

주파수 다양 배열 레이다

Frequency-Diverse Array Radars

조 춘 식

Choon Sik Cho

요 약

위상 배열 레이다에서 동일한 방위각이 유지되고 있으면 거리 구분이 불가능하여 이를 해결하기 위한 한 방법으로 주파수 다양 배열 레이다가 제안되어 최근 많은 연구가 이루어지고 있다. 위상 배열 레이다가 위상이 다른 신호들을 배열하여 빔을 한 방위각으로 투사하는 레이다라면 주파수 다양 배열 레이다는 위상은 같으나 주파수가 다른 신호들을 배열하여 빔을 형성하는 레이다로써 거리와 방위각을 구분하는 2차원 빔을 형성하는 장점을 보인다. 주파수 다양 배열 레이다는 주파수 오프셋만큼 이웃하는 배열 요소들 사이 주파수를 소량 변경하여 표적으로 향하는 빔을 형성하는 방식을 사용한다. 이때 주파수 오프셋이 상수인지 변수인지, 또 선형적인지 비선형적인지에 따라서 빔 패턴의 형성이 변동된다. 위상 배열 레이다에 비하여 매우 뛰어난 장점이 존재하여 표적 탐지 정밀도에서 유리하나 여러 단점 또한 존재한다. 레이다의 성능을 발전시키고 단점을 극복하기 위한 다양한 연구성과들과 다양한 응용 현황을 본 고에서 고찰하여 주파수 다양 배열 레이다의 현재와 미래를 다루고자 한다.

Abstract

If the same azimuth angle is maintained in phased-array radar, it is impossible to distinguish the range. To solve this problem, frequency-diverse array radar has been proposed; many studies have been conducted recently. If the phased-array radar arranges signals with different phases and projects a beam at one azimuth angle, the frequency-diverse array radar produces a two-dimensional beam that distinguishes range and angle by arranging signals with the same phase but different frequencies. Frequency-diverse array radar produces a beam directed to a target by changing the frequency offset between neighboring array elements. The beam pattern varies according to whether the frequency offset is constant or variable, and whether it is linear or non-linear. Compared to phased-array radar, there are significant advantages including target-detection accuracy; there are also several disadvantages. In this paper, we discuss frequency-diverse array radar and its future, considering research achievements and applications to improve performance and overcome its disadvantages.

Key words: Radar, Frequency Diverse Array Radar, Phased Array Radar

I. 서 론

방위각(angle)이 같으면 거리(range) 구분이 불가능한

위상 배열 레이다의 문제를 해결하기 위하여 주파수 다양 배열(FDA, frequency diverse array) 레이다가 2006년 처음 제안된 이후 많은 연구가 진행되어왔다^[1]. 위상 배열

「이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2022R1F1A1072478).」

한국항공대학교 전기전자공학과 (Department of Electrical and Electronic Engineering, Korea Aerospace University)

· Manuscript received October 19, 2023 ; Revised September 14, 2023 ; Accepted January 9, 2024. (ID No. 20231019-001S)

· Corresponding Author: Choon Sik Cho (e-mail: cscho@kau.ac.kr)

레이다가 위상이 다른 신호들을 배열하여 빔을 한 방위각으로 투사하는 레이더라면 FDA 레이다는 위상은 같으나 주파수가 다른 신호들을 배열하여 빔을 형성하는 레이더로써 거리와 방위각을 구분하는 2차원 빔을 형성하는 장점을 보인다^{[2],[3]}. FDA 레이다는 주파수 오프셋(Δf)만큼 이웃하는 배열 요소들 사이 주파수를 소량 변경하여 표적으로 향하는 빔을 형성하는 방식을 사용한다. 이때 Δf 가 상수인지 변수인지, 또 선형적이냐 비선형적이냐에 따라 빔 패턴의 형성이 달라진다. 위상 배열 레이더 대비 FDA 레이다는 1) 거리 및 방위각 구별 가능한 빔 형성, 2) 위상 천이기 불필요, 3) 설계의 자유도 증가, 4) 거리 모호성의 제거라는 매우 뛰어난 장점이 존재하여 표적 탐지 정밀도에서 유리하나, 1) 빔 패턴이 시변이고, 2) 빔 패턴이 거리와 방위각의 상호 커플링되는 현상, 3) 부엽 수준(SLL)이 높게 나타나는 현상, 4) 연속파 신호 사용 시 빔 최대값이 주기적으로 나타나는 현상 등의 많은 단점이 존재한다.

이와 같은 문제를 해결하기 위하여 수많은 연구가 진행되어 왔는데, 우선 빔 패턴의 시변성을 해결하기 위하여 송신 신호를 펄스로 사용하거나 시변조시킨 Δf 를 사용한다. 그리고 거리-방위각이 상호 커플링되는 현상은 Δf 를 불균등하게 설계하면 많이 완화시킬 수 있고, 부엽 수준 또한 Δf 와 배열 구조에 따라서 감소 또는 증가하는 경향을 보인다^{[4],[5]}. 한편 송신 신호로 연속파 신호를 사용 시에 주기적인 최대값 반복 현상은 입력 신호를 적절하게 설계하면 완화되는 경향을 보인다. 그러나 FDA 레이더의 개념 제안 이후 약 17년간의 연구결과에도 위상 배열 레이더가 제공하는 빔 형성 성능이나 빔 조향 등의 성능에는 아직 미치지 못하고 있다. 다만 원천적으로 거리 모호성 해결 측면에서는 FDA가 월등한 성능일 수 밖에 없다. 그리고 FDA 레이더를 위한 트랜시버에 대한 연구는 개념 제안은 있으나 실제 구현한 결과는 거의 전무하다. 따라서 본 고에서는 FDA 레이더의 기본적인 이론과 문제점, 그리고 당면한 문제를 해결하기 위한 다양한 연구결과를 소개하고자 한다.

II. FDA 레이더의 이론

배열의 단위 간에 주파수 오프셋을 적용하면 그림 1과

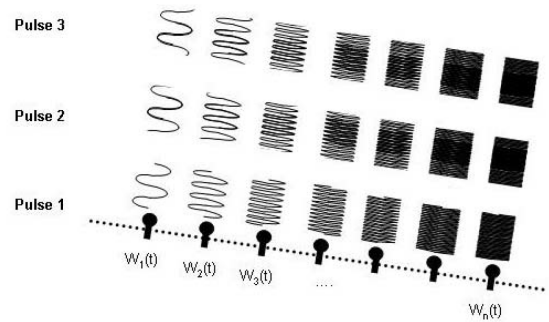


그림 1. FDA 레이더의 최초 제안 개념도^[1]

Fig. 1. The first proposed concept for the FDA radar^[1].

같이 구현할 수 있는데, 위상이 같아도 상이한 빔을 형성할 수 있는 FDA 레이더가 2006년 처음 제안되었으며, 이는 위상 배열 레이더의 본질적인 제약사항을 획기적으로 해소할 수 있는 희망을 선사하였다^[1]. 배열 단위 간 주파수 이격을 일정하게 만든 구체적인 개념도는 그로부터 수년이 지나서 그림 2와 같은 기본 개념도의 형태를 갖추게 되었다^[2]. 위상 배열 레이더가 제공하는 빔의 형태와 FDA 레이더가 만드는 빔의 형태를 모사하여 작성한 결과를 그림 3에 나타내었으며 거리와 방위각에 따라서 별도의 빔이 형성됨을 확인할 수 있다.

그림 2에서 m 번째 송신 신호 $s_m(t)$ 를 식 (1)과 같이 나타낼 수 있으므로

$$s_m(t) = e^{j2\pi f_m t} \quad (1)$$

가 된다. 여기서 $f_m = f_0 + m\Delta f$, $m = 0, 1, \dots, M-1$ 이며 f_0 는 반송 주파수, Δf 는 주파수 오프셋, M 은 배열의 개수를 일컫는다. 원역장 점 표적(그림 2의 θ , r 평면 상에

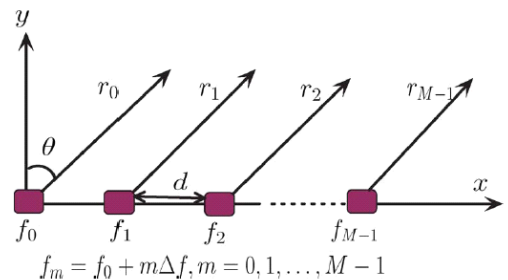
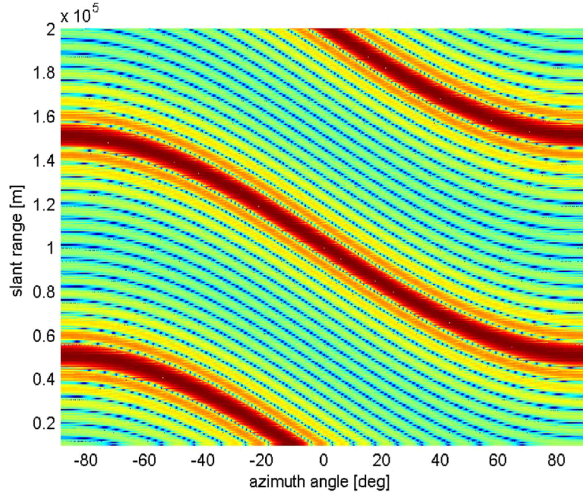
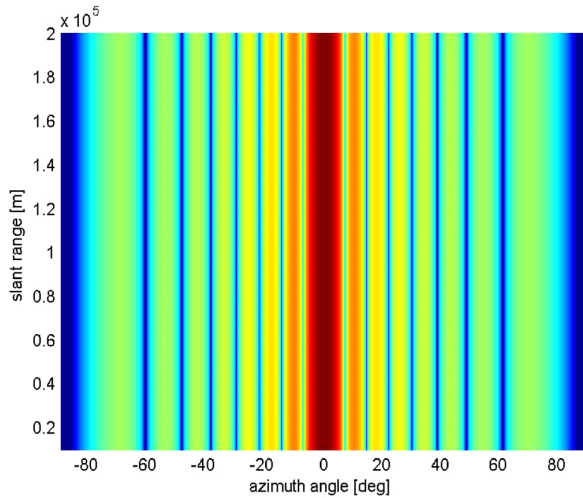


그림 2. FDA 레이더의 기본 개념도^[2]

Fig. 2. The basic concept for the FDA radar^[2].



(a) FDA 레이다의 2-D 빔 패턴
(a) The beam pattern for FDA radar



(b) PA(phased array) 레이다의 2-D 빔 패턴
(b) The beam pattern for PA(phased array) radar

그림 3. FDA와 PA 레이다의 2-D 빔 패턴 차이^[2]

Fig. 3. The beam pattern difference between FDA and PA (phased array) radars in 2-D^[2].

존재)에 도달하는 신호는 식 (2)와 같이 표현 가능하다.

$$s_m\left(t - \frac{r_m}{c_0}\right) = \exp\left\{j2\pi f_m\left(t - \frac{r_m}{c_0}\right)\right\} \quad (2)$$

여기서 c_0 는 빛의 속도를 나타낸다. d 가 배열 요소 간의 거리일 때, m 번째 배열 요소와 표적 간의 거리는 식(3)과 같다.

$$r_m = r_0 - md \sin \theta \quad (3)$$

한편 송신 신호의 가중 벡터가 균일하고, 협대역 신호의 경우 위치(θ, r)에서 배열 인자(array factor)는 다음과 같다^[3].

$$\begin{aligned} AF(t; \theta, r) &= \sum_{m=0}^{M-1} \frac{1}{r_m} \exp\left\{j2\pi f_m\left(t - \frac{r_m}{c_0}\right)\right\} \\ &\approx \frac{1}{r_0} \exp\left\{j2\pi f_0\left(t - \frac{r_0}{c_0}\right)\right\} \\ &\times \sum_{m=0}^{M-1} \exp\left\{j2\pi\left(m \Delta f t - m \frac{\Delta f r_0}{c_0} + m \frac{df_0 \sin \theta}{c_0}\right)\right. \\ &\quad \left.+ m^2 \frac{\Delta f d \sin \theta}{c_0}\right\} \end{aligned} \quad (4)$$

이를 간략화시키면,

$$AF(t; \theta, r) \approx \frac{e^{j\phi}}{r_0} \frac{\sin(M\pi X)}{\sin(\pi X)} \quad (5)$$

가 되고 여기서 ϕ 및 X 는 식 (6) 및 식 (7)에 나타내었다.

$$\begin{aligned} \phi &= 2\pi f_0\left(t - \frac{r_0}{c_0}\right) + \pi(M-1) \frac{\Delta f r_0}{c_0} + \pi(M-1) \frac{f_0 d \sin \theta}{c_0} \\ &+ \pi(M-1) \frac{\Delta f d \sin \theta}{c_0} + \pi(M-1) \Delta f t \end{aligned} \quad (6)$$

$$X = \Delta f t - \frac{\Delta f r_0}{c_0} + \frac{df_0 \sin \theta}{c_0} + \frac{\Delta f d \sin \theta}{c_0} \quad (7)$$

식 (5)에 나타난 것처럼 FDA 레이다의 배열 인자는 거리와 위상(방위각)의 함수이며 이는 위상 배열 레이다의 배열 인자와 확연히 다를 수 있다. 한편 식 (7)의 X 는 식 (8)과 같이 바꾸어서 표현할 수 있다.

$$X = \Delta f \left(t - \frac{r_0}{c_0} + \frac{df_0 \sin \theta}{\Delta f c_0} + \frac{d \sin \theta}{c_0}\right) \quad (8)$$

그러므로, $\theta = 0$ 과 $\theta = \pi/2$ 에서의 배열 인자의 최대값 차이는 $\left(\frac{c_0}{\Delta f}\right)\left(\frac{d}{\lambda_0}\right) + d$ 로써 배열 인자의 S자 형태는 d/λ_0

와 주파수 오프셋 Δf 의 함수임을 알 수 있다. 이를 2-D로 나타내면 그림 3과 같으며 3-D로 나타내면 그림 4와 같이 되어 위상 배열 레이다의 빔 패턴과 매우 다르고 거리와 위상(방위각) 두 변수에 따라서 변함을 보이고 있다.

위상 배열 레이다와 비교하여 거리 모호성의 문제를

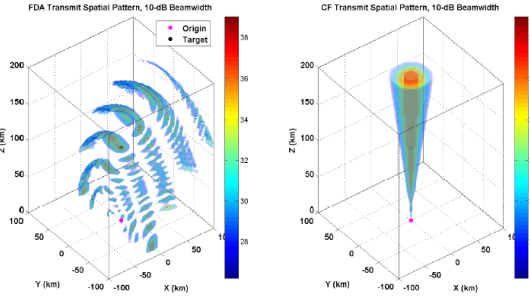


그림 4. FDA(왼쪽)와 PA(오른쪽) 레이더의 3-D 빔 패턴 차이^[4]

Fig. 4. The beam pattern difference between FDA(left) and PA(right) radars in 3-D^[4].

대폭 해결하였음에도 불구하고 FDA 레이더의 가장 큰 문제점은 빔 패턴의 시변성에 있다. 이를 해결하기 위하여 송신 신호를 펄스로 사용하거나 시 변조시킨 주파수 오프셋(Δf)을 적용하여 해결할 수도 있다. 빔 패턴의 시변성 외에 거리-방위각이 상호 커플링되는 현상 또한 FDA 레이더의 문제점 중의 하나인데 이 또한 Δf 를 불균등하게 설계하면 많이 완화시킬 수 있다. 그리고 빔의 부엽 수준 또한 Δf 의 적절한 설계와 배열 구조에 따라서 감소 또는 증가하는 경향을 보인다^{[5],[6]}.

한편 송신 신호로 연속파 신호를 사용 시에 주기적인 최댓값 반복 현상은 입력 신호를 적절하게 설계하면 완화되는 경향을 보인다. 이와 같이 FDA 레이더의 거리 모호성 해결이라는 장점에도 불구하고 빔 패턴의 시변성 등의 문제점은 해결해야 할 과제이고 이의 해결을 위하여서는 주로 주파수 오프셋의 정교한 설계와 배열 구조의 설계 등이 적용되고 있다. 다음 장에서는 FDA 레이더의 성능 개선을 위한 수많은 연구 결과를 소개하고자 한다.

III. FDA 레이더의 연구 동향

3-1 주파수 오프셋 연구

FDA 레이더의 빔 패턴은 II장에서 설명한 것과 같이 거리-방위각의 함수로써 나타나지만 시변성을 해결하기 위한 주파수 오프셋의 다양한 설계가 주 연구주제로 초기에는 자리매김하였다. Shao 등은 SINR(signal to interference plus noise ratio)을 평가하여 주파수 오프셋을 지능

적으로 제어하는 방법을 제시하였는데, 그림 5에 이론적인 구성도와 빔 패턴을 보이고 있으며 예상한 대로 주파수 오프셋의 적당한 선택이 레이더의 성능을 좌우하고 있음을 알 수 있다^[6].

FDA 레이더의 특성상 거리와 방위각에 따라서 빔 패

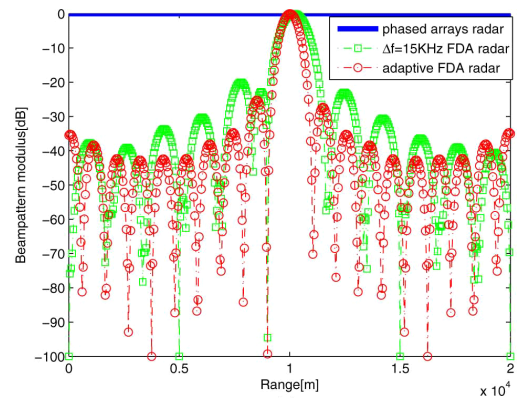
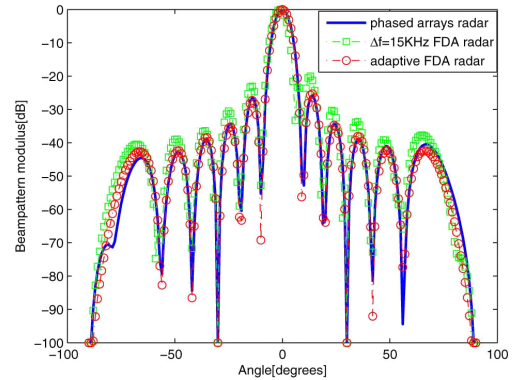
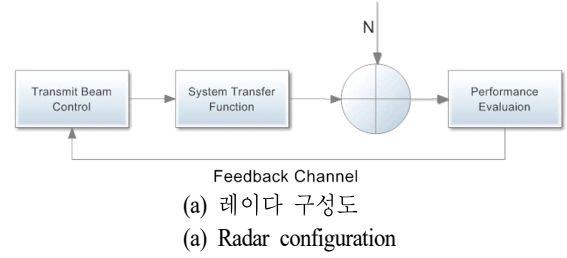


그림 5. 지능적인 주파수 오프셋을 적용한 FDA 레이더^[6]
Fig. 5. FDA radar applying the adaptive frequency offset^[6].

턴의 최대값이 수없이 많이 발생하는 현상을 해결하여 오직 단 하나의 최대 빔 패턴을 발생시키기 위하여 Khan 등은 주파수 오프셋을 식 (9)와 같이 적용하였다^[7]. 보통의 FDA 레이더는 m 번째 배열 인자의 주파수 오프셋은 $m \times \Delta f$ 를 사용하지만, Khan 등은 로그 함수를 사용하여 m 번째 주파수 오프셋을 식 (9)처럼 설계하였다.

$$\Delta f_m = \log(m+1)\delta \quad (9)$$

이며 여기서 δ 는 설계자가 조절하는 매개 변수 주파수이다. 이를 적용하여 설계한 FDA 레이더의 이론적인 빔 패턴을 그림 6에 나타내었는데, 예상하였듯이 거리와 방위각 기준으로 한 곳에서만 최대값이 나타남을 알 수 있다. 그러므로 FDA 레이더의 가장 큰 단점인 빔 패턴의 최대값 반복을 완화시켰음을 볼 수 있다.

로그 함수 대신 무작위 주파수 오프셋을 사용한 FDA 레이더의 설계를 Li 등이 선보였는데, 빔 패턴이 거리-방위각 평면에서 로그 함수 기반 주파수 오프셋 보다 훨씬 더 안정적임을 볼 수 있다^[8]. 식 (10)에서 보이는 무작위 주파수 오프셋을 사용하여 이론적으로 모사한 빔 패턴을 그림 7에 나타내었다. 그림 7의 빔 패턴은 특정한 거리와 방위각에서 최대값을 보이므로 앞의 그림 6 결과보다 훨씬 성능이 개선됨을 알 수 있다.

$$\Delta f_m = \delta_m \cdot \Delta f \quad (10)$$

여기에서 $\delta_m \sim U(0, 1)$ 즉, 균일 분포(uniform distri-

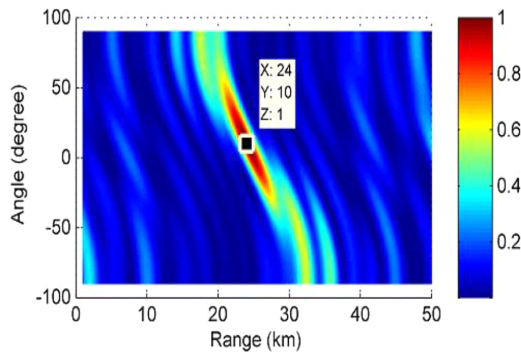


그림 6. 로그 함수를 주파수 오프셋에 적용한 FDA 레이더의 빔 패턴^[7]

Fig. 6. Beam pattern for the FDA radar applying the logarithmic function to the frequency offset^[7].

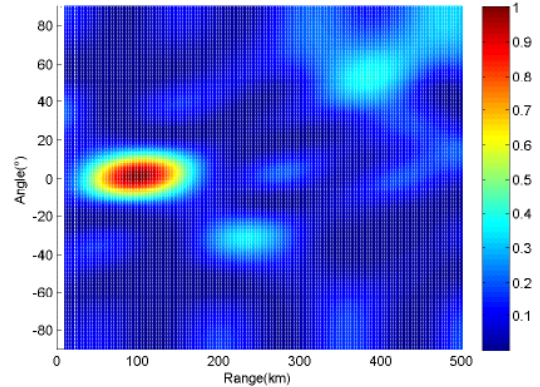


그림 7. 무작위 주파수 오프셋을 사용한 FDA 레이더의 빔 패턴^[8]

Fig. 7. Beam pattern for the FDA radar using the random frequency offset^[8].

bution)를 띤다.

그리고 Nusenu 등은 costas sequence를 주파수 오프셋에 적용하였는데, 이는 costas code를 사용하여 주파수 오프셋을 계산하기 위하여 마치 계단식의 주파수를 미리 정한 방법으로 무작위로 선택한다^[9]. 그림 8에 이를 적용한 송신 빔 패턴을 나타내었는데, 거리-방위각 coupling 효과를 많이 완화시킨 결과를 볼 수 있다. 그러나 costas code를 실제 구현하기 위하여서는 hardware의 복잡성이 증가하므로 coupling 효과와 절충이 필요하다.

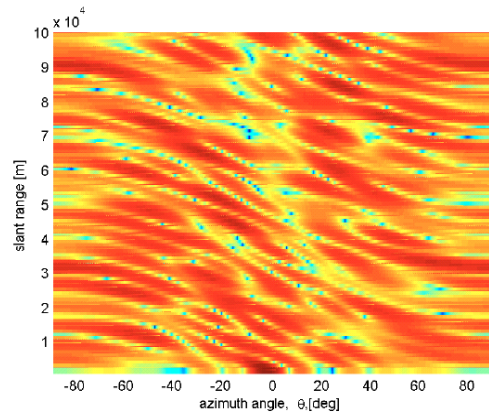


그림 8. Costas sequence를 주파수 오프셋에 적용시킨 FDA 레이더의 빔 패턴^[9]

Fig. 8. FDA radar beam pattern applying the Costas sequence to the frequency offset^[9].

지금까지는 주파수 오프셋을 구성하기 위하여 특정한 수식이나 *sequence*를 사용하였으나 Cheng 등은 레이더의 성능을 최대로 만들기 위한 주파수 오프셋의 최적화 알고리즘을 제안하였다^[10]. 이를 위하여 CRLB(Cramér-Rao lower bound)에 기초하여 주파수 오프셋을 최적화하였고 이를 적용한 레이더의 빔 패턴을 그림 9와 같이 묘사하여 일반적인 FDA 레이더의 빔 패턴 보다 훨씬 개선된 성능을 보이고 있다. 그런데 이를 실제로 *hardware*로 구현한다면 최적화를 위한 *logic* 등의 설계가 매우 복잡한 개연성이 큰 것이 단점으로 작용할 수 있다.

한편 주파수 오프셋을 결정하기 위하여 시간 변조를 적용한 연구를 Yao 등이 수행하였는데, m 번째 주파수 오프셋을 식 (11)과 같이 제안하였으며 이를 적용한 FDA 레이더의 빔 패턴은 그림 10과 같이 나타난다^[11]. 보통의 주파수 오프셋 기반 FDA 레이더에 비교하여 부엽 수준을 49% 감소시킨 묘사 결과를 보이고 있다.

$$\Delta f_m(t) = \frac{g_1(m) - f_0 m d \sin \theta_0 / c}{t - r_0 / c} \quad (11)$$

여기서 $g_1(m) = \ln(m+1)^\kappa$ 이며 κ 는 주파수 오프셋을 조절하는 매개변수이다.

한편, Basit 등은 주파수 오프셋을 결정하기 위하여 인지(cognitive) 주파수 오프셋 계산 알고리즘을 제안하였으

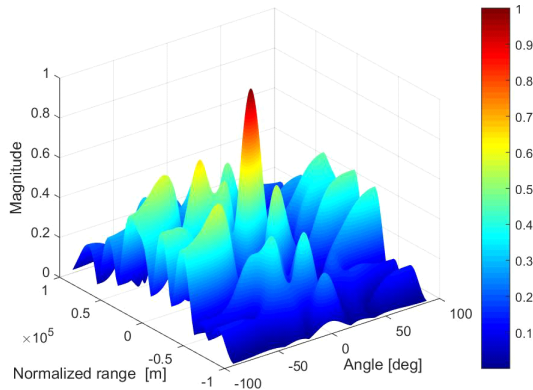


그림 9. CRLB(Cramér-Rao lower bound)에 기초한 최적화 알고리즘 기반 FDA 레이더의 빔 패턴^[10]

Fig. 9. FDA radar beam pattern applying the optimization algorithm to the frequency offset based on CRLB (Cramér- Rao lower bound)^[10].

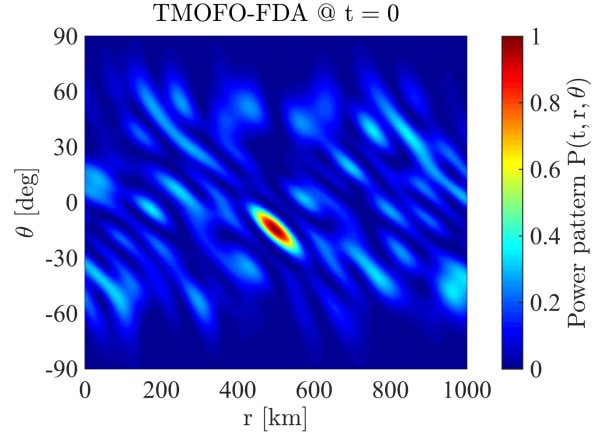


그림 10. 시간 변조를 적용한 FDA 레이더의 빔 패턴^[11]
Fig. 10. FDA radar beam pattern applying the time modulation to frequency offset decision^[11].

며 선 결정된 주파수 오프셋 대신 다음 주파수 오프셋을 계산하기 위하여 인지 알고리즘을 적용하였다^[12]. 그림 11에 이론적으로 묘사한 빔 패턴을 나타내고 있다. 부엽 수준을 감소시킨 훌륭한 묘사 결과를 보이지만 이 역시 *hardware*로 구현 시 복잡도가 증가함을 예상할 수 있다.

로그 함수를 차례대로 적용하는 주파수 오프셋 대신 무작위로 로그 함수를 적용하는 주파수 오프셋을 사용하면 해상도 향상과 부엽 수준의 감소를 기대할 수 있으며 원하는 빔의 위치에 더 많은 에너지를 집중하여 나타낼

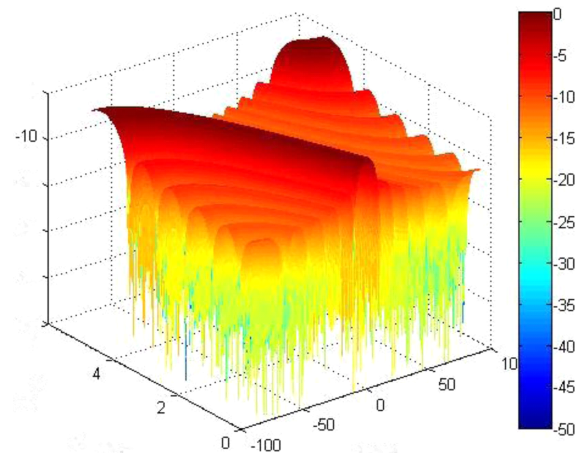


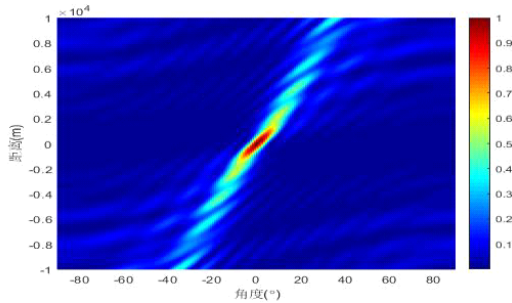
그림 11. 인지 알고리즘 기반 FDA 레이더의 빔 패턴^[12]
Fig. 11. FDA radar beam pattern applying cognitive frequency offset calculation^[12].

수 있다^[13]. 로그 함수의 일반적인 적용과 무작위적인 적용을 비교하여 그림 12에 차례대로 나타내었다. 그림 12에서 보듯이 무작위 로그 함수를 적용하면 빔 패턴의 상대적인 최대값을 더 크게 만들 수 있는 장점을 보인다.

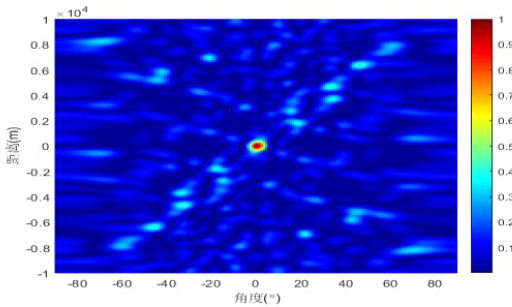
정현파를 주파수 오프셋에 적용하는 경우 빔 집속의 향상 및 해상도 향상에 크게 기여할 수 있음을 Wang 등이 이론적으로 증명하였는데, 식 (12)와 같은 주파수 오프셋을 사용하였다^[14].

$$\Delta f_m = \Delta f \mid \sin m \mid \quad (12)$$

그러나 식 (12)에 기초하여 생성한 주파수 오프셋으로 FDA 레이다를 구현하면 부엽 수준이 아직 매우 큼을 알 수 있다. 이러한 부엽 수준을 낮추기 위하여 Shao 등은 식 (13)과 같은 보다 진화된 정현파 오프셋을 제안하였다.



(a) 보통의 로그함수 기반
(a) Logarithmic function based



(b) 무작위 로그함수 기반
(b) random logarithmic function used

그림 12. 일반적인 로그함수 및 무작위 로그함수를 사용한 주파수 오프셋 기반 FDA 레이다의 빔 패턴^[13]
Fig. 12. FDA radar beam pattern using standard and random logarithmic functions for frequency offset^[13].

$$\Delta f_m = \Delta f \mid (\beta m)^a \sin(\beta m) \mid \quad (13)$$

여기서 α 와 β 는 구성 매개 변수이며 자유롭게 조절이 가능하다^[15]. 그림 13에 보다 진화된 정현파를 주파수 오프셋에 적용한 FDA 레이다의 빔 패턴을 나타내었는데, 부엽 수준의 감소와 해상도 향상의 결과를 볼 수 있다.

Zhu 등은 한편으로는 주파수 오프셋을 결정하기 위하여 무작위 순열 제곱(random permuted power)을 식 (14)와 같이 설계하였다^[16].

$$\Delta f_m = (m-1)^a \delta, a > 1 \quad (14)$$

여기서 a 는 1보다 큰 숫자이며 δ 는 가변 대역폭을 일컫는다. 그림 14에 계산된 주파수 오프셋의 분포와 빔 패턴 모사 결과를 나타내었는데, 빔 패턴의 최대값이 한 곳에서 형성되는 훌륭한 결과를 보이고 있다.

Huang 등은 지수 변조(index modulation)를 사용하여 주파수 오프셋을 설계하였으며, 식 (15)를 적용하였다^[17].

$$\Delta f_m = m \Delta f U_{mn}(t) \quad (15)$$

$$U_{mn}(t) = \begin{cases} 1, & n T_s \leq t \leq (n+1) T_s \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (16)$$

여기서 m 번째 배열 요소의 T_s 시간을 가진 n 번째 symbol slot을 시간 영역에서 on-off 함수 $U_{mn}(t)$ 로 식 (16)에 표시하였다. 그리고 빔 패턴을 모사하여 그림 15에 나타내었다. 식 (16)의 주파수 오프셋을 실제로 구현하기는 상대적으로 용이하며 이를 적용한 빔 패턴의 최대값은 한 곳에서만 나타나므로 FDA 레이다의 내재된 문제점은 크게 해결하였다고 볼 수 있다.

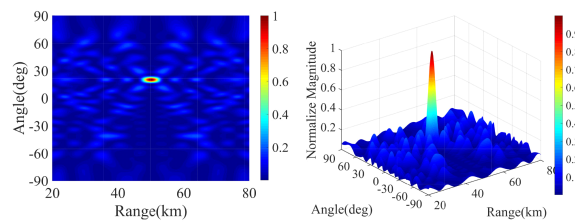
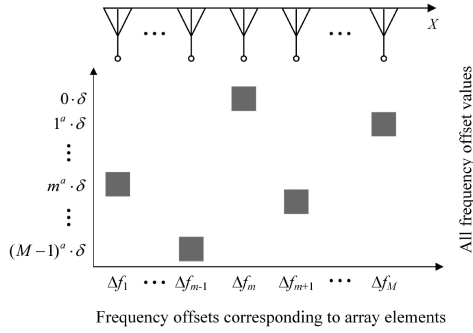
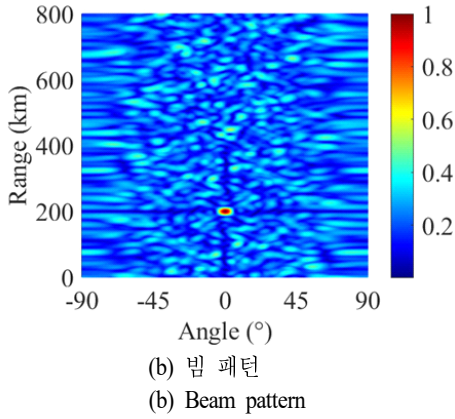


그림 13. 진화된 정현파를 주파수 오프셋에 적용시킨 FDA 레이다의 빔 패턴^[15]

Fig. 13. FDA radar beam pattern applying the modified sinusoidal frequency offset^[15].



(a) 무작위 순열 제곱 주파수 오프셋
(a) Random permuted power frequency offset



(b) 빔 패턴
(b) Beam pattern

그림 14. 무작위 순열 제곱 주파수 오프셋과 이를 이용한 FDA 레이더의 빔 패턴^[16]

Fig. 14. Random permuted power frequency offset and FDA radar beam pattern using it^[16].

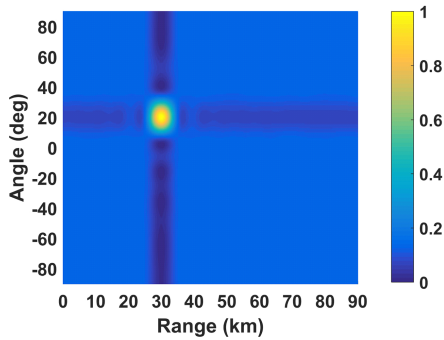


그림 15. 지수 변조를 주파수 오프셋에 적용한 FDA 레이더의 빔 패턴^[17]

Fig. 15. FDA radar beam pattern applying the index modulation to frequency offset^[17].

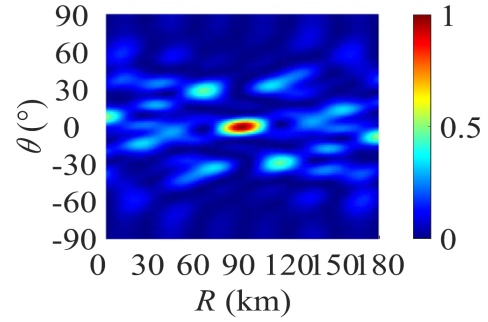


그림 16. Fuzzy entropy에 기반하여 주파수 오프셋을 최적화한 FDA 레이더의 빔 패턴^[18]

Fig. 16. FDA radar beam pattern optimizing the frequency offset based on the fuzzy entropy^[18].

주파수 오프셋을 최적화하는 다양한 방법 중에는 fuzzy entropy를 목적 함수(objective function)로 설정하는 기법이 있는데 Ge 등은 이를 이용하여 주파수 오프셋을 최적화하였으며 그림 16에 이에 기반한 FDA 레이더의 빔 패턴을 나타내었다^[18]. 빔 패턴의 최댓값은 매우 훌륭하게 나타났으나 이를 구현하기 위한 주파수 오프셋의 hardware는 상대적으로 매우 어려움을 예상할 수 있다.

3-2 배열 구조 연구

앞 절에서는 주파수 오프셋을 다양하게 설계하여 FDA 레이더의 성능을 개선하는 연구결과들을 소개하였는데, 이 절에서는 배열의 구조를 변경하여 성능을 개선한 결과를 소개하고자 한다. 배열 구조를 변경하는 것은 hardware 구현의 난이도 상승 없이도 부엽 수준과 null을 제어하는 것이 가능하므로 실제 구현 시 많은 장점을 선사할 것이다.

Liao 등은 weighting function을 배열 인자에 적용하여 빔 패턴 형성시 발생하는 null을 조절하는 FDA 레이더를 제안하였으며 그림 17에 나타낸 것과 같이 이를 통하여 부엽 수준과 null을 효율적으로 제어할 수 있다^[19].

El-khany 등은 배열 구조를 최적화하기 위한 방법으로 서 압축 센싱과 convex 최적화를 적용한 group-sparse 재형성 알고리즘을 도입하였다^[20]. 그림 18에 제안하는 기법을 적용한 빔 패턴을 나타내었는데, 거리와 방위각 두 변수에 기초한 빔을 형성할 수 있음을 볼 수 있다.

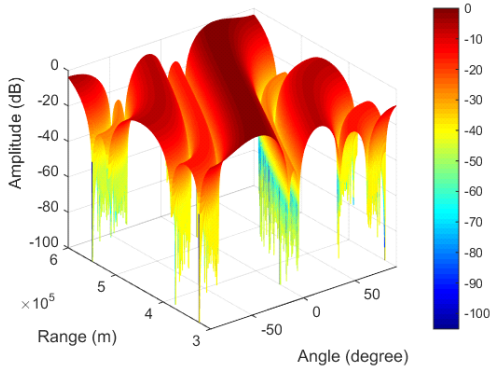


그림 17. Weighting function을 적용한 FDA 레이다의 빔 패턴^[19]

Fig. 17. FDA radar beam pattern applying the weighting function to array factor^[19].

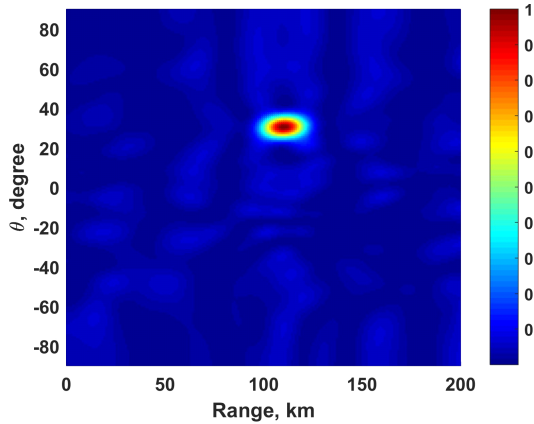
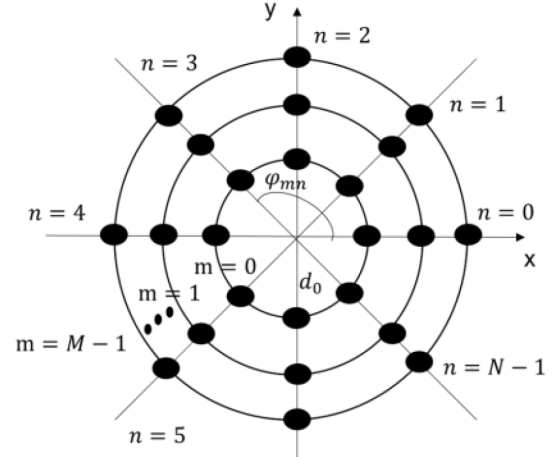


그림 18. 압축 센싱과 convex 최적화를 적용한 배열 구조 기반 FDA 레이다의 빔 패턴^[20]

Fig. 18. FDA radar beam pattern applying compressed sensing and convex optimization to the array configuration^[20].

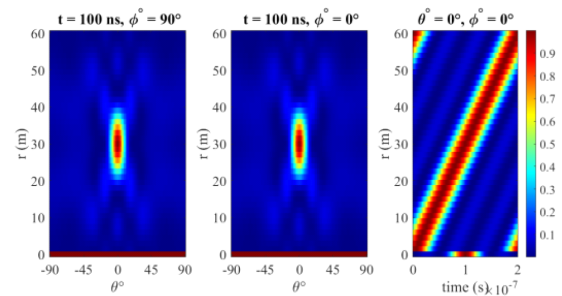
Fazzini 등은 배열 구조를 원형 중심(circular-centric) 형태로 구성하여 FDA 레이다를 이론적으로 모사하였는데, 그림 19에 나타낸 것과 같이 $M=4$, $N=8$ 로 하여 빔 패턴을 획득하였다. 보통의 FDA 레이다와 다르게 그림 19의 가운데에서 S-형태의 빔 패턴이 나타나지 않음을 볼 수 있다. 이러한 개선된 빔 패턴은 제시하는 구조가 매우 진화된 구조임을 알 수 있다^[21].

Liu 등은 Cantor 배열을 FDA 레이다에 적용하였는데, 그림 20에 Cantor 배열의 예를 1단, 2단 및 3단에 걸쳐서



(a) 원형 중심 배열 구조

(a) Circular-centric array configuration



(b) 빔 패턴

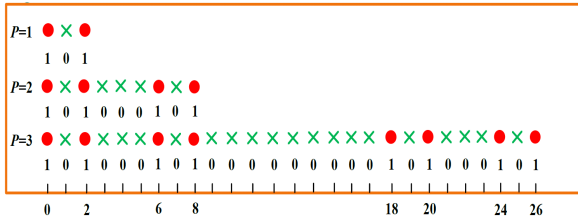
(b) Beam pattern

그림 19. 원형 중심 배열 구조를 적용한 FDA 레이다의 빔 패턴^[21]

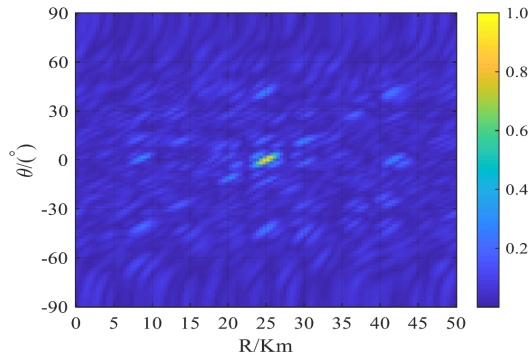
Fig. 19. Beam pattern for the FDA radar applying the circular-centric array configuration^[21].

우선 선보였다^[22]. 이를 다단(multi-stage) 주파수 오프셋으로 적용한 빔 패턴을 함께 나타내어 보면 부엽 수준이 대폭 감소하는 결과를 볼 수 있다.

부엽 수준을 감소시키고 거리-방위각 평면에서 점 형태(dot-shape)의 빔 패턴을 만들기 위한 기법을 Shao 등이 제안하였는데, 다중 주파수 오프셋을 사용하고 convex 최적화를 적용하였다^[23]. 이러한 기법을 적용한 결과 FDA 레이다의 본질적인 단점인 거리-방위각 커플링을 완화하고 결국 SINR을 향상하는 결과를 보인다. 그림 21에 다중 주파수 오프셋의 구조도와 convex 최적화를 적용하여 모사한 빔 패턴 결과를 나타내고 있으며 부엽 수준의 대폭



(a) Cantor 배열
(a) Cantor array



(b) 빔 패턴
(b) Beam pattern

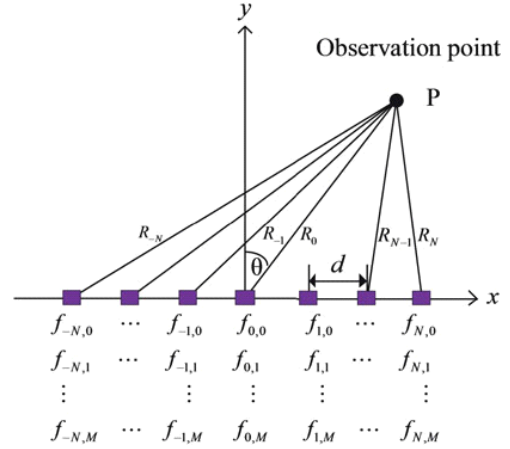
그림 20. Cantor 배열을 적용한 FDA 레이더의 배열 원리와 빔 패턴^[22].

Fig. 20. Cantor array and the beam pattern for the multi-stage FDA radar based on Cantor array^[22].

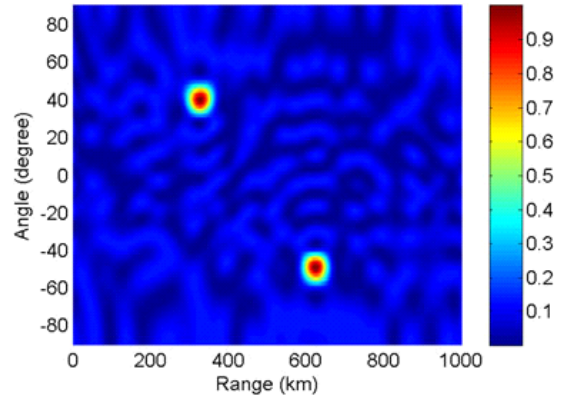
적인 감소와 거리-방위각의 decoupling을 확인할 수 있다.

FDA 레이더의 배열 구조를 설계할 때 coprime 구조가 자주 채택되고 있는데, 이는 degree-of-freedom과 해상도를 향상하는 결과로 이어지기 때문이다. 그러나 on-grid 방법으로만 적용이 되므로 off-grid error가 발생하고 컴퓨터 자원의 상승이 요구된다. Cao 등은 doubly-Toeplitz 기반 평가 알고리즘을 적용하여 coprime FDA의 상호 배열 interpolation과 off-grid 평가를 효과적으로 수행하였다^[24]. 그림 22에 coprime FDA의 예와 doubly-Toeplitz 기반 평가 알고리즘을 적용한 FDA 레이더의 빔 패턴을 나타내었으며 실제 표적의 위치를 정확하게 탐지하여 보여주고 있다. Coprime 배열을 확장한 구조 또한 Zheng 등이 제안하였으며 degree-of-freedom을 향상한 결과를 보인다^[25].

Coprime 배열의 다양한 문제점을 해결하기 위하여 많은 연구가 진행되었는데, 그중에 padded coprime 배열이



(a) 다중 주파수 오프셋
(a) Multi-frequency offset



(b) 빔 패턴
(b) Beam pattern

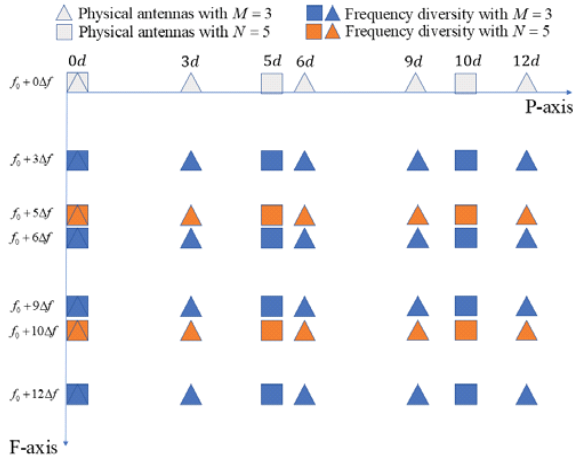
그림 21. 다중 주파수 오프셋 구조와 이와 함께 convex 최적화를 적용한 FDA 레이더의 빔 패턴^[23]

Fig. 21. Multi-frequency offset and the beam pattern for the FDA radar applying convex optimization^[23].

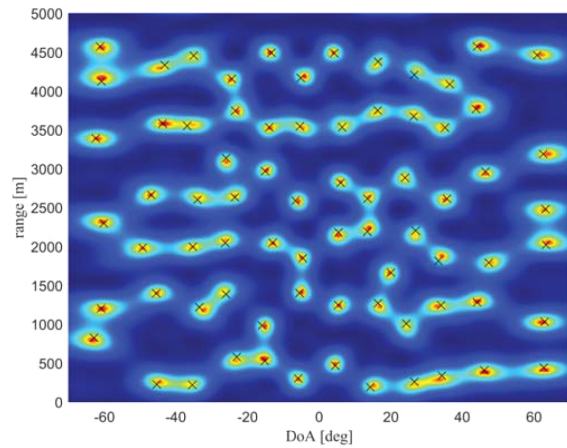
degree-of-freedom을 향상하는 결과를 가져왔다. Ni 등은 padded coprime 배열을 FDA 레이더에 적용하였으며 거리-중속적인 빔 패턴을 보다 향상할 수 있었다^[26]. 그림 23에 Ni 등이 사용한 coprime 배열을 나타내었고, 이를 사용한 FDA 레이더의 빔 패턴을 보인다.

배열 구조를 원형으로 구성한 연구 또한 몇몇 연구자에 의하여 수행되었는데, Çetiner 등은 그림 24와 같은 2차원 원형 배열 구조를 제안하였다^[27].

원형 배열 구조를 사용하여 OAM(orbital angular mo-



(a) Coprime FDA의 예
(a) Example of a coprime FDA



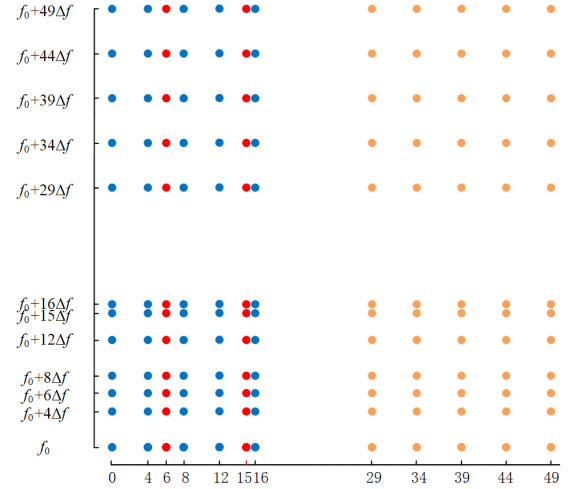
(b) 빔 패턴
(b) Beam pattern

그림 22. Doubly-Toeplitz 기반 평가 알고리즘을 적용한 FDA 레이다^[24]

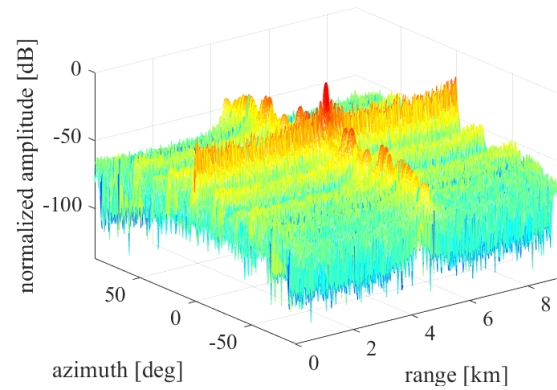
Fig. 22. FDA radar applying the doubly-Toeplitz based estimation algorithm^[24].

mentum) 빔을 구현한 Ma 등의 연구결과는 FDA 레이다의 성능을 개선하였다는 점에서 매우 고무적이다^[28]. 그림 25에 이를 이론적으로 모사한 빔의 세기를 거리별로 나타내었다.

원형 대신 반원 구조를 Xu 등이 제안하였으며 그림 26에 배열 구조와 그에 따른 빔 패턴 모사 결과를 나타내었다. 부엽 수준의 감소와 해상도의 향상을 볼 수 있다^[29].



(a) Padded coprime 배열의 구조
(a) Padded coprime array configuration



(b) 빔 패턴
(b) Beam pattern

그림 23. Padded coprime 배열을 사용한 FDA 레이다^[26]
Fig. 23. FDA radar using the padded coprime array^[26].

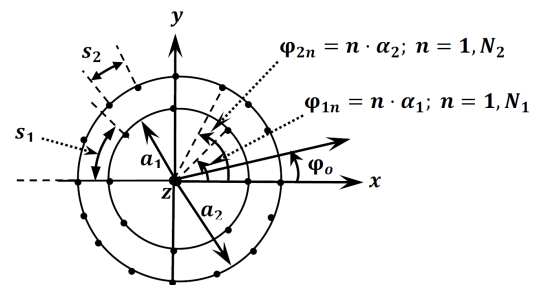
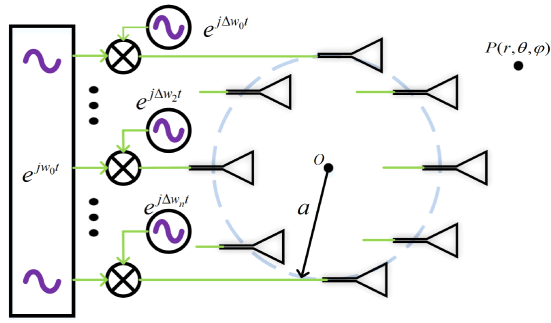
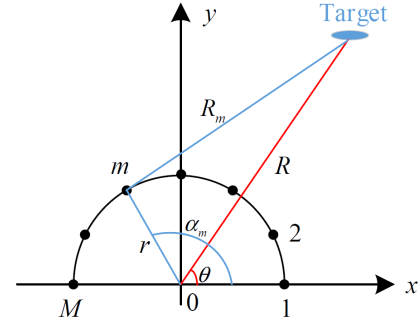


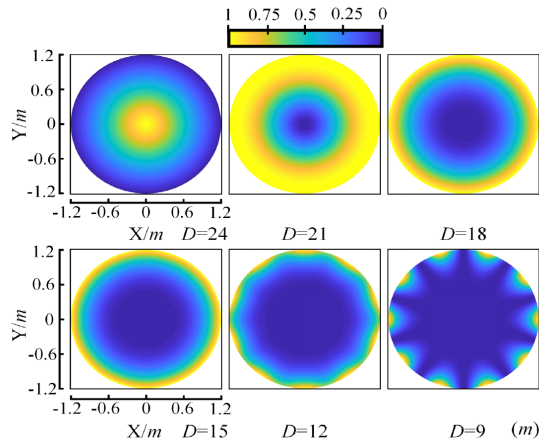
그림 24. FDA 레이다를 위한 원형 배열 구조^[27]
Fig. 24. The circular array configuration for the FDA radar^[27].



(a) 균일 원형 배열 구조
(a) Uniform circular array



(a) 반원 배열 구조
(a) Semi-circular array

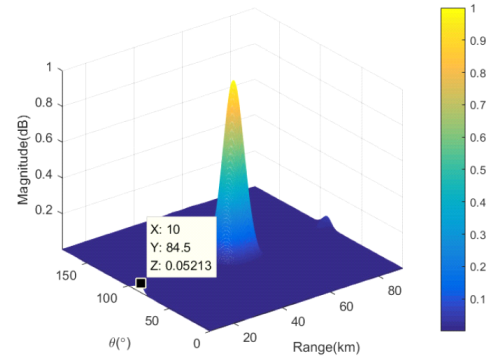


(b) 거리 D에 따른 세기 패턴
(b) Intensity pattern corresponding to different distances

그림 25. 균일 원형 배열을 사용한 FDA 레이더의 OAM 빔^[28]
Fig. 25. The OAM beams of FDA radar using the uniform circular array^[28].

배열 구조는 진화를 거듭한 끝에 최근에는 수직으로 결맞음성(coherent)의 배열 구조를 가진 FDA 레이더를 Li u 등이 제안하였다^[30]. 그림 27에 결맞음성 배열 구조를 보였으며 해당하는 빔 패턴도 볼 수 있다.

이상에서 보였듯이 배열 구조를 변경하여 FDA 레이더의 부엽 수준 완화 및 반복되지 않는 최대 빔 패턴 형성 등의 결과를 보이며, 이는 실제 FDA 레이더를 hardware로 구성 시 별도의 난이도 상승을 초래하지 않는다. 그러므로 이러한 배열 구조에 대한 연구는 hardware 비용의 상승 없이도 레이더의 성능을 향상시키는 매우 매력적인 접근이다.



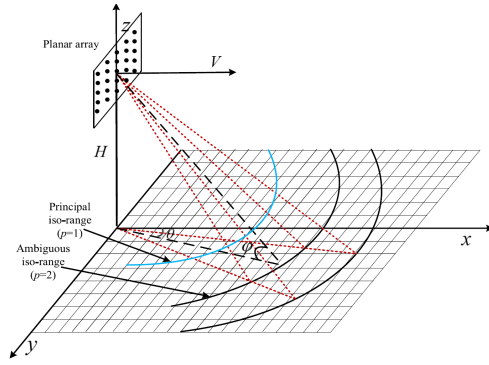
(b) 빔 패턴
(b) Beam pattern

그림 26. 반원 배열 구조를 적용한 FDA 레이더^[29]
Fig. 26. The FDA radar beam pattern using the semi-circular array geometry^[29].

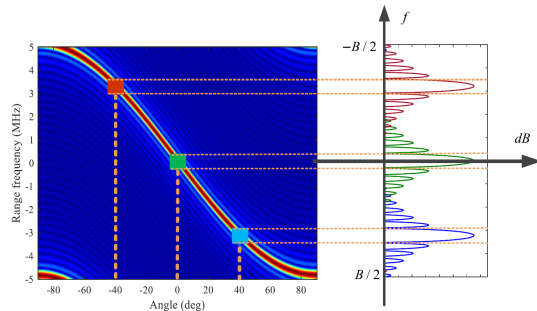
3.3 송수신기 연구

FDA 레이더를 구성하는 송수신기의 구조 또한 성능에 지대한 영향을 미치므로 다양한 연구결과가 축적됐고, FDA 레이더의 원리를 적용하여 다양하게 응용되는 예를 보이고자 한다.

무선 전력 전송 시스템에 FDA 레이더의 원리를 그대로 적용한 FDA를 사용하는 것이 가능한데 Fazzini 등은 wheel-spoke 송신기를 제안하였다^[31]. 그림 28에 송신기의 구조를 나타내었고, 방사형 FDA를 구현하여 무선 전력을 효율적으로 전송하는데 적용하였다. 그림 29에 10.5 m 및 21 m 떨어진 곳에서 빔 패턴을 나타내었는데, 위상 배열 (파란색) 기법과 비교하였다. FDA 기반 무선 전력 전송 시



(a) 수직 결맞음성 배열
(a) Vertical coherent array



(b) 결맞음성 송신 빔 패턴
(b) Coherent transmit beam pattern

그림 27. 결맞음성 FDA 레이더^[30]

Fig. 27. Coherent FDA radar^[30].

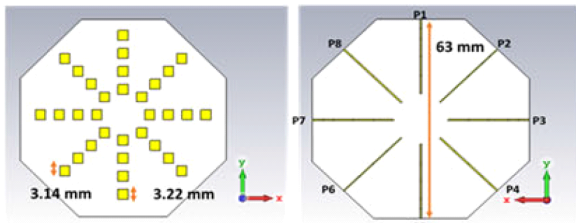


그림 28. 방사형 FDA를 적용한 무선전력전송 시스템용 송신기 배열^[31]

Fig. 28. Transmitter for the wireless power transfer system employing the radial FDA^[31].

스텝의 부엽 수준이 훨씬 작음이 확연히 드러나고 있다.

FDA 레이더를 실제 구현하기 위하여 two-wave를 혼합 (mixing)하여 필요한 주파수 오프셋을 구현한 연구를 Liu 등이 진행하였다^[32]. 그림 30에 주파수 오프셋을 생성하는

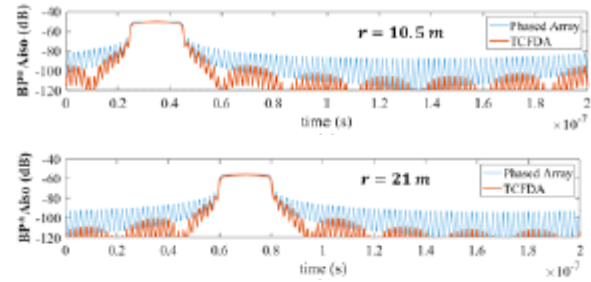
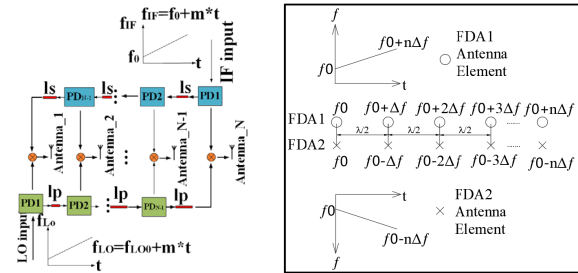
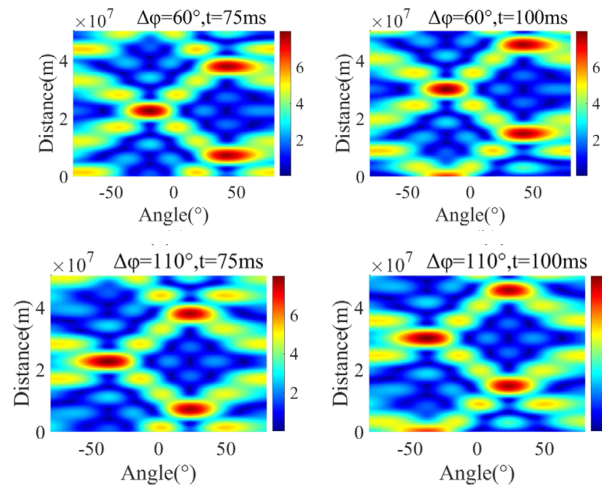


그림 29. 방사형 FDA 기반 무선전력전송 시스템의 10.5 m(위) 및 21 m 떨어진 곳에서 빔 패턴(아래)^[31]

Fig. 29. The beam patterns at 10.5 m (top) and 21 m (bottom) for the wireless power transfer system based on the radial FDA^[31].



(a) Two-wave 혼합 원리
(a) Two-wave mixing principle



(b) 다양한 방위각에 따른 빔 패턴 합성
(b) Synthesized beam patterns for various angles

그림 30. Two-wave 혼합을 이용한 FDA 레이더 구현^[32]
Fig. 30. FDA radar using the two-wave mixing^[32].

원리를 나타내었으며 방위각과 시간에 따른 빔 패턴을 다양하게 보이는데, 최댓값의 반복이라는 FDA 레이더의 기본적인 특성을 잘 나타내고 있다.

FDA 레이더의 수신기 전체에 관한 이론적인 연구는 Han 등이 진행하였는데, 결맞음성 수신기에는 원래 수많은 가중 벡터를 배열 요소의 주파수 대역별로 다 사용하는 구조를 단순화하여 수신 배열 요소에 가중 벡터를 하나만 추가하였다^[33]. 그림 31에 수신기의 구성도 및 그에 따른 빔 패턴을 모사하여 나타내었다. 역시 FDA의 기본적인 빔 패턴을 나타내고 있으며 최댓값의 반복이라는 한계를 보이고 있다.

FDA 레이더의 수신기는 전 대역을 감당하기 위하여 대역별로 수많은 정합 필터(matched filter)가 필요한데, Wang 등은 이를 단순화하여 필터를 제거한 구성도를 제안하였다^[34]. 일반적인 전대역 결맞음성 FDA 레이더의 수신기는 일찍이 Jones 등이 제안하였으며 그림 32에 이를

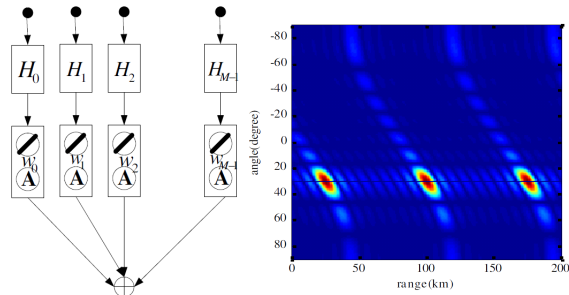


그림 31. 가중 벡터를 수신 배열 요소에 추가한 FDA 레이더 수신기 구성도 및 빔 패턴^[33]
Fig. 31. FDA radar receiver and its beam pattern adding the weighting vector to receive array element^[33].

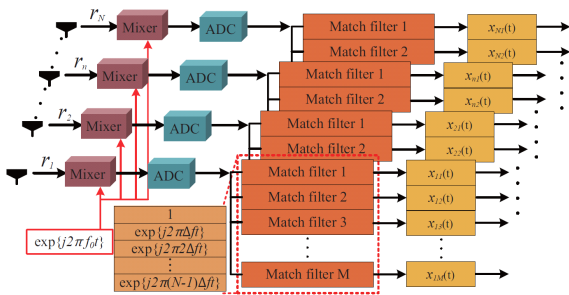


그림 32. 일반적인 결맞음성 전대역 FDA 레이더 수신기^[35]
Fig. 32. A general coherent full-band FDA radar receiver^[35].

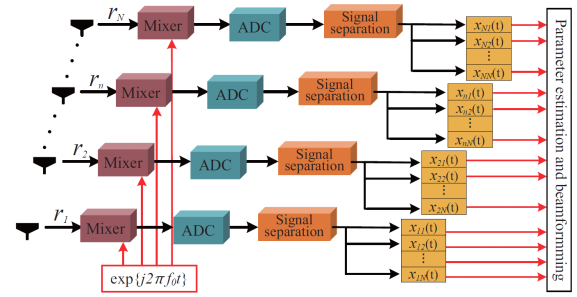


그림 33. 신호 분리를 적용한 FDA 레이더 수신기^[35]
Fig. 33. A FDA radar receiver applying signal separation^[35].

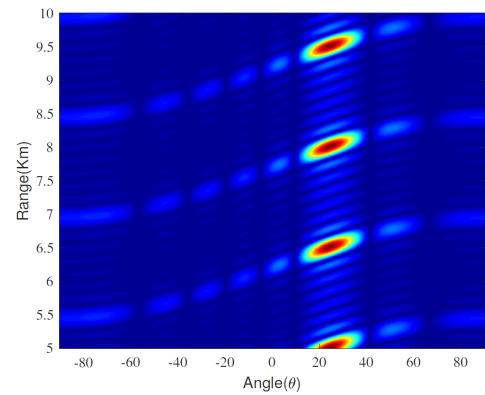


그림 34. 신호 분리를 적용한 FDA 레이더 수신기의 빔 패턴^[35]
Fig. 34. The beam pattern for a FDA radar receiver applying signal separation^[35].

나타내었다^[35]. Wang 등이 제안한 구조는 정합 필터 대신 신호 분리를 적용하여 구조를 단순화하였고 실제 빔 패턴도 성능 저하 없이 합성됨을 볼 수 있으며 그림 33에 구성도를 그림 34에 빔 패턴을 나타내었다.

3-4 응용 연구

레이더의 기본적인 성능 향상을 위한 연구 외에도 FDA를 다양하게 응용한 연구 결과들이 속속 나타나고 있으며 우선 재밍에 응용하기 위한 연구의 예를 Huang 등이 수행하였다^[36]. 위상 배열과 달리 FDA는 여러 주파수를 사용하여 송신 신호를 변조할 수 있으며 거리별로 오프셋을 만들 수 있으므로 그림 35와 같은 재밍 설계가 가능하다. GMTI(ground moving target indication)를 적용하

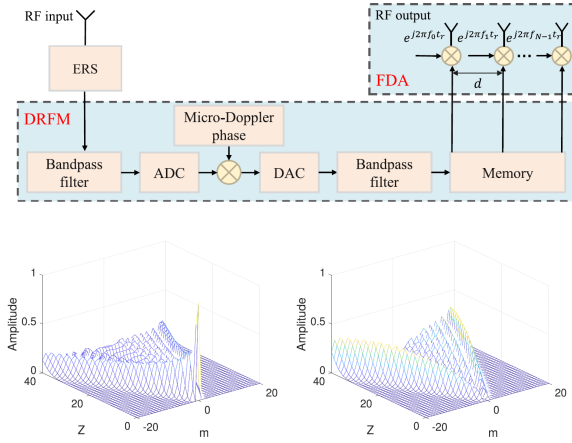


그림 35. GMTI에 대응하기 위한 FDA 기반 재머 구조도와 오표적의 세기^[36]

Fig. 35. A jammer configuration and false target amplitude based on FDA countering GMTI^[36].

기 전에는 그림 35의 아래 왼쪽처럼 0차 표적의 오표적이 나타났으나 적용 후에는 그림 35의 아래 오른쪽과 같이 실제 환경에서는 무의미한 0차 오표적은 사라지고 나머지 오표적의 크기가 증가하여 오표적 생성에 적합한 기능을 하고 있음을 알 수 있다.

FDA를 3-D SAR 영상에 적용한 연구를 Li 등이 수행하였는데, 구성하는 하드웨어와 영상 알고리즘을 단순하게 할 수 있는 장점을 지닌다^[37]. 그림 36과 그림 37에 이의 구성도 및 영상 결과를 나타내었다. 간단한 SAR 알고리

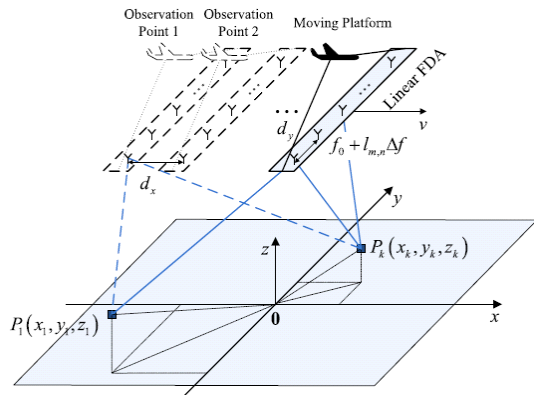


그림 36. 3D FDA-SAR의 구성도^[37].

Fig. 36. Configuration of 3D FDA-SAR^[37].

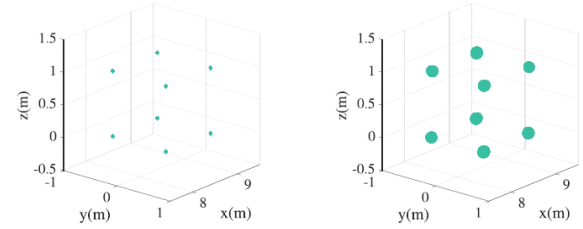


그림 37. 3D-FDA-SAR 모사 결과(왼쪽)와 영상 결과(오른쪽)^[37].

Fig. 37. Simulation (left) and imaging (right) results for 3D-FDA-SAR^[37].

즘을 사용하여도 FDA를 적용한 결과 3D 영상을 획득할 수 있는 장점을 보이고 있다.

Tan 등은 FDA 레이더에 대항하는 재머를 역시 구현하였는데, DRFM(digital RF memory)를 이용하여 재머를 설계하였다^[38]. 그림 38에 그 구성도를, 그림 39에 오표적을 빔 패턴으로 모사하고 있는데 다른 연구에 의한 오표적 재머(EDJ) 대비 본 연구에서 제안한 재머(NDJ)가 실제 표적에 매우 가까이 형성됨을 보인다.

‘Liao 등은 FDA 레이더 영상의 흐릿함을 제거(deblurring)하는 기법을 구현하였다^[39]. 기존의 연구가 비선형 주파수 오프셋을 사용한 흐릿함 제거를 구현하였는데 이는 부엽 수준의 증가를 초래하므로 Liao 등은 부엽 수준의 증가 없이 흐릿함 제거를 가능하게 하였다. 그림 40에 무작위 주파수 오프셋을 사용하여 다양한 알고리즘을 적용한 결과를 나타내었다.

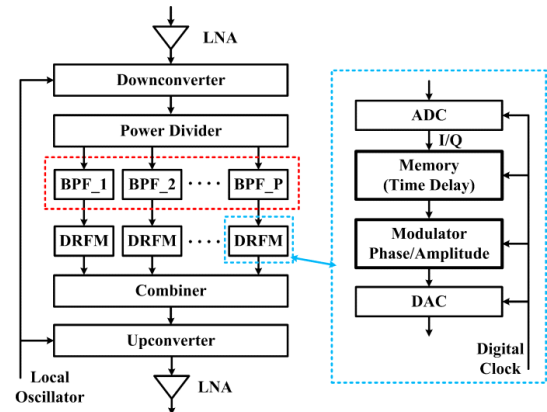


그림 38. FDA 레이더에 대항하는 재머 구성도^[38]

Fig. 38. The jammer against FDA radar^[38].

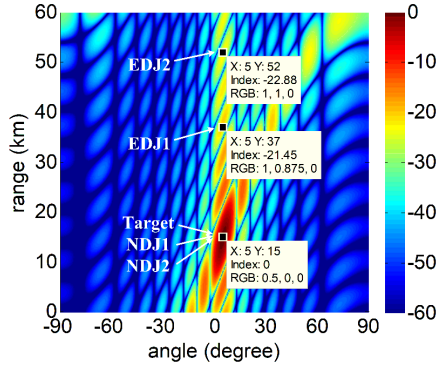


그림 39. FDA 레이더 대항 재머를 이용한 오폭적 빔 패턴^[38]
Fig. 39. False target beam pattern using the jammer against FDA radar^[38].

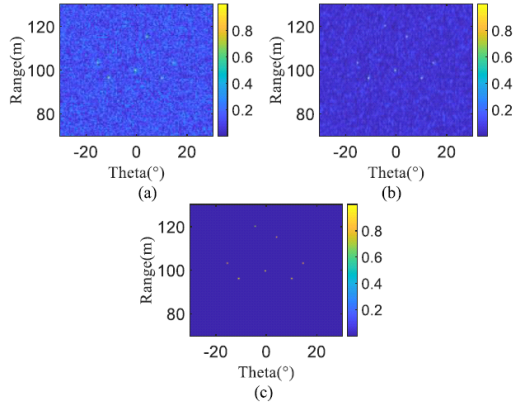


그림 40. 무작위 주파수 오프셋을 사용한 FDA 레이더의 흐릿함 제거^[38]
Fig. 40. Deblurring of FDA radar beam pattern using random frequency offset^[38].

한편 Li 등은 FDA 레이더의 nulling을 최적화하기 위하여 covariance matrix taper 알고리즘을 적용하였는데 그림 41에 보이는 것처럼 간섭 원이 존재하는 곳에 간섭 원보다 넓게 null을 구현하였다^[39].

Chen 등은 elevated FDA를 SAR 영상에 적용하여 고해상도와 넓은 관측 영역(swath)을 달성하였다(그림 42)^[40]. 그림 43에 이를 적용하기 전과 적용한 후의 빔 패턴을 나타내었는데, 빔의 최댓값이 한곳에서 나타나므로 해상도가 증가하고 따라서 관측 영역 또한 증가하여 성능의 개선이 일어난다.

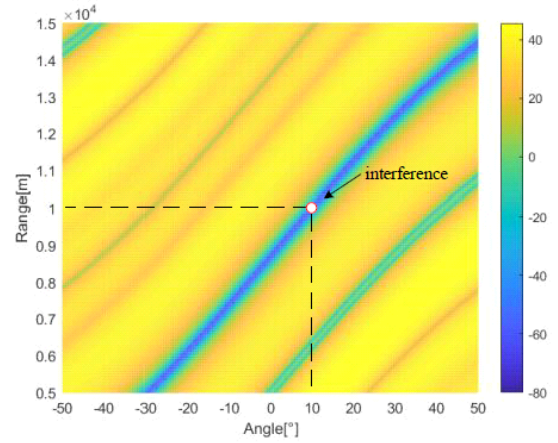


그림 41. FDA 레이더에 null을 최적화하기^[39]
Fig. 41. Null optimization for FDA radar^[39].

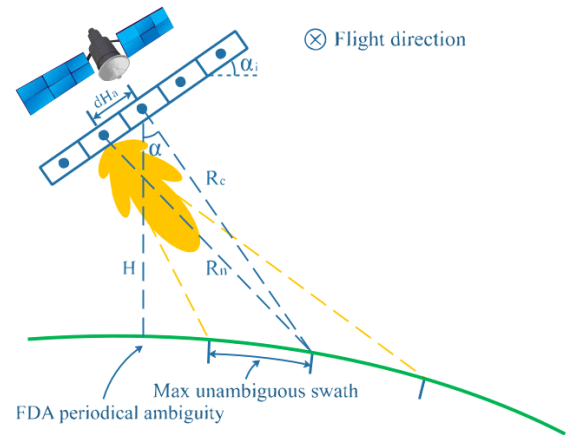


그림 42. Elevated FDA-SAR 구성도^[40]
Fig. 42. Configuration of the elevated FDA-SAR^[40].

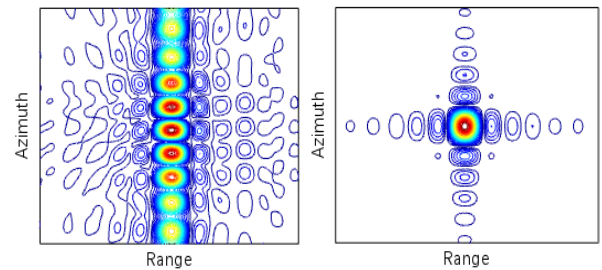


그림 43. Elevated FDA-SAR를 적용 전과 적용 후의 빔 패턴^[40]
Fig. 43. The beam patterns before and after the elevated FDA-SAR applied^[40].

IV. 결 론

FDA 레이더는 위상 배열 레이더의 거리 모호성을 해결하기 위하여 고안된 레이더이며, 위상 배열 레이더와 비교하여 수많은 장점을 보인다. 그러나 한편으로는 빔의 시변성, 상당한 부엽 수준, 최대 빔 형성 시 거리-방위각 커플링 등의 여러 문제점을 노출하고 있다. 이와 같은 단점을 극복하고자 최근까지 수많은 연구자들이 다양한 방법을 적용하여 성능을 지속적으로 개선하고 있다. 최적의 주파수 오프셋 연구, 배열 구조 최적화, 거리-방위각 커플링 감소를 위한 다양한 신호처리 기법 등을 적용하고 있다. 이는 대부분 이론적인 모사 연구에 치우쳐 있고 실제 하드웨어 구현에 기반한 시스템 성능 연구는 초기 단계임은 부인할 수 없다. 본 고를 통하여 앞으로는 하드웨어의 구현을 통한 시스템 성능의 획기적인 개선과 위상 배열 레이더를 능가하는 우수한 설계 결과를 기대하여 본다.

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, pp. 215-217.
- [2] W. Q. Wang, "Frequency diverse array antennas: New opportunities," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 57, no. 2, pp. 145-152, Apr. 2015.
- [3] P. F. Sammartino, C. J. Baker, and H. D. Griffiths, "Frequency diverse MIMO techniques for radar," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 49, no. 1, pp. 201-222, Jan. 2013.
- [4] A. M. Jones, B. D. Rigling, "Planar frequency diverse array receiver architecture," in *IEEE Radar Conference*, Atlanta, GA, May 2012, pp. 145-150.
- [5] Y. G. Chen, T. T. Li, Y. H. Wu, and H. Chen, "Research on the linear frequency diverse array performance," in *International Conference on Signal Processing(ICSP2010)*, Beijing, Oct. 2010, pp. 2324-2327.
- [6] H. Shao, J. Li, H. Chen, and W. Q. Wang, "Adaptive frequency offset selection in frequency diverse array radar," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 13, pp. 1405-1408, Jul. 2014.
- [7] W. Khan, I. M. Qureshi, A. Basit, and W. Khan, "Range-bins-based MIMO frequency diverse array radar with logarithmic frequency offset," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 15, pp. 885-888, 2016.
- [8] Q. Li, L. Huang, B. Zhao, M. Huang, and P. Zhang, "Robust frequency diverse array beamformer via random frequency offset," in *IEEE International Conference on Signal, Information and Data Processing(ICSIDP)*, Chongqing, Dec. 2019, pp. 1-5.
- [9] S. Y. Nusenu, Z. Wang, and W. Q. Wang, "FDA radar using costas sequence modulated frequency increments," in *CIE International Conference on Radar*, Guangzhou, Oct. 2016, pp. 1-4.
- [10] J. Cheng, M. Juhlin, A. Jakobsson, and W. Q. Wang, "Designing optimal frequency offsets for frequency diverse array MIMO radar," *IEEE Access*, vol. 59, no. 6, pp. 8104-8118, Dec. 2023.
- [11] A. M. Yao, W. Wu, and D. G. Fang, "Frequency diverse array antenna using time-modulated optimized frequency offset to obtain time-invariant spatial fine focusing beampattern," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 64, no. 10, pp. 4434-4446, Oct. 2016.
- [12] A. Basit, I. M. Qureshi, W. Khan, and S. U. Khan, "Cognitive frequency offset calculation for frequency diverse array radar," in *International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technology*, Islamabad, Jan. 2015, pp. 641-645.
- [13] J. Gao, X. Zhang, "Frequency diverse array antennas with random logarithmically increasing frequency offset," in *International Conference on Intelligent Control, Measurement and Signal Processing*, Chengdu, May 2023, pp. 143-146.
- [14] B. Wang, J. W. Xie, J. Zhang, and J. A. Ge, "Dot-shaped beamforming analysis of subarray-based SIN-FDA," *Frontiers of Information Technology & Electronic*

- Engineering*, vol. 20, no. 10, pp. 1429-1444, Nov. 2019.
- [15] X. Shao, T. Hu, Z. Xiao, and J. Zhang, "Frequency diverse array beam pattern synthesis with modified sinusoidal frequency offset," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 20, no. 9, pp. 1784-1787, Sep. 2021.
- [16] Z. Zhu, W. Chen, Y. Yang, and Q. Shu, "Frequency diverse array beam pattern synthesis with random permuted power increasing frequency offset," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 21, no. 10, pp. 1975-1979, Oct. 2022.
- [17] G. Huang, S. Ouyang, Y. Ding, and V. Fusco, "Index modulation for frequency diverse array," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 19, no. 1, pp. 49-53, Jan. 2020.
- [18] J. Ge, J. Xie, B. Wang, and C. Chen, "Fuzzy entropy for frequency diverse array beam pattern synthesis," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 70, no. 11, pp. 11172-11176, Nov. 2022.
- [19] Y. Liao, H. Tang, X. Chen, W. Q. Wang, M. Xing, and Z. Zheng, et al., "Antenna beam pattern with range null control using weighted frequency diverse array," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 50107-50117, 2020.
- [20] S. E. El-khamy, N. O. Korany, and M. A. Abdelhay, "A group-sparse compressed sensing approach for thinning multi-carrier frequency diverse arrays," in *URSI International Symposium on Electromagnetic Theory*, Diego, CA, May 2019, pp. 1-4.
- [21] E. Fazzini, A. B. Gok, A. Costanzo, and D. Masotti, "Accurate ranging exploiting a 32-patch frequency diverse array with circular symmetry," in *European Conference on Antennas and Propagation*, Madrid, Mar.-Apr. 2022, pp. 1-5.
- [22] M. Liu, C. Wang, J. Gong, M. Tan, L. Bao, and C. Zhou, "Analysis of cantor multistage frequency offset FDA-MIMO beam pattern performance," *IEEE Sensors Journal*, vol. 23, no. 19, pp. 23270-23281, Oct. 2023.
- [23] H. Shao, J. Dai, J. Xiong, H. Chen, and W. Q. Wang, "Dot-shaped range-angle beam pattern synthesis for frequency diverse array," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 15, pp. 1703-1706, 2016.
- [24] R. Cao, S. Liu, Z. Mao, and Y. Huang, "Doubly-toeplitz-based interpolation for joint DoA-range estimation using coprime FDA," in *IEEE Radar Conference*, Atlanta, GA, May 2021.
- [25] W. Zheng, X. Zhang, Y. Wang, M. Zhou, and Q. Wu, "Extended coprime array configuration generating large-scale antenna co-array in massive MIMO system," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 68, no. 8, pp. 7841-7853, Aug. 2019.
- [26] T. Ni, S. Liu, Z. Mao, and Y. Huang, "Enhanced range-dependent beam pattern using frequency diverse padded coprime array," in *CIE International Conference on Radar*, Haikou, Dec. 2021, pp. 1781-1785.
- [27] R. Çetiner, A. Hizal, and R. F. Tiğrek, "Narrow band wide angle scanning circular frequency diverse array radar," in *European Radar Conference*, Nuremberg, Oct. 2017, pp. 231-234.
- [28] J. Ma, J. Cai, Z. Zheng, X. Gao, and S. Huang, "Spatiotemporal evolution of orbital angular momentum(OAM) beams based on a uniform circular frequency diverse array(UC-FDA)," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 71, no. 5, pp. 4183-4193, May 2023.
- [29] Y. Xu, A. Wang, and J. Xu, "Range-angle Transceiver beamforming based on semicircular-FDA scheme," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 58, no. 2, pp. 834-843, Apr. 2022.
- [30] Z. Liu, S. Zhu, J. Xu, X. He, K. Duan, and L. Lan, "Range-ambiguous clutter suppression for STAP-based radar with vertical coherent frequency diverse array," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 61, Jul. 2023.
- [31] E. Fazzini, A. Costanzo, and D. Masotti, "A new wheel-spoke transmitter for efficient WPT based on frequency diversity," in *European Microwave Conference*,

- Milan, Sep. 2022, pp. 576-579.
- [32] Y. Liu, R. Zhu, and Q. Liu, "A novel low-cost frequency diverse array with mirrored two-wave mixing," *IEEE Microwave and Wireless Technology Letters*, vol. 33, no. 3, pp. 359-362, Mar. 2023.
- [33] S. Han, C. Fan, and X. Huang, "A novel receiver architecture for frequency diverse array radar," in *Progress in Electromagnetic Research Symposium(PIERS)*, Shanghai, Aug. 2016, pp. 2270-2274.
- [34] C. Wang, X. Zhu, "A novel receiver design based on FrFT for frequency diversity array radar," in *International Conference on Signal and Image Processing (ICSIP)*, Nanjing, Oct. 2021, pp. 611-614.
- [35] A. M. Jones, B. D. Rigling, "Frequency diverse array radar receiver architectures," in *International Waveform Diversity and Design Conference(WDD)*, Kauai, HI, Jan. 2012, pp. 211-217.
- [36] L. Huang, Z. Zong, S. Zhang, and W. Q. Wang, "2-D moving target deception against multichannel SAR-GMTI using frequency diverse array," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 19, p. 4006705, Dec. 2020.
- [37] J. Li, K. Liao, and S. Ouyang, "3-D imaging using synthetic aperture radar with a frequency diverse array," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 18, no. 5, pp. 846-850, May 2021.
- [38] M. Tan, C. Wang, B. Xue, and J. Xu, "A novel deceptive jamming approach against frequency diverse array radar," *IEEE Sensors Journal*, vol. 21, no. 6, pp. 8323-8332, Mar. 2021.
- [39] K. Liao, J. Shen, S. Ouyang, and Q. Yu, "A target deblurring method for frequency diverse array imaging," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 21, no. 5, pp. 1002-1006, May 2022.
- [39] S. Li, Z. Zong, L. Huang, and Yun Feng, "Adaptive null optimization method based on frequency diverse array," in *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Brussels, Jul. 2021, pp. 5012-5015.
- [40] Z. Chen, Z. Zhang, Y. Zhou, Q. Zhao, and W. Wang, "Elevated frequency diversity array: A novel approach to high resolution and wide swath imaging for synthetic aperture radar," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 19, p. 4001505, Feb. 2022.

조 춘 식 [한국항공대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0003-0833-5254>



1987년 2월: 서울대학교 제어계측공학과 (공학사)

1998년 12월: 미국 Colorado 대학교 전기 및 컴퓨터공학과 (공학박사)

1987년~1993년: LG 정보통신

1999년~2003년: 팬택앤큐리텔

2004년 3월~현재: 한국항공대학교 전기

전자공학과 교수

[주 관심분야] RFIC 및 Millimeter-Wave IC 설계, 전파의료기기, 레이더 시스템