

비선형 소자를 사용한 C대역 선형 Frequency Diverse Array 시스템 구현에 대한 연구

Implementation of C-Band Linear Frequency Diverse Array Using Non-Linear Components

최 우 혁 · 정 준 호 · 김 경 태

Woo-Hyeok Choi · Jun-Ho Jung · Kyeong-Tae Kim

요 약

주파수 다양성 배열은 기존의 위상 배열과는 달리, 거리와 방위각을 구분할 수 있는 독특한 방사 특성을 제공한다. 이러한 특성은 레이더 및 무선 전력 전송과 같은 응용 분야에서 주목받으며 활발한 연구가 진행되고 있다. 그러나 각 안테나에 서로 다른 주파수의 신호를 인가하는 방식은 기존 트랜시버로 구현하기 어려운 기술적 한계를 가지고 있어, 주파수 다양성 배열의 실제 구현 및 성능 검증이 도전 과제로 남아 있다. 본 연구에서는 RFSoc를 활용하여 C대역에서 동작하는 주파수 다양성 배열을 설계하였으며, 설계된 배열의 성능을 검증하기 위해 시뮬레이션 결과와 측정값을 비교 분석하였다.

Abstract

A frequency diverse array (FDA) offers unique radiation characteristics that enable the distinction of range and angle, unlike conventional phased arrays. These distinctive features have attracted attention and conducted active research in applications such as radar and wireless power transfer. However, the implementation of FDA faces technical challenges, as conventional transceivers are not capable of applying signals with different frequencies to individual antennas. This limitation has made the practical realization and performance validation of FDAs a challenging task. In this study, an FDA operating in the C-band was designed using an RFSoc, aiming to overcome these limitations. Furthermore, the performance of the designed FDA was verified by comparing simulation results with measured data.

Key words: Frequency Diverse Array, RFSoc, Implementation

I. 서 론

주파수 다양성 배열(frequency diverse array, FDA)은 기존의 위상 배열과 달리 거리와 방위각을 구분할 수 있는

방사 특성을 가지고 있다^[1]. 위와 같은 특성을 이용하여 무선 전력 전송^[2], 통신^[3], 레이더^[4]등의 분야에서 활발한 연구가 진행되고 있다.

각각의 안테나에 다른 위상을 가진 신호를 인가하는

「본 과제(결과물)는 경상북도 RISE 재원으로 지원을 받아 수행된 연구결과입니다.」

포항공과대학교 전기전자공학과(Department of Electrical Engineering, Pohang University of Science and Technology)

· Manuscript received January 16, 2025 ; Revised January 24, 2025 ; Accepted June 10, 2025. (ID No. 20250116-009)

· Corresponding Author: Kyeong-Tae Kim (e-mail: kkt@postech.ac.kr)

위상 배열과는 다르게 FDA는 다른 주파수를 가진 신호를 인가하여 빔 패턴을 형성한다. 이는 기존의 트랜시버의 특징인 위상 변환만으로는 FDA를 설계할 수 없음을 의미한다. 그렇기에 FDA는 최근까지도 대부분 이론적인 특성만을 이용해 시뮬레이션 기반으로 연구를 진행했다.

이런 FDA를 실험적으로 증명하기 위해 최근 2년간 RFSoc를 이용한 연구가 진행되고 있다^{[5]-[8]}. 참고문헌 [5]의 경우 FDA의 빔 패턴을 실험적으로 보여주었고 참고문헌 [6]의 경우 FDA를 사용하여 무선 전력 전송 효율이 늘어남을 확인했다. 참고문헌 [7]의 경우 FDA 레이더를 사용하면 거리 해상도 측면에서 성능이 떨어지나 거리-도플러의 비모호성 측면에서는 성능이 향상됨을 보여주었으며 참고문헌 [8]의 경우 최초로 FDA를 이용한 통신 시스템을 구현했다. 그러나, 최근 나온 모든 논문에서 진행한 실험들이 모두 간단한 배열 안테나 구조를 사용하고 증폭기와 같은 비선형 소자를 사용하지 않은 상태에서 실험을 진행하였기에 실제 FDA의 성능을 검증하였다고 보기엔 부족한 점이 존재한다.

본 논문에서는 차후 다중입력 다중출력(multiple-input and multiple-output, MIMO) FDA 레이더 설계를 위해 RFSoc를 이용한 다중입력 단일출력(multiple-input and single-output, MISO) FDA 설계 및 측정 방식을 제안한다. 설계 및 측정은 차후 드론 탐지 레이더로의 확장을 고려하여 C 대역에서 진행했다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어있다. 제 II장에서는 기존 FDA 이론에 대해 간략하게 설명한다. 제 III장에서는 MISO FDA 시스템을 제시한다. 제 IV장에서는 제안하는 FDA 시스템의 측정값과 시뮬레이션 데이터를 비교 분석한다.

II. FDA 이론

각 안테나에 다른 주파수를 가지는 FDA는 그림 1과 같이 표현할 수 있다. 총 M 개의 송신 안테나로 선형 배열을 만들었을 때 관측 지점 (R, θ) 에서 수신된 신호를 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$S(t, R, \theta) = \sum_{m=0}^{M-1} e^{j[2\pi f_m(t - (R - m d \sin \theta)/c) + \phi_m]} = e^{j2\pi f_0(t - R/c)} \sum_{m=0}^{M-1} e^{j[2\pi \Delta f_m(t - (R - m d \sin \theta)/c) + 2\pi f_0 m d \sin \theta + \phi_m]} \quad (1)$$

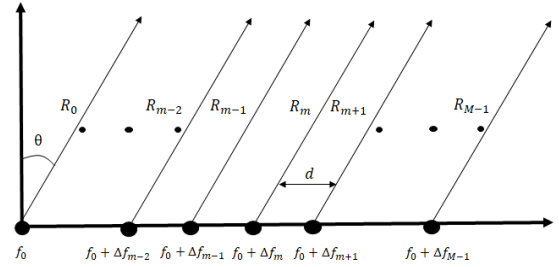


그림 1. FDA 기본 개념도

Fig. 1. Concept for FDA.

이 때, $f_m = f_0 + \Delta f_m$, $m = 0, 1, \dots, (M-1)$ 이고, f_0 는 중심 주파수, Δf_m 은 주파수 증분, ϕ_m 은 m 번째 안테나의 초기 위상값, c 는 빛의 속도, 그리고 R_m 은 m -번째 안테나와 관측 지점 간의 거리다. R_m 의 경우에는 식 (2)와 같이 정의된다.

$$R_m = R - m d \sin \theta \quad (2)$$

이 때, d 는 안테나 사이의 거리이다.

한편, 송신 안테나에 급전되는 주파수 증분이 중심 주파수보다 작다고 가정한다면 ($f_0 \gg \Delta f_m$), 식 (1)로부터 배열 인자 (AF, array factor)를 얻을 수 있고 이는 식 (3)과 같이 정리된다.

$$AF(t, R, \theta) = \sum_{m=0}^{M-1} e^{j[2\pi \Delta f_m(t - R/c) + (2\pi f_0 m d \sin \theta + 2\pi m \Delta f_m d \sin \theta)/c + \phi_m]} \approx \sum_{m=0}^{M-1} e^{j[2\pi \Delta f_m(t - R/c) + (2\pi f_0 m d \sin \theta)/c + \phi_m]} \quad (3)$$

AF를 분석해보면, 기존의 위상 배열과 차별화되는 요소는 주파수 증분임을 확인할 수 있다. 따라서 대부분의 FDA 연구는 시스템의 목적에 따라 주파수 증분을 최적화하는 방향으로 진행된다. 그중 가장 대표적인 주파수 증분 형태는 선형적인 형태이며, 이 경우 주파수 증분은 식 (4)와 같이 정의된다.

$$\Delta f_m = m \Delta f \quad (4)$$

이 경우 FDA의 AF는 그림 2와 같은 auto-scanning 형태를 가지게 된다. 즉, 회전하는 안테나와 같이 시간에 따라 전력이 전달되는 각도가 바뀌게 된다. 이는 그림 3과 같은 시간에 영향을 받지 않고 특정 각도로만 전력이 집중

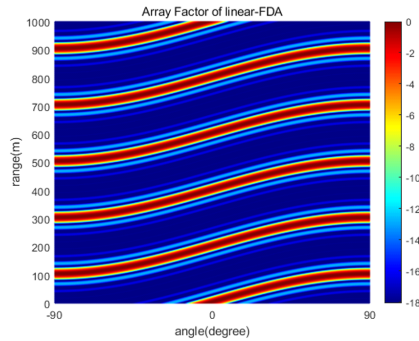


그림 2. 선형 FDA의 AF
Fig. 2. AF of linear-FDA.

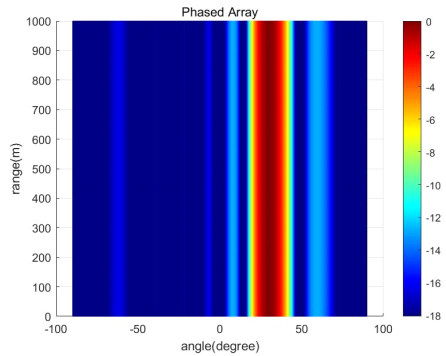


그림 3. 위상 배열의 AF
Fig. 3. AF of phased array.

되는 특성을 가지는 위상 배열의 AF와 가장 큰 차이를 보여주는 예시이다. 또한, 주기성을 지니게 되는데 이는 식 (5)와 같이 정의된다.

$$T = 1/\Delta f \quad (5)$$

이 때, T 는 FDA의 주기를 의미한다.

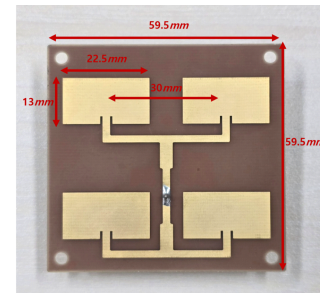
선형 FDA는 위상 배열과의 차이를 가장 잘 보여주는 예시이기에 본 논문에서는 선형 FDA를 이용하여 FDA의 성능을 측정했다.

III. MISO FDA 시스템

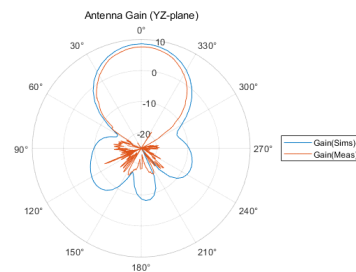
최근 다양한 논문에서 FDA 시스템을 설계하고 측정하고 있다. 하지만, 증폭기와 같이 위상에 변화가 일어나는 비선형소자를 함께 사용한 경우는 없다. FDA 역시 위상

에 민감한 특성을 가지고 있고 레이다로 사용하기 위해서는 높은 전력이 필요하기에 증폭기와 함께 설계한 후 FDA의 성능을 파악하는 것은 매우 중요하다. 그렇기에 본 논문에서는 증폭기와 저잡음 증폭기를 활용해 시스템을 설계한 후 실험을 진행했다.

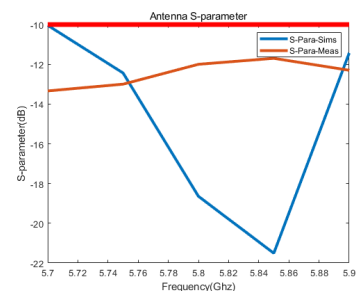
또한, 원거리의 물체를 탐지하기 위해 안테나를 설계하였으며 안테나의 특성은 그림 4와 같다. 이 안테나는



(a) 2×2 패치 안테나
(a) 2×2 patch antenna



(b) 2×2 패치 안테나의 이득
(b) 2×2 patch antenna gain



(c) 2×2 패치 안테나의 S-파라미터
(c) S-parameter of 2×2 patch antenna

그림 4. 설계한 패치 안테나의 특성

Fig. 4. Property of patch antenna.

전력 분배기를 통해 2×2 패치 안테나를 하나의 안테나로 사용하였고, 이에 따른 선형 FDA의 AF는 그림 5와 같이 나타난다. 그림 5를 보면 지향성을 높이기 위해 전력 분배기를 통해 배열 안테나를 단일 안테나로 사용한다면 최대 전력이 전달되는 각도의 범위가 줄어들어 그림 2와 비교했을 때, scanning 성능이 떨어지는 trade-off가 발생하는 것을 알 수 있다. 즉, 시스템의 목적에 따라 어떤 안테나를 사용할지 선택해야 한다.

그림 6은 전체 FDA 시스템의 개략적인 구조를 나타낸다. 본 시스템에선 RFSoc로 ZCU-216 보드를 사용했다. RFSoc의 가장 큰 특징은 디지털 믹서를 통해 자유롭게 주파수 변환을 진행할 수 있으며 수식을 통해 송신 및 수신 채널의 위상을 조절하여 높은 각도 해상도를 가지도록 빔 포밍을 할 수 있다는 점이다. 본 논문에서는 RFSoc의 디지털 믹서를 활용하여 주파수 상향 변환과 하향 변

환을 수행함으로써, 각 안테나에 전달되는 주파수를 자유롭게 설정했다. 송신단에는 전력 증폭기를, 수신단에는 저잡음 증폭기를 사용하여 시스템의 전체 전력을 향상시켰다. 또한, 증폭기로 인해 발생하는 위상 변화를 보정하기 위해 실험 전에 루프백 테스트를 진행하였다. 루프백 테스트를 진행할 때 사용하는 케이블이나 내부 메모리들 사이의 클락에 따른 시간 오차를 계산하여 알고리즘을 구현했다. 이를 통해 실험 전 각 송신 안테나에 인가되는 신호의 위상 오차를 5° 이내로 유지했다. 본 논문에서 위상 전이기를 사용하지 않은 이유는 RFSoc를 활용할 경우 차후 mm-wave 이상의 높은 주파수 대역으로 확장하여 다수의 비선형 소자가 추가되더라도 본 논문에서 제안한 루프백 알고리즘을 통한 위상 변화 보정과 수식을 통해 송수신단에서 위상을 변경할 수 있는 RFSoc의 특성을 이용하면 수식을 통해 위상이 변화된 신호가 송신단을 통해 큰 오차 없이 송신되기 때문이다.

IV. 실험 결과

FDA의 성능을 검증하기 위해 총 두 번의 실험을 진행하였다. 실험은 실내에서 수행되었으며, 구체적인 실험 조건은 표 1에 제시되어 있다. 중심 주파수는 차후 C대역 드론 탐지 FDA 레이더 시스템으로의 발전을 위해 ISM 대역인 5.725 GHz로 선정했으며 위상 보정의 정확도를 높이고 FDA의 주기성을 잘 확인하는 동시에 높은 도플러 해상도가 요구되고 넓은 범위에서의 탐지가 필수적인 드론 탐지 레이더에 활용하기 위해 연속파를 사용했다. 또한, RFSoc의 ADC 샘플링 주파수를 고려했을 때 한 번

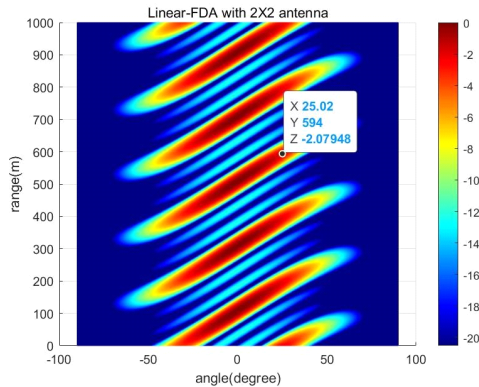


그림 5. 2×2 안테나를 사용한 선형 FDA의 AF
Fig. 5. AF of linear-FDA using 2×2 antenna.

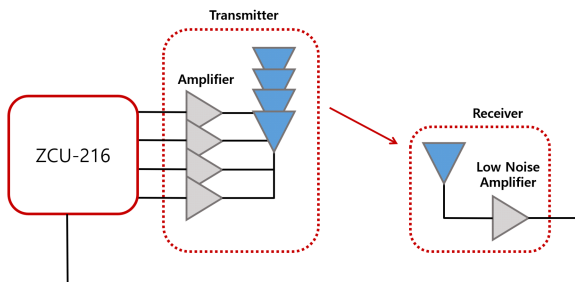


그림 6. FDA 시스템
Fig. 6. FDA system.

표 1. FDA의 매개변수

Table 1. Design parameter of FDA.

FDA model	Linear FDA
Frequency increment	1.5 MHz
Center frequency	5.725 GHz
Waveform	Continuous wave
Transmit channels	4
Receiver channels	1
ADC sampling rate	204.8 MHz

의 주기에 최소 100개 이상의 샘플을 얻기 위해서 주파수 증분을 1.5 MHz로 설정하였다. 안테나는 작은 RCS를 가지는 드론을 탐지하기 위해 이득이 높은 2×2 안테나를 단일 안테나로 사용했다.

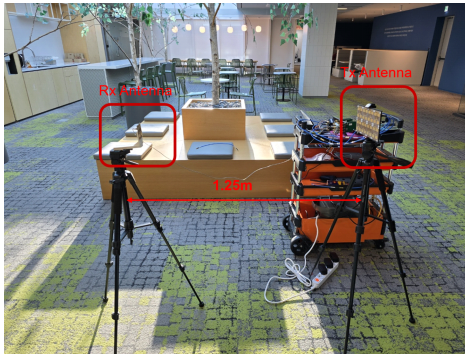
선형 FDA는 auto-scanning 특성을 가지므로, 각도에 따른 수신 전력의 최댓값은 사용된 안테나의 이득에 의해 결정된다. 또한, 선형 FDA는 주기적인 특성을 가지므로, 이러한 두 가지 특성을 측정하여 FDA 시스템의 성능을 검증하였다.

그림 7은 두 번의 실험이 진행된 환경을 보여준다. FDA의 주기성과 각도에 따른 수신 전력 변화를 확인하기 위해, 실험 2번에서는 수신단과 송신단 사이에 25° 각도 차이를 두었다. 두 실험 모두 송수신단의 거리를 1.25 m로 유지하여, 거리로 인한 수신 전력의 영향을 동

일하게 설정하였다. 기존의 PA의 경우 안테나의 이득에 AF를 곱해주어야 각도에 따른 전력 변화를 확인할 수 있다. 하지만 FDA는 이론적으로 시간에 따라 모든 각도에 주기적으로 최대 전력이 도달해야 하므로 본 실험을 통해 FDA의 특성을 확인할 수 있다. 또한, 높은 안테나 이득을 확보하기 위해 그림 4와 같은 안테나를 1×4 형태로 배치하여 실험을 진행했다. 이 때, 각 2×2 안테나 사이의 거리는 중심 주파수의 파장인 λ 로 설정했으며 이는 하나의 패치 안테나 기준으로 보면 각 안테나 사이의 거리가 $\lambda/2$ 가 된다. 또한, 배열 안테나를 확인하면 2×4 구조인데 이 중 상단행 만을 사용하여 실험을 진행했으며 차후 고각에서의 각도 추정이 필요한 드론 탐지 레이더로 사용하기 위해 이와 같은 배열 안테나를 구성하여 실험을 진행했다.

그림 8은 각각의 실험 결과를 보여준다. 수신단의 ADC 샘플링 주파수를 고려해봤을 때, 두 실험 모두 수신된 신호가 0.664 μ s의 주기를 가지는 것을 확인할 수 있었으며, 이는 식 (5)를 이용해 구한 1.5 MHz의 주파수 증분을 가지는 선형 FDA의 주기인 0.667 μ s와 일치함을 의미한다. 이를 통해 FDA가 이론대로 동작하고 있음을 확인할 수 있다. 또한, 두 실험을 통해 수신된 전력을 비교해보면 2.51 dB만큼의 차이가 나는 것을 확인할 수 있다. 이는 안테나의 이득을 계산해서 얻은 이론값인 2.91 dB와 비교했을 때 0.4 dB 만큼의 차이가 존재하는데 이는 실내 실험에 의한 오차와 증폭기 열에 따른 성능 저하를 고려해보면 발생할 수 있는 오차이다. 만약 PA를 사용했을 경우 이론적으로 계산된 수신 전력의 차이는 18.19 dB라는 것을 고려하면 실험한 시스템은 FDA로 동작함을 알 수 있다. 또한, 수신된 신호의 고속 푸리에 변환 (FFT, fast fourier transform)의 결과를 확인해보면 수신된 신호가 정확히 1.5 MHz씩 차이를 가짐을 알 수 있고 각 실험에서의 잡음 레벨의 차이가 나는 이유는 실내 실험 시 수신된 통신 신호의 세기가 다르기 때문이며 그 크기가 최대 수신 신호 대비 -20 dB 아래인 값을 보이기에 실험에 영향을 끼쳤다고 보기에는 힘들다.

실험 결과를 통해 본 논문에서 제시한 루프백 테스트를 이용한 위상 보정 기술을 적용한다면 비선형 소자인 증폭기가 있더라도 FDA가 이론과 같이 동작함을 알 수 있다.



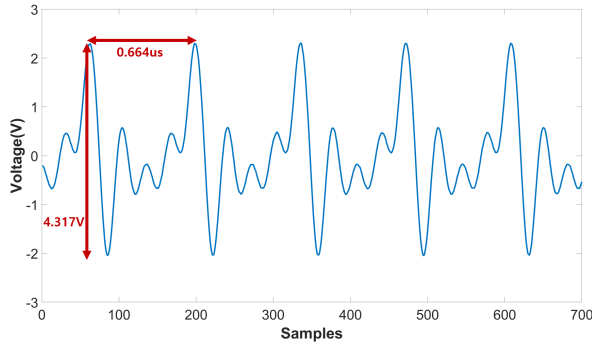
(a) 실험 1번의 환경
(a) The environment of the first experiment



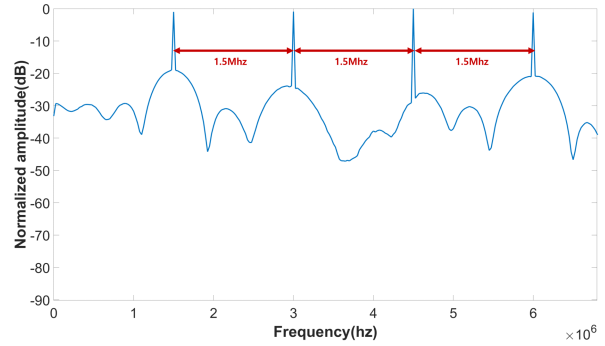
(b) 실험 2번의 환경
(b) The environment of the second experiment

그림 7. 실내 실험환경

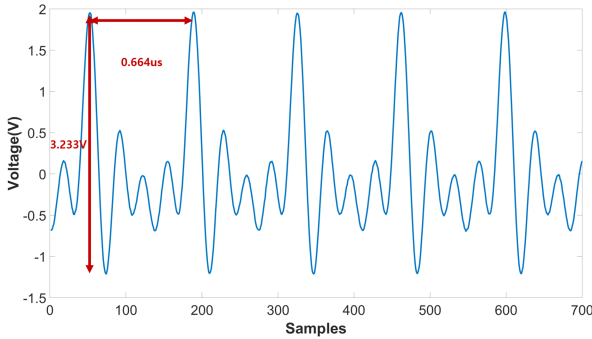
Fig. 7. Indoor experimental environment.



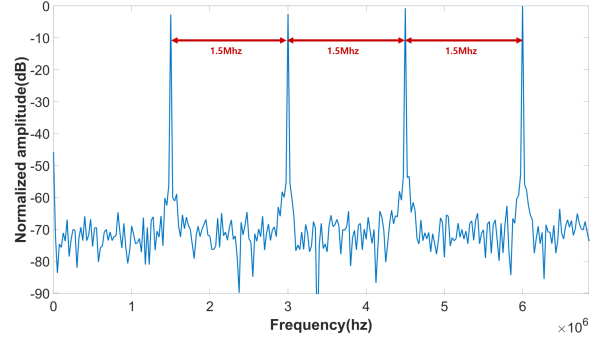
(a) 1번 실험에서 수신한 신호
(a) The signal received in the first experiment



(b) 1번 실험에서 40 μs동안 수신한 신호의 FFT 결과
(b) FFT result of the signal received over a 40 μs duration in the first experiment



(c) 2번 실험에서 수신한 신호
(c) The signal received in the second experiment



(d) 2번 실험에서 40 μs동안 수신한 신호의 FFT 결과
(d) FFT result of the signal received over a 40 μs duration in the second experiment

그림 8. 실내 실험 결과 수신한 신호
Fig. 8. The signal received in indoor experiments.

V. 결 론

본 논문은 RFSoC를 이용한 송수신단 시스템 설계를 통해 FDA 성능을 측정하는 방식을 제안하였다. FDA 시스템을 설계할 때 차후 드론 탐지 C대역 레이더 시스템으로의 발전을 위해 송신단에는 증폭기, 수신단에는 저잡음 증폭기를 장착했다. 이를 통해 생기는 위상 오차에 대해 보정하기 위해 루프백 테스트를 진행하여 실험의 정밀도를 향상시켰다. FDA 시스템 측정 결과, 이론값과 측정값 간의 차이가 크지 않음을 확인하였고, 이를 통해 제안된 방식의 FDA 시스템이 안정적으로 동작함을 검증하였다. 이는 본 논문에서 제안한 방식이 차후 더 많은 비선형 소자가 사용되는 레이더 시스템이나 통신 시스템에

적용되어 널리 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

References

- [1] P. Antonik, M. C. Wicks, H. D. Griffiths, and C. J. Baker, "Frequency diverse array radars," in *2006 IEEE Conference on Radar*, Verona, NY, Apr. 2006, p. 3.
- [2] E. Fazzini, T. Tiberi, A. Costanzo, and D. Masotti, "Enabling multispot wireless power transmission via pulsed FDA for simultaneous dislocated charging," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 23, no. 11, pp. 3847-3851, Nov. 2024.
- [3] J. Jian, W. Q. Wang, B. Huang, L. Zhang, M. A. Imran,

- and Q. Huang, "MIMO-FDA communications with frequency offsets index modulation," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 23, no. 5, pp. 4580-4595, May 2024.
- [4] C. Wen, Y. Huang, J. Peng, J. Wu, G. Zheng, and Y. Zhang, "Slow-time FDA-MIMO technique with application to STAP radar," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 58, no. 1, pp. 74-95, Feb. 2022.
- [5] N. R. Munson, B. Correll, R. M. Narayanan, and T. D. Bufler, "Experimental test of a frequency diverse array radar target detection system using SDRs: Preliminary results," in *2024 IEEE Radar Conference(RadarConf24)*, Denver, CO, May 2024.
- [6] T. Tiberi, E. Fazzini, A. Costanzo, and D. Masotti, "Exploitation of harmonic generation in time-controlled frequency-diverse arrays for WPT," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 72, no. 1, pp. 497-505, Jan. 2024.
- [7] P. M. McCormick, A. Jones, N. Kellerman, B. Mathieu, and A. Mertz, "Experimental demonstration of a low-complexity multiple-input single-output frequency diverse array framework," in *2023 IEEE Radar Conference(RadarConf23)*, San Antonio, TX, May 2023.
- [8] N. R. Munson, B. Correll Jr, J. K. A. Henry, R. M. Narayanan, and T. D. Bufler, "Design and implementation of a binary phase-shift keying frequency diverse array: Considerations and challenges," *Sensors*, vol. 25, no. 1, p. 193, Jan. 2025.

최 우 혁 [포항공과대학교/박사과정]

<https://orcid.org/0000-0002-1816-1342>



2021년 2월: 부산대학교 전자공학과 (공학사)
2023년 2월: 부산대학교 전기전자공학부 (공학석사)
2024년 2월~현재: 포항공과대학교 전기전자공학과 박사과정
[주 관심분야] 레이더 시스템, RF 회로 및

시스템, 전자응용

정 준 호 [포항공과대학교/석·박사통합과정]

<https://orcid.org/0009-0008-5147-4448>



2022년 8월: DGIST 기초학부 (공학사)
2023년 9월~현재 : 포항공과대학교 전기전자공학과 석·박사통합과정
[주 관심분야] 레이더 신호처리, 레이더 디지털 시스템 디자인 및 RF 시스템 통합

김 경 태 [포항공과대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0003-1200-5282>



1994년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학사)
1996년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학석사)
1999년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학박사)
2002년 3월~2011년 2월: 영남대학교 전자공학과 교수

2011년 3월~현재: 포항공과대학교 전자전기공학과 교수
2012년 9월~2017년 12월: 레이더/IR 표적식별 특화연구실실장
2018년 1월~현재: 무인감시정찰기술연구센터장
2019년 4월~현재: 차세대 영상레이더시스템 연구센터장
2020년 11월~현재: 차세대 국방융합기술 연구센터장
[주 관심분야] 레이더 신호 처리 및 영상, 레이더 표적인식 및 패턴인식, 전자기수치해석 및 RCS 측정