

디지털 능동위상배열 안테나의 광대역 빔 조향 모사 및 측정 방법

Wideband Beam-Steering Emulation and Measurement for Digital Active Phased-Array Antennas

주정명 · 권시원 · 박세준 · 정영주 · 채희덕 · 진형석 · 박종국 · 염동진* · 김두수*

JoungMyoung Joo · Siwon Kwon · Sejun Park · YeongJu Jung · Heeduck Chae ·
Hyung-Suk Jin · Jongkuk Park · Dong-Jin Yeom* · Doo-Soo Kim*

요 약

최근 레이더, 위성 및 전자전 등 다양한 분야에서 고해상도 구현과 대량 정보 동시 획득을 위해 광대역 시스템에 대한 요구가 증대되고 있다. 광대역 시스템의 능동위상배열 안테나에서 위상 변위기를 이용한 빔 조향은 주파수에 따라 조향이 편이되는 빔 스퀀트 현상을 야기하며, 시스템의 성능 저하를 초래하는 주요 원인이 된다. 따라서, 주파수와 무관하게 일정한 조향각을 유지할 수 있는 시간 지연 기반의 빔 조향 기술이 필수적이나, 기존의 일반적인 근접전계 측정 방법으로는 광대역 빔 조향 검증에 한계가 있다. 본 논문에서는 이를 극복하고자 송/수신 주파수 오프셋 기법을 적용한 근접전계 시험 방법을 제안하고, 이론적으로 타당성을 입증하였다. 또한, 8×8 능동위상배열 안테나를 제작하고 광대역 빔 조향 특성을 측정한 결과, 위상 변위 방식 대비 시간 지연 방식에서 빔 조향 오차가 크게 개선됨을 확인하였다. 이를 통해, 제작된 안테나의 광대역 빔 조향 기능을 실증함과 동시에, 제안된 시험 방법의 실효성을 실험적으로도 증명하였다.

Abstract

In recent years, wideband systems in radar, satellite, and electronic warfare have been increasingly in demand for high-resolution and simultaneous acquisition of massive amounts of information. In active phased-array antennas for wideband systems, beam steering using phase shifters (PSs) suffers from “beam squint,” wherein the steering angle shifts with frequency, which is a major cause of system performance degradation. Therefore, a beam-steering technique based on true time delay (TTD), which can maintain a constant steering angle regardless of frequency, is essential. However, conventional near-field measurement methods are inadequate for verifying wideband beam steering. This paper proposes a near-field test method that applies the transmit-receive frequency offset and demonstrates its validity theoretically. Furthermore, an 8×8 active phased-array antenna was fabricated, and its wideband beam-steering characteristics were measured using the proposed method. The beam-steering error was significantly improved using the TTD method compared with the PS method. Both the wideband beam-steering capability of the fabricated antenna and effectiveness of the proposed test method were verified experimentally.

Key words: Near-Field Measurement, Wideband Digital Phased Array Antenna, True Time Delay, Wideband Beam Steering

LIG 디펜스&에어로스페이스(LIG Defense&Aerospace)

*국방과학연구소(Agency of Defence Department)

· Manuscript received April 9, 2026 ; Revised May 9, 2026 ; Accepted May 30, 2026. (ID No. 20260409-027)

· Corresponding Author: JoungMyoung Joo (e-mail: joungmyoung.joo@ligdna.com)

I. 서 론

레이다, 통신, 전자전, 유도무기 등 다양한 분야의 시스템에서 필수적으로 요구되는 안테나장치는, 안테나를 기계식으로 회전시켜 표적을 탐지하는 배열 안테나에서 전자식으로 빔을 조향하는 수동/능동위상배열 안테나로 관련 기술이 발전해 왔다^{[1][2]}. 안테나 빔을 전자식으로 조향하기 위해서는 배열 소자 위치마다 정해진 위상을 가져야 하므로 각 채널에 위상 변위기(PS, phase shifter)를 적용하였다. 최신의 안테나 시스템은 구조적인 유동성과 다양한 빔 형성에 대한 자유도가 높고 빔 제어가 용이하며 저손실 데이터 처리 등이 가능한 디지털 능동위상배열 안테나로 한 번 더 도약하고 있는 추세이다^{[3][4]}. 또한 이러한 디지털 능동위상배열 안테나는 빔 조향 시 채널별 위상 가변을 위해 위상 변위기를 사용할 필요 없이, 송신 디지털 파형 생성 시 또는 수신 디지털 데이터에 산술 연산으로 위상 가변값을 적용함으로써 빔 조향을 구현한다^{[2][5]}.

근래에는 우주 감시용 레이다, 위성/항공기용 영상 레이다(SAR, synthetic aperture radar), 전자전용 재머 등 많은 시스템에서 더 멀리, 넓게 보고 더 자세히 관찰하며 더 많은 정보를 동시에 얻고자 한다. 이를 위해 안테나 크기는 커지고 넓은 조향 범위와 광대역의 순시 대역폭이 요구되는데, 이때 종래와 같이 위상 변위기나 산술 연산을 통한 위상 가변 방식으로는 원하는 방향으로 정확히 빔을 조향할 수 없다. 빔 조향을 위한 소자별 위상 차이는 주파수에 따라 달라져야 하는데, 위상 가변 방식으로는 동시에 여러 주파수에서 위상을 가변할 수 없으므로 빔 스퀀트(beam squint) 현상이 발생하게 된다. 빔 스퀀트 현상은 안테나가 크고 빔 조향각이 클수록, 순시 대역폭이 넓을수록 크게 나타나기 때문에, 기존의 협대역 시스템에서는 위상 가변 방식으로 빔 조향을 구현해도 크게 문제 되지 않았지만, 광대역 순시 대역폭을 갖는 시스템에서는 치명적인 문제가 될 수 있다. 따라서 빔 스퀀트 현상이 발생하지 않으면서 원하는 방향으로 정확하게 조향하기 위해서는 소자별 시간 지연(TTD, true time delay)을 통해 위상을 변위시켜야 한다^{[6]-[9]}. 다만, 시간 지연기는 위상 변위기에 비해 비용이 비싸다는 단점과 시간 지연기 또한 변위 해상도와 최대 변위 시간에 대한 제한이 있기 때문에, 무한정으로 위상을 가변할 수 있는 것

은 아니므로 적용하려는 시스템을 고려하여 시간 지연기 사양을 선정하고 적절한 구조 설계가 필요하다.

참고문헌 [8]에서는 향후 우주 감시 레이다의 기반이 될 광대역 디지털 능동위상배열 안테나에 위상 변위와 시간 지연을 이용한 빔 조향이 모두 가능하도록 구현하고, 8×8 배열의 축소형 안테나를 제작/시험하여 시간 지연 빔 조향 기술을 입증하였다. 다음으로 본 논문에서는 제작된 디지털 능동위상배열 안테나의 광대역 빔 조향 기능을 검증하기 위한 근접전계 시험 방법을 제안하고, 앞서 언급한 두 가지 빔 조향 방식에 대한 측정 결과를 비교/제시함으로써 제안한 시험 방법과 구현된 광대역 빔 조향 기능이 유효함을 보였다.

II. 배경 이론

2-1 위상 변위기와 시간 지연기를 이용한 빔 조향

배열 이론으로부터 임의의 위치로 배열된 소자가 N개 인 능동위상배열 안테나의 일반화된 배열 계수(AF, array factor)는 식 (1)과 같이 표현된다.

$$AF(\theta, \phi) = \sum_{n=1}^N W_n \times e^{j \bar{k} \cdot \bar{r}_n}$$

$$\text{where, } W_n = a_n \times e^{j \bar{\phi}_n}$$

$$\bar{k} = k_x \hat{x} + k_y \hat{y} + k_z \hat{z} = k_0 \hat{R} \quad (k_0 = \sqrt{k_x^2 + k_y^2 + k_z^2})$$

$$\bar{r}_n = r_x \hat{x} + r_y \hat{y} + r_z \hat{z} \quad (1)$$

여기서, W_n 은 각 소자가 갖는 가중치 분포이고 $\bar{k}$ 는 전파상수 벡터, $\bar{r}_n$ 은 배열 소자 위치 벡터를 나타낸다. 식 (1)로부터 x 방향으로 D_x 간격을 가진 1차원 배열을 가정하고, 여기에 θ_0 방향으로 빔 조향을 적용하면 배열 계수는 식 (2)와 같이 간소화된다.

식 (2)에서 가장 마지막 항이 안테나 빔을 θ_0 방향으로 조향할 때 각 소자가 가져야 할 위상값이 되고, 인접 소자 간 위상 차이 $\Delta\phi$ 는 식 (3)과 같이 주파수의 함수로 나타나게 된다(c 는 빛의 속도). 또한, 식 (3)으로부터 식 (4)와 같은 위상-시간 관계식을 도출할 수 있다^{[8][9]}.

$$AF(U) = \sum_{n=1}^N W_n \times e^{j k_0 D_x n U} \times e^{-j k_0 D_x n \sin(\theta_0)}$$

$$\text{where, } U = \sin(\theta_0) \quad (2)$$

$$\begin{aligned}\Delta\Phi &= k_0 D_x \sin(\theta_0) = \frac{2\pi}{\lambda_0} D_x \sin(\theta_0) \\ &= \frac{2\pi f_0}{c} D_x \sin(\theta_0) = 2\pi f_0 \Delta t\end{aligned}\quad (3)$$

$$\Delta t = \frac{D_x \sin(\theta_0)}{c}\quad (4)$$

만약 광대역 순시 대역폭을 갖는 시스템과 같이 동시에 넓은 주파수를 운용하는 경우 위상 변위 방식은 특정 주파수 기준의 위상 가변값 하나를 광대역 파형에 동일하게 적용해야 하지만, 시간 지연 방식에서는 시간 지연 값을 식 (4)와 같이 설정하면 주파수에 따라 다른 위상 가변값을 광대역 파형에 적용할 수 있다. 이에 대한 결과를 그림 1에 도식화하였으며, 앞서 언급한 것과 같이 위상 변위 방식은 모든 주파수에서 일정한 위상값을 갖지만 시간 지연 방식은 주파수가 변함에 따라 일정한 위상 기울기를 갖음을 확인할 수 있다.

다음으로 시뮬레이션을 통해 위상 변위 방식과 시간 지연 방식을 이용한 광대역 빔 조향 결과를 확인하였다. 예상한 것과 같이 위상 변위기를 이용한 광대역 빔 조향 결과에서는 기준 주파수를 제외한 다른 주파수에서는 빔 스쿼트 현상에 의해 지향 정확도가 저하되었다. 반대로 광대역 빔 조향 시 위상 가변을 위해 시간 지연을 적용한 경우에는 동시에 모든 주파수에서 원하는 방향으로 정확히 조향됨을 직관적으로 확인할 수 있다(그림 2).

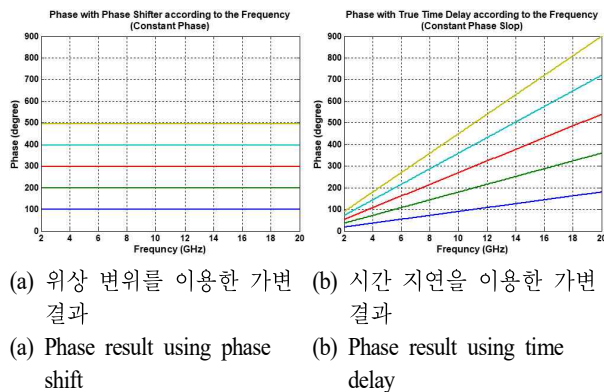


그림 1. 위상 가변 방법별 주파수에 따른 위상 비교
Fig. 1. Comparison of phase vs. frequency for two phase shift techniques.

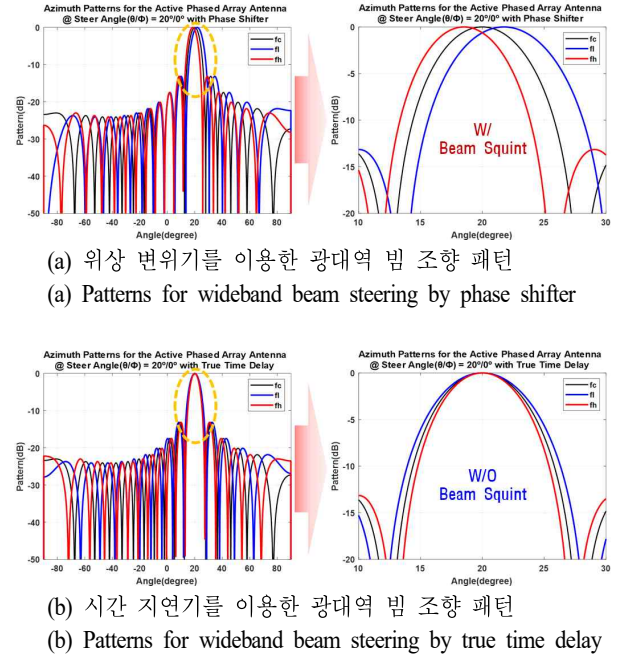


그림 2. 능동위상배열 안테나의 광대역 빔 조향 결과 비교
Fig. 2. Comparison of wideband beam steering results for active phased array antennas.

2.2 광대역 빔 조향 모사를 위한 근접전계 시험 구성

제작된 8×8 배열의 완전 디지털 능동위상배열 안테나에 대한 기본적인 성능과 시간 지연을 이용한 빔 조향 기능을 근접전계 시험을 통해 검증하였다^[8]. 이를 기반으로 본 논문에서는, 중심 주파수 기준 약 11 %의 순시 대역폭을 갖는 시스템에서 안테나 운용 시 광대역 빔 조향이 가능한지 검증하고자 한다. 대개는 안테나의 전기적 성능, 빔 조향 기능 검증 등을 위한 빔 패턴 측정 시 원전계 또는 근접전계 시험 방법을 이용하지만, 이러한 측정 방법은 통상적으로 송/수신 주파수가 동일한 단일 주파수를 사용하기 때문에^{[2],[5],[10]}, 광대역 빔 조향 기능을 확인하기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 실제 레이다 운용과 유사한 상황을 모사하기 위해, 송신 주파수와 수신 주파수를 오프셋(offset)시켜 송/수신 간 서로 다른 주파수를 사용하는 근접전계 측정 방법을 제안하였다.

그림 3에는 디지털 능동위상배열 안테나 및 송신 근접전계 시험 구성도와 신호 흐름도를 간략히 나타내었다. 보이는 것과 같이 디지털 능동위상배열 안테나는 반도체

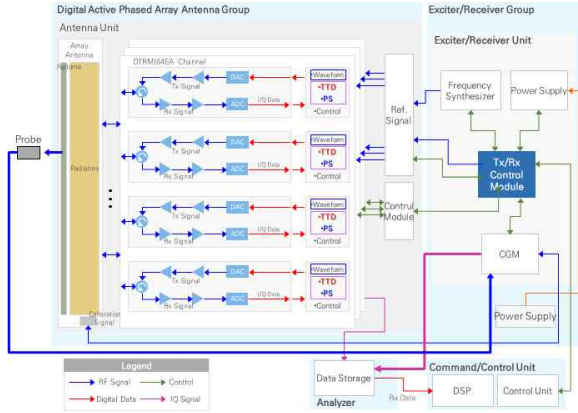


그림 3. 디지털 능동위상배열 안테나 및 송신 근접전계 시험 구성도
Fig. 3. Configuration for digital active phased array antenna and Tx near-field test.

송수신조립체에서 디지털 파형을 생성하고 빔 조향을 위한 위상 가변 후 주파수 상향 변환/아날로그 신호 변환하여 복사소자를 통해 RF(radio frequency) 신호를 방사한다. 다음으로 안테나 송신 신호를 측정용 프로브(probe)로 수신하여 보정신호생성모듈(CGM, calibration signal generation module)에 전달한다^[1]. 여기서, 빔 조향을 위한 위상 가변 시 위상 변위기 역할인 산술 연산만 적용할 수도 있고 FIR(finite impulse response) 필터를 이용한 디지털 시간 지연기도 함께 적용할 수 있도록 구현하였다. 따라서, 산술 연산만으로 위상을 가변하는 경우 앞서 언급한 것과 같이 협대역에서만 빔 조향이 가능하고, 광대역에서 정확한 빔 조향을 하려면 반드시 시간 지연과 산술 연산을 함께 적용해야 한다. 이때, 디지털 시간 지연기는 디지털 파형의 위상을 가변시키고, 산술 연산은 RF 상향 변환 주파수에 해당하는 위상을 가변하는 역할을 한다.

먼저, 위에 기술한 송신 근접전계 측정 시, 동일한 송/수신 주파수에서 시간 지연을 적용해 빔 조향하는 일반적인 경우에 대해 파형 발생부터 신호 수신까지 일련의 과정을 수학적식과 함께 그림 4에 도식화하였다.

그림 4에 보인 것과 같이, 디지털 파형에 광대역 빔 조향을 위한 위상 가변과 주파수 상향 변환이 적용된, 디지털 능동위상배열 안테나의 송신 신호에 대한 위상은 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, f_0 는 미리 설정해 놓은 디지털

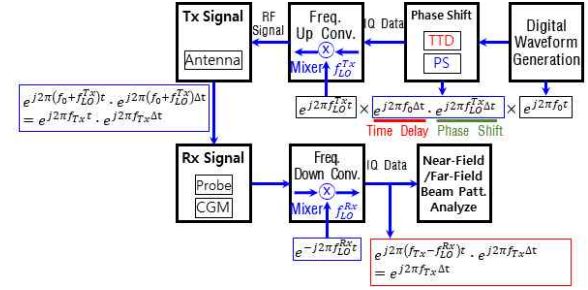


그림 4. 일반적인 송신 근접전계 시험에 대한 신호 흐름도
Fig. 4. Signal flowchart for general case of Tx near-field test.

파형 발생 주파수이고, f_{LO}^{Tx} 는 디지털 파형 주파수를 RF 주파수로 상향 변환하는 국부 신호 주파수를 나타낸다.

그러므로 복사소자를 통해 최종 송신되는 RF 신호의 주파수 $f_{Tx} = f_0 + f_{LO}^{Tx}$ 로 쓸 수 있다. 빔 조향을 위한 소자별 위상 가변은 산술 연산과 시간 지연에 의해 수행되는데, 산술 연산에 의한 위상 변위값은 식 (3)으로부터 상향 변환용 국부 신호 주파수를 기준으로 결정되고, 식 (4)로 설정된 시간 지연값에 의해 디지털 파형 주파수 기준의 위상이 가변된다.

$$\begin{aligned} & \exp(j2\pi f_0 t) \times \exp(j2\pi f_{LO}^{Tx} t) \\ & \times \exp(j2\pi f_0 \Delta t) \times \exp(j2\pi f_{LO}^{Tx} \Delta t) \\ & = \exp(j2\pi (f_0 + f_{LO}^{Tx}) t) \times \exp(j2\pi (f_0 + f_{LO}^{Tx}) \Delta t) \\ & = \exp(j2\pi (f_0 + f_{LO}^{Tx}) (t + \Delta t)) \\ & = \exp(j2\pi f_{Tx} (t + \Delta t)) \end{aligned}$$

$$\text{where, } f_{Tx} = f_0 + f_{LO}^{Tx} \quad (5)$$

빔 조향된 송신 신호를 측정 프로브로 수신하고 이 신호에 다시 주파수 하향 변환을 적용하면, 식 (6)과 같이 시간에 따라 변하는 위상 성분은 모두 제거되고 빔 조향된 위상 성분만 남은 데이터를 획득할 수 있다. 또한, 송/수신 주파수가 동일하므로 $f_{Tx} = f_{Rx}$ 가 되고 식 (5) 및 식 (6)으로부터 주파수 상/하향 변환 시 적용되는 국부 신호 주파수가 각각 다름($f_{LO}^{Tx} \neq f_{LO}^{Rx}$)을 확인할 수 있다.

$$\begin{aligned} & \exp(j2\pi f_{Tx} t) \times \exp(j2\pi f_{Tx} \Delta t) \\ & \times \exp(-j2\pi f_{LO}^{Rx} t) \\ & = \exp(j2\pi (f_{Tx} - f_{LO}^{Rx}) t) \times \exp(j2\pi f_{Tx} \Delta t) \\ & = \exp(j2\pi f_{Tx} \Delta t) = \exp(j2\pi f_{Rx} \Delta t) \end{aligned}$$

$$\therefore f_{Tx} = f_0 + f_{LO}^{Tx} = f_{Rx} \Rightarrow f_{Rx} = f_{LO}^{Rx} \neq f_{LO}^{Tx} \quad (6)$$

추가로, 이 경우에는 위상 가변 시 시간 지연은 적용하지 않고 단순히 산술 연산만 적용해도 원하는 방향으로 정확히 조향할 수 있다^[8]. 다만, 이와 같은 기존의 시험 방법으로는 송/수신 주파수가 동일하므로 광대역에서의 빔 조향 결과를 확인할 수 없다.

따라서, 본 논문에서는 근접전계 측정 환경에서 송/수신 주파수 오프셋 기법을 통해 광대역 운용을 모사하였다. 이는 송/수신 각각 단일 주파수를 사용하면서도 시간 지연을 이용한 광대역 빔 조향 특성을 효과적으로 확인할 수 있는 시험 방법이다. 동일 송/수신 주파수를 사용하는 경우와 같은 방식으로, 제안된 송신 근접전계 시 신호 흐름 및 데이터 처리 과정을 그림 5에 제시하였다.

전반적인 신호 흐름이나 관련 수식은 기존의 일반적인 방법과 크게 다르지 않아 보이지만, 생성하는 디지털 파형의 주파수부터 차이가 있다. 기존에는 미리 설정해 놓은 고정된 주파수에서 파형을 생성했지만, 여기에서의 디지털 파형 생성 주파수 f_0 는 송신 주파수와 수신 주파수 간 차이 f_{Offset} 과 같다. 즉, 송/수신하려는 RF 주파수 차이에 해당하는 주파수로 송신 파형을 발생시킨다. 그리고 송신기 역할인 디지털 반도체 송수신 조립체의 운용 주파수(f_{DTRM}^{OP})를 수신기 역할인 보정신호생성모듈의 수신 주파수(f_{Rx})와 동일하게 설정한다. 이에 따라, 주파수 상향 변환을 위한 국부 신호(f_{LO}^{Tx})는 수신 주파수 기준으로 설정되지만, 디지털 파형을 송/수신 오프셋 주파수로 생성하였기 때문에 원하는 RF 주파수(f_{Tx})에서 신호를 송신할

수 있다. 따라서, 빔 조향 시 산술 연산에 의한 위상 변위값은 상향 변환 국부 신호 주파수인 수신 주파수를 기준으로 계산되고, 여기에 디지털 파형 주파수인 송/수신 주파수 차이(f_{Offset}) 기준으로 시간 지연값에 의한 위상 변위가 더해져, 빔 조향을 위한 최종 위상 가변은 송신 신호를 기준으로 적용된다. 여기서도 마찬가지로 산술 연산 및 시간 지연에 의한 위상 변위값은 각각 식 (3) 및 식 (4)에 의해 결정되며, 광대역 빔 조향 검증을 위한 송신 신호의 위상은 식 (7)과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} & \exp(j2\pi(f_0 + f_{LO}^{Tx})t) \times \exp(j2\pi(f_0 + f_{LO}^{Tx})\Delta t) \\ &= \exp(j2\pi(f_{Offset} + f_{LO}^{Rx})t) \\ & \quad \times \exp(j2\pi(f_{Offset} + f_{LO}^{Rx})\Delta t) \\ &= \exp(j2\pi f_{Tx}t) \times \exp(j2\pi f_{Tx}\Delta t) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \text{where, } f_0 = f_{Offset} = f_{Tx} - f_{Rx} \\ & f_{LO}^{Tx} = f_{Rx} = f_{LO}^{Rx} \\ & \therefore f_{Tx} = f_0 + f_{LO}^{Tx} = f_{Offset} + f_{LO}^{Rx} \end{aligned} \quad (7)$$

반면, 이 경우에 있어서는 디지털 반도체 송수신 조립체의 운용 주파수를 기준으로 빔 조향 위상값을 계산하기 때문에, 산술 연산만 이용해 위상을 가변하면 디지털 파형 생성 주파수인 주파수 오프셋에 대한 위상 가변이 불가능하게 된다.

이러한 송신 신호를 프로브로 수신한 신호에 주파수 하향 변환을 적용하면 식 (8)과 같이 된다. 하지만 이번에는 송/수신 주파수 간 차이만큼 오프셋 된 송신 신호에, 수신 주파수 기준으로 하향 변환 국부 신호(f_{LO}^{Rx})를 적용하기 때문에 식 (8)에 보이는 것과 같이 주파수 하향 변환 후에도 시간에 따라 변하는 위상 성분이 제거되지 않고 남아 있게 된다. 따라서, 후처리를 통해 송/수신 오프셋 주파수에 의한 위상 변화 성분을 제거해 주어야 한다(그림 5).

$$\begin{aligned} & \exp(j2\pi f_{Tx}t) \times \exp(j2\pi f_{Tx}\Delta t) \\ & \times \exp(-j2\pi f_{LO}^{Rx}t) \\ &= \exp(j2\pi(f_{Tx} - f_{LO}^{Rx})t) \\ & \quad \times \exp(j2\pi(f_{Offset} + f_{LO}^{Rx})\Delta t) \\ &= \exp(j2\pi f_{Offset}t) \times \exp(j2\pi(f_{Offset} + f_{LO}^{Rx})\Delta t) \end{aligned} \quad (8)$$

후처리를 통해 최종 수신된 데이터에는 식 (9)에 보인 것과 같이 송신 주파수 기준으로 빔 조향된 위상 성분만 남아 있으므로, 송신 주파수 기준으로 빔 패턴을 확인하면 된다.

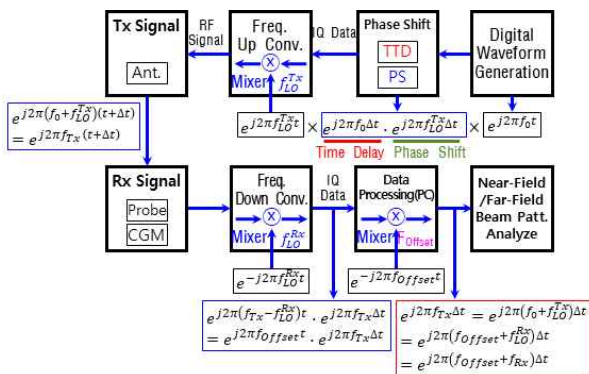


그림 5. 주파수 오프셋을 적용한 송신 근접전계 시험 방법
Fig. 5. Proposed method for Tx near-field test applying frequency offset.

$$\begin{aligned}
 & \exp(j2\pi f_{\text{Offset}} t) \times \exp(j2\pi(f_{\text{Offset}} + f_{LO}^{Rx}) \Delta t) \\
 & \times \exp(-j2\pi f_{\text{Offset}} t) \\
 & = \exp(j2\pi(f_{\text{Offset}} + f_{LO}^{Rx}) \Delta t) \\
 & = \exp(j2\pi(f_0 + f_{LO}^{Tx}) \Delta t) \\
 & = \exp(j2\pi f_{Tx} \Delta t)
 \end{aligned} \tag{9}$$

이로써 본 논문에서 제안한 송/수신 주파수 오프셋 기반의 근접전계 시험 방법을 통해 광대역 빔 조향 특성 검증이 가능함을 이론적으로 입증하였다.

III. 광대역 빔 조향 시험 결과

이번 장에서는, II장에서 보인 광대역 빔 조향 검증을 위한 송신 근접전계 시험 방법 이론을 바탕으로, 제작된 8×8 디지털 능동위상배열 안테나의 광대역 빔 조향 기능을 실험적으로 확인하였다. 송신 근접전계 측정을 위해 무반향 챔버 내에 설치한 안테나 제작 형상 및 시험 구성을 그림 6에 나타내었다. 여기서, 안테나와 측정용 프로브 간 거리는 일반적인 근접전계 시험 방법과 동일하게 약 4 λ로 설정하였다. 프로브 안테나의 반사손실 특성은 그림 7과 같고, 측정하려는 안테나의 운용 대역폭 내에서 약 -10 dB 이하의 성능을 보였다. 또한, 안테나 크기 및 시스템 빔 조향 범위를 고려하여 근접전계 측정 시 전체

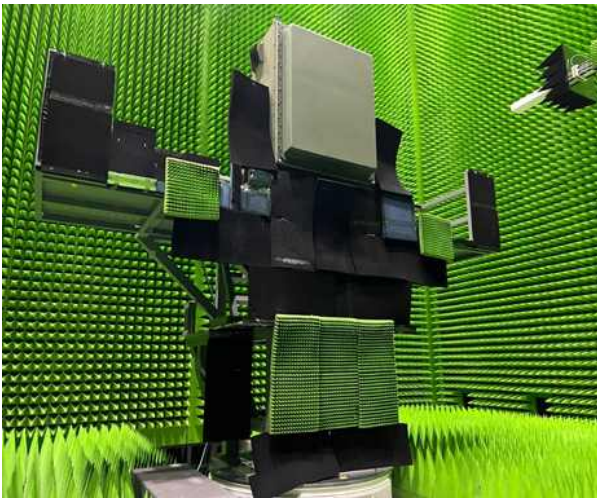


그림 6. 디지털 능동위상배열 안테나 제작 형상 및 근접전계 시험 구성

Fig. 6. Fabricated digital active phased array antenna and near-field measurement setup.

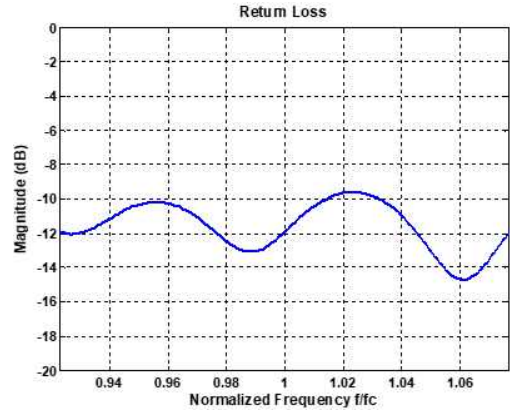


그림 7. 측정용 프로브 안테나의 반사손실 특성

Fig. 7. Return loss of probe antenna for measurement.

측정면은 X-축으로 약 ±10 λ, Y-축으로 약 ±11.3 λ의 크기로 설정하였으며, 측정 간격은 대역내 상한 주파수 기준 0.5 λ 이하로 설정하였다.

참고로 근접전계 측정 시 측정 안테나와 프로브가 마주보는 상태에서 보어사이트를 벗어난 위치에서도 측정되기 때문에 측정값에 오차가 포함되므로 프로브의 수신 특성(빔 패턴)을 반드시 보정해 주어야 한다. 일반적으로 근접전계 측정에서 프로브 패턴은 이상적인 공식을 이용하거나 약간의 변형을 통해 간단한 공식으로 모델링하여 사용한다. 이와 같이 근접전계 측정을 통한 원전계 빔 패턴 변환 시 앞서 측정한 프로브 안테나의 반사 계수나 패턴 특성은 모두 보상 인자(factor)로 반영되기 때문에 측정하고자 하는 안테나 빔 패턴 특성에는 영향을 미치지 않는다^[11].

하지만 여기서 제작된 안테나는 8×8 배열의 축소형 안테나로서 상대적으로 적은 배열 수/작은 개구면 크기로 인해 넓은 빔폭을 가지므로, 광대역 빔 조향 특성을 명확하게 확인하기 어려울 수 있다. 그럼에도 불구하고, 광대역에서 산술 연산만으로 위상 가변 시 조향각이 클수록 빔 스캔트 현상이 크게 발생하므로, 능동위상배열 안테나의 그레이팅 로브(grating-lobe)가 발생하지 않는 범위 내 최대 조향각까지 빔 패턴을 확인함으로써 시간 지연을 이용한 빔 조향 결과와 비교가 가능하도록 하였다.

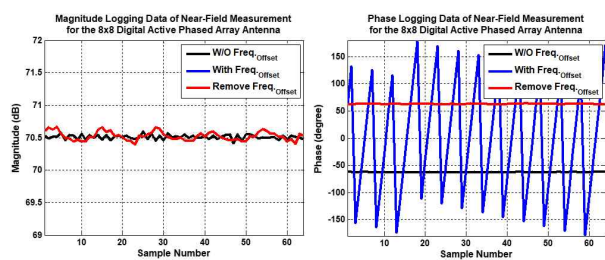
본 논문에서는 송신 주파수를 $f_{\#14}$ 로, 수신 주파수는 $f_{\#10}$ 으로 설정하여 송/수신 주파수 오프셋을 적용하고 빔

조향을 위한 위상 가변 시 산술 연산만 이용한 경우와 시간 지연을 함께 적용한 경우에 대해 각각 시험하였다. 이에 따라 송/수신 주파수 차이($f_{\#14} - f_{\#10}$)인 f_0 로 디지털 파형을 생성하고, 디지털 반도체 송수신 조립체의 운용 주파수와 수신기로 사용되는 보정신호생성모듈의 수신 주파수를 $f_{\#10}$ 로 동일하게 설정하였다.

광대역 빔 조향 측정 결과를 보이기 위해 앞서, 송/수신 동일 주파수를 적용한 경우와 주파수 오프셋을 적용한 경우의 근접전계 로깅 데이터를 비교하였다. 그림 8은 개구면 중심인 (0, 0) 위치에서의 근접전계 크기/위상을 나타낸다. 특히, 송/수신 주파수 오프셋이 적용된 경우에는, 잔존하는 주파수 오프셋 성분 제거를 위한 후처리 전/후 결과를 함께 제시하였다. 후처리 전/후로 크기는 동일하지만, 후처리 전의 위상은 주파수 오프셋 성분에 의해 시간에 따라 변화하게 된다. 반면, 후처리 후에는 송/수신 주파수가 동일한 경우와 마찬가지로 위상이 일정하게 유지됨을 확인할 수 있다.

마지막으로, 보어사이트와 $\phi=45^\circ$ 에서 $\theta=15^\circ/30^\circ/45^\circ$ 및 $\theta/\phi=45^\circ/0^\circ$, $\theta/\phi=45^\circ/90^\circ$ 로 조향한 빔 패턴 측정 후 결과를 비교하였다. 그림 9는 산술 연산만으로 빔 조향한 결과이고, 그림 10은 시간 지연기와 산술 연산을 함께 적용한 결과이다. 두 경우 모두 2차원 원전계 빔 패턴으로 비교했을 때는, 명령한 방향으로 조향되었음을 확인할 수 있다.

하지만 방위각/고각 방향의 1차원 빔 패턴으로 자세히 확인해 보면 빔 조향 정확도에서 차이가 있음을 알 수 있



(a) 근접전계 크기 측정 결과 (b) 근접전계 위상 측정 결과
(a) Magnitude of near-field data (b) Phase of near-field data

그림 8. 주파수 오프셋 성분 유무에 따른 수신 신호 비교
Fig. 8. Received signal comparison with and without a frequency offset component.

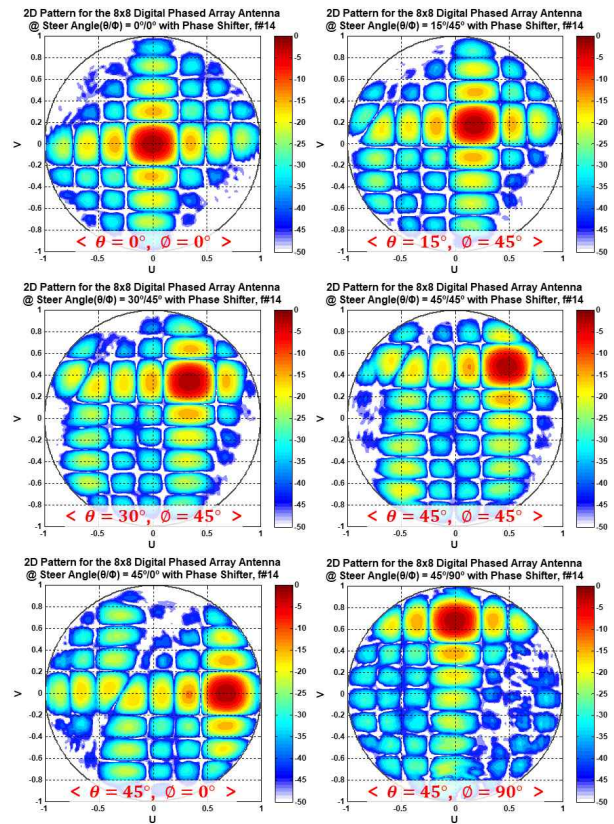


그림 9. 위상 변위기를 이용한 광대역 빔 조향 결과 @ 2차원 원전계 빔 패턴

Fig. 9. 2D far-field patterns for wideband beam steering with phase shifter.

다. 그림 11의 산술 연산을 통한 광대역 빔 조향 결과에서는 조향각이 커질수록 지향 오차도 커지고, 그림 12와 같이 시간 지연을 함께 적용한 광대역 빔 조향에서는 조향각이 커져도 지향 오차가 크게 열화되지 않고 명령한 위치로 조향됨을 확인할 수 있다.

이에 대한 빔 조향 오차 결과를 표 1에 비교/제시하였다. 빔 조향 오차는 방위각/고각 방향 각각에서 직관적으로 보이기 위해, 조향 명령한 θ/ϕ 값을 α/θ 좌표계로 변환 후 측정된 빔 패턴의 최대 지향 위치와의 차이로 계산하였다. 예상했던 것과 같이 최대 빔 조향 위치인 $\theta/\phi=45^\circ/0^\circ$ 에서, 이상적인 빔 패턴과 두 가지 방식으로 위상 가변한 측정 빔 패턴 모두 빔 조향 오차가 가장 크게 발생하였다. 시험한 빔 조향각에서 최대 조향 오차는 각각

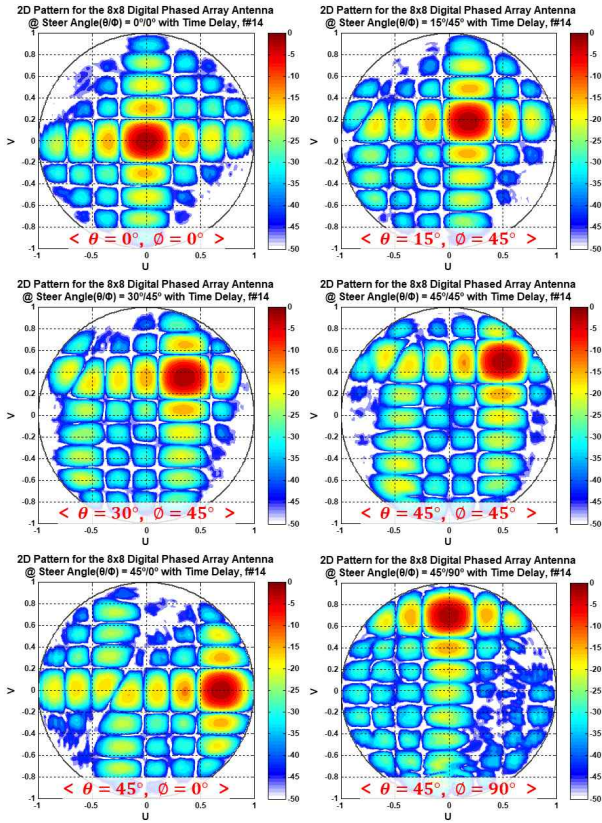
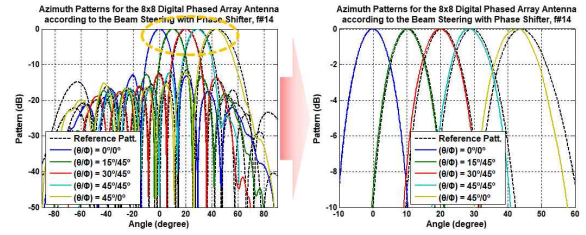


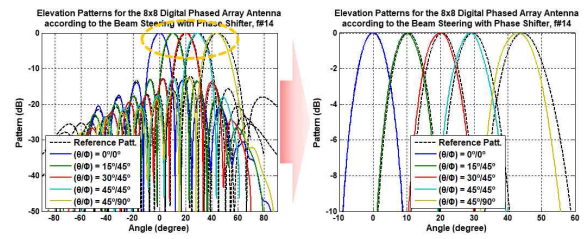
그림 10. 시간 지연기를 이용한 광대역 빔 조향 결과 @ 2차원 원진계 빔 패턴
Fig. 10. 2D far-field patterns for wideband beam steering with true time delay.

이상적인 경우 약 1.04° , 산술 연산을 적용한 경우 약 1.87° , 시간 지연을 적용한 경우 약 0.60° 수준으로, 측정 결과 간 차이는 약 3배에 달했다.

앞서 언급했던 것과 같이 본 논문에서 제작/시험한 능동위상배열 안테나는 배열 수가 적으므로, 빔폭이 매우 넓고 주 빔에 왜곡이 발생하게 된다. 이러한 원인들은 더 큰 빔 조향 오차를 야기시킬 수 있지만, 측정 빔 패턴에 동일하게 영향을 미치므로 빔 조향 오차를 비교하는 데에는 문제가 없다. 또한 해당 현상들은 배열 수가 증가할수록 자연스럽게 제거되거나 완화되기 때문에, 개구면이 큰 능동위상배열 안테나에서는 위상 변위기를 이용한 광대역 빔 조향 시 빔 스퀈트 현상을 더욱더 명확하게 확인할 수 있을 것이다.



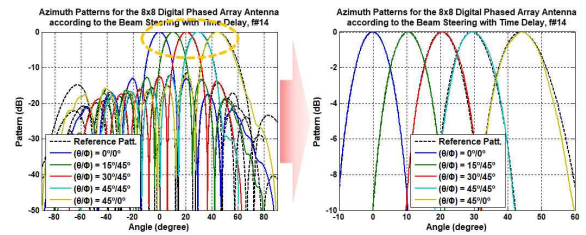
(a) 조향각에 따른 방위각 방향 빔 패턴
(a) Azimuth beam patterns according to the steering angle



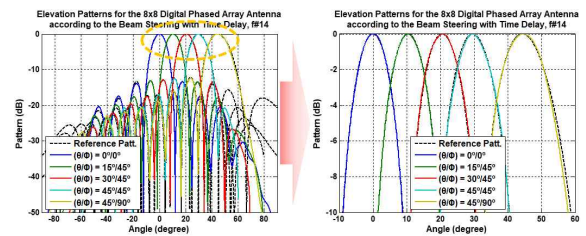
(b) 조향각에 따른 고각 방향 빔 패턴
(b) Elevation beam patterns according to the steering angle

그림 11. 위상 변위기를 이용한 광대역 빔 조향 결과 @ 1차원 원진계 빔 패턴

Fig. 11. 1D far-field patterns for wideband beam steering with phase shifter.



(a) 조향각에 따른 방위각 방향 빔 패턴
(a) Azimuth beam patterns according to the steering angle



(b) 조향각에 따른 고각 방향 빔 패턴
(b) Elevation beam patterns according to the steering angle

그림 12. 시간 지연기를 이용한 광대역 빔 조향 결과 @ 1차원 원진계 빔 패턴

Fig. 12. 1D far-field patterns for wideband beam steering with true time delay.

표 1. 위상 가변 방법에 따른 빔 조향 오차 비교(단위: °)
Table 1. Comparison of beam pointing errors by two phase shift techniques (unit: °).

Steering value (θ/ϕ)	Beam steering error ($\Delta\theta/\Delta\phi$)		
	Reference	Phase shifter	True time delay
0/0	0/0	-0.10/0.08	-0.13/0.10
15/45	-0.11/-0.07	-0.44/-0.53	-0.22/-0.20
30/45	-0.28/-0.17	-0.72/-0.58	-0.06/0.09
45/45	-0.61/-0.39	-1.39/-0.96	-0.29/-0.34
45/0	-1.04/-0.02	-1.87/-0.06	-0.60/-0.03
45/90	-0.01/-0.63	0.02/-1.87	0.04/-0.03

IV. 결 론

능동위상배열 안테나에서 빔 조향을 위한 소자별 위상 가변 방법에는 위상 변위기를 이용하는 방식과 시간 지연기를 이용하는 방식이 있다. 이 두 가지 방식은 위상을 가변하는 방법이 다르기 때문에, 일반적으로 위상 변위기는 협대역 시스템에 적용되고 시간 지연기는 광대역 시스템에서 사용된다. 광대역 시스템에서 위상 변위기를 이용해 빔 조향을 구현하면 빔 스캔 현상이 발생하게 된다. 빔 조향 시 이러한 빔 스캔트는 지향 오차를 크게 만들어, 광대역 레이다 시스템의 탐지/추적 성능을 저하시키거나 영상 레이다에서는 해상도 저하 및 영상 왜곡 등의 핵심 성능에 직접적으로 악영향을 미치게 된다.

본 논문에서는 먼저, 이 두 가지 위상 가변 방식에 대한 차이점을 설명하고, 그에 따른 광대역 빔 조향 결과를 비교하였다. 다음으로 광대역 빔 조향 검증을 위해 송/수신 주파수 오프셋을 이용한 근접전계 시험 구성 및 방법을 제안하고, 송/수신 주파수를 동일하게 사용하는 일반적인 근접전계 시험과의 신호 흐름을 수학적 식으로 비교하여 제안된 방법이 이론적으로 타당함을 증명하였다.

마지막으로, 제안된 송/수신 오프셋 주파수를 적용한 근접전계 시험 방법을 통해, 단일 주파수 단위 측정 방법인 근접전계 시스템의 환경적 제약을 극복하면서 광대역 순시 대역폭을 갖는 레이다 시스템의 실제 운용 상황을 모사하였다.

그 결과, 위상 변위기를 기반으로 한 빔 조향과 시간

지연을 기반으로 한 빔 조향 측정 패턴의 지향 정확도 오차에서 확연한 차이를 확인할 수 있었다. 이와 같은 측정 결과를 통해 제작된 디지털 능동위상배열 안테나의 광대역 빔 조향 기능과 동시에, 제안된 송/수신 주파수 오프셋 근접전계 시험 방법에 대한 유효성을 검증하였다.

References

- [1] I. Lupa, "Phased array: Technology and trends," in *2008 IEEE International Conference on Microwaves, Communications, Antennas and Electronic Systems*, Tel-Aviv, May 2008.
- [2] J. M. Joo, J. H. Lim, S. H. Hwang, J. Park, Y. D. Kang, and I. T. Han, et al., "Receiving near-field measurement of active phased array antennas applicable to full-digital multifunction radars," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 31, no. 2, pp. 188-199, Feb. 2020.
- [3] S. H. Talisa, K. W. O'Haver, T. M. Comberiate, M. D. Sharp, and O. F. Somerlock, "Benefits of digital phased array radars," *Proceedings of the IEEE*, vol. 104, no. 3, pp. 530-543, Mar. 2016.
- [4] H. Steyskal, "Digital beamforming: An emerging technology," in *MILCOM 88, 21st Century Military Communications: What's Possible? Conference Record. Military Communications Conference*, San Diego, CA, Oct. 1988, pp. 399-403.
- [5] J. M. Joo, J. H. Lim, J. Park, H. S. Jin, Y. D. Kang, and I. T. Han, et al., "Transmitting near-field measurement of full digital active phased array antennas for multi-function radar application," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 30, no. 12, pp. 979-991, Dec. 2019.
- [6] S. K. Kim, M. K. Chong, S. B. Kim, H. G. Na, S. Y. Kim, and J. B. Sung, et al., "Design of 4-bit TDL(true-time delay line) for elimination of beam-squint in wide band phased-array antenna," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 20, no. 10, pp. 1061-1070, Oct. 2009.

- [7] Y. Jeong, Y. Noh, M. Kim, S. Park, J. Choi, and J. Han, et al., "Design and fabrication of wideband high power transmission board using true time delay," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 35, no. 10, pp. 802-809, Oct. 2024.
- [8] S. Kwon, J. M. Joo, S. Park, Y. J. Jung, J. H. Lim, and H. Chae, et al., "Verification of beam steering based on true time delay in active phased array antennas," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 37, no. 2, pp. 121-128, Feb. 2026.
- [9] J. Jung, J. Ryu, J. Park, and J. Seo, "A study on configuration of true time delay phase shifter for wideband

beam steering phased array antenna," *Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology*, vol. 20, no. 3, pp. 413-420, Apr. 2017.

- [10] H. D. Chae, H. S. Kim, D. K. Lee, M. D. Jeong, and J. K. Park, "Transmit-beam pattern measurement of the active phased-array antenna using near-field measurement facility," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 22, no. 12, pp. 1155-1164, Dec. 2011.
- [11] A. Yaghjian, "An overview of near-field antenna measurements," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 34, no. 1, pp. 30-45, Jan. 1986.

주 정 명 [LIG 디펜스&에어로스페이스/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-8210-1758>



2011년 2월: 홍익대학교 전자전기공학부 (공학사)

2013년 3월: 홍익대학교 전자정보통신공학과 (공학석사)

2013년 1월~현재: LIG 디펜스&에어로스페이스 수석연구원

[주 관심분야] 수동 및 능동위상배열 안테나, 디지털 레이더 시스템, 다기능 레이더 시스템

박 세 준 [LIG 디펜스&에어로스페이스/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-2767-5572>



2013년 2월: 경북대학교 전자공학부 (공학사)

2013년 1월~현재: LIG 디펜스&에어로스페이스 수석연구원

[주 관심분야] RF Power Amplifier, 송수신 모듈 회로설계, 디지털 레이더 시스템

권 시 원 [LIG 디펜스&에어로스페이스/선임연구원]

<https://orcid.org/0009-0006-4926-3452>



2022년 2월: 한양대학교 ERICA 전자공학부 (공학사)

2022년 1월~현재: LIG 디펜스&에어로스페이스 선임연구원

[주 관심분야] 수동 및 능동위상배열 안테나, 레이더 시스템

정 영 주 [LIG 디펜스&에어로스페이스/선임연구원]

<https://orcid.org/0009-0005-0148-0100>



2022년 2월 : 서울과학기술대학교 전자공학과 (공학사)

2022년 10월~현재: LIG 디펜스&에어로스페이스 선임연구원

[주 관심분야] 디지털 레이더 시스템, RF 송수신모듈 시스템

채 희 덕 [LIG 디펜스&에어로스페이스/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0003-4609-1764>



1999년 2월: 서울대학교 전기컴퓨터공학부 (공학사)
2001년 2월: 서울대학교 전기컴퓨터공학부 (공학석사)
2008년 2월: 서울대학교 전기컴퓨터공학부 (공학박사)
2007년 3월~현재: LIG 디펜스&에어로스

페이스 수석연구원

[주 관심분야] 다기능 레이더 시스템, 우주감시 레이더 시스템, 위성 SAR 시스템, 전자파 수치 해석

염 동 진 [국방과학연구소/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0001-9690-3201>



1991년 2월: 충남대학교 전자공학과 (공학사)
1993년 2월: 충남대학교 전자공학과 (공학석사)
1993년 3월~현재: 국방과학연구소 수석연구원

[주 관심분야] 레이더 신호처리, 디지털

레이더 시스템, 우주감시 레이더 시스템

진 형 석 [LIG 디펜스&에어로스페이스/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-0764-9596>



1998년 2월: 수원대학교 전자재료공학과 (공학사)
2000년 8월: 광운대학교 전자공학과 (공학석사)
2000년 8월~현재: LIG 디펜스&에어로스페이스 수석연구원

[주 관심분야] 디지털 레이더 시스템, 우주감시 레이더 시스템

김 두 수 [국방과학연구소/책임연구원]

<https://orcid.org/0000-0003-1570-1291>



2001년 2월: 서강대학교 전자공학과 (공학사)
2006년 2월: 포항공과대학교 전기전자공학과 (공학석사)
2006년 1월~현재: 국방과학연구소 책임연구원

[주 관심분야] 디지털 레이더 시스템, 우주감시 레이더 시스템, 최적화 알고리즘 구현

박 종 국 [LIG 디펜스&에어로스페이스/연구소장]

<https://orcid.org/0000-0001-5834-9238>



1995년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학사)
1997년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학석사)
2001년 8월: 서울대학교 전기컴퓨터공학부 (공학박사)
2001년 11월~현재: LIG 디펜스&에어로

스페이스 초고주파기술연구소장

[주 관심분야] 능동 위상 배열 안테나 시스템, 다기능 레이더 시스템, 적응형 빔 형성, 전자파 수치 해석