, pp. 331-342, Feb. 2016.
- [13] M. H. Cha, "Accuracy analysis of 2-D direction finding based on phase comparison", *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 28, no. 8, pp. 653-660, Aug. 2017.
- [14] F. Gross, *Smart Antennas for Wireless Communications with MATLAB*, New York, NY, McGraw-Hill, 2005.
- [15] S. Abeywickrama, L. Jayasinghe, H. Fu, S. Nissanka, and C. Yuen, "RF-based direction finding of UAVs using DNN," in *2018 IEEE International Conference on Communication Systems(ICCS)*, Chengdu, 2018, pp. 157-161.

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