

주파수 다양성 배열 기술을 이용한 근거리 3차원 빔 집중 기술

Frequency Diverse Array Technique for Short-Range 3D Beam Focusing Technology

최 우 혁 · 김 상 길

Woo-Hyeok Choi · Sangkil Kim

요 약

주파수 다양성 배열 (FDA) 기술은 고유의 각도와 거리에 따라 달라지는 독특한 방사 특성을 가지고 있어서 많은 주목을 받고 있다. FDA 기술은 빔 스캐닝, 빔 집중과 같이 현재까지 널리 사용되는 위상 안테나 배열 구조로는 얻기 힘든 특성을 가지고 있으며, 본 논문은 거리와 주파수 증가분 간의 관계에 대한 연구를 진행했다. 또한, FDA의 가장 기본이 되는 작동 방식에 대해 철저히 분석을 진행했으며, 본 논문에서 제시한 FDA 방식을 바탕으로 근거리 빔 집중을 위한 지수 FDA 방식을 제시한다.

Abstract

The frequency diverse array (FDA) is a promising technology owing to its angle-range-dependent beam pattern. The FDA possesses unique properties such as beam scanning and focusing, which are difficult to achieve using the conventional phased antenna array theory. Herein, the relationship between range and frequency increment was analyzed, and the fundamental operation principle of FDA was investigated. Further, a novel exponential FDA method for short-range beam focusing was presented based on the proposed FDA analysis method. The proposed method was investigated through various case studies and applied to research efforts on FDA methods.

Key words: Exponentially Increasing Frequency Increment, Frequency Diverse Array (FDA), Periodicity, Quasi-Pulse Wave, Short-Range Beam Focusing

I. 서 론

주파수 다양성 배열(frequency diverse array, FDA) 기술은 auto-scanning^[1], dot-shaped^{[2]~[4]} 등의 전통적인 배열 안테나에서 볼 수 없는 새로운 특성들을 가지고 있다. 시간에 따라 빔패턴이 변하지 않는 FDA 기술은 여러 논문을

통해 발표되었으며^{[5]~[7]}. FDA를 설계할 때 가장 중요한 것은 시간(t), 주파수 증가분(Δf_m), 위상(φ), 그리고 파동 전파특성($r=ct \cdot c$)이다. FDA 방식을 이용해 원하는 빔 패턴을 얻기 위해서는 이들 변수간의 관계를 엄밀하게 분석해야 한다. 몇몇 논문들은 FDA를 분석하거나 설계하기 위해 시간 지연과 빔 패턴의 주기성을 적용하였다^{[2],[8]~}

「이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NO. 2020R1C1C1003362).」

부산대학교 전자공학과(Department of Electronic Engineering, Pusan University)

· Manuscript received November 15, 2021 ; Revised December 27, 2021 ; Accepted March 23, 2022. (ID No. 20211115-010S)

· Corresponding Author: Sangkil Kim (e-mail: ksangkil3@pusan.ac.kr)

[10]. 선형적인 FDA(linear FDA)는 빔 집중 특성을 가지는 다른 FDA 방식들과는 다르게 auto-scanning 특성을 가진다. 비선형적인(non-linear)^{[11],[12]} 혹은 임의(random)로^{[13],[14]} 변하는 주파수 성분을 이용하는 FDA 방식은 원하는 위치에 빔을 집중하는 특징을 가진다.

전통적인 FDA 방식은 주로 장거리에 레이더 기술에 적용하였는데, 근래에는 짧은 펄스를 이용하여 비교적 근거리인 수 미터 이내의 거리에 전파 에너지를 집중할 수 있는 FDA 방식이 제시되었다^{[6],[15]}. FDA에서 시간과 거리의 역할과 두 변수의 관계를 명확하게 정리하기 위해서 2D 원형 안테나 배열이 제시되었다^[2]. 이 연구는 집중된 빔이 거리에 따라 주기적으로 나타난다는 점을 증명했다. 하지만, 비주기적으로 전자기 에너지를 집중시킬 수 있는 FDA 방식은 아직 제시된 바 없다.

본 논문은 FDA에서 시간과 거리의 역할을 분명히 하고, 근거리에 빔을 집중하기 위해 연속파를 이용한 FDA 방식을 제시했다. 시간 지연과 전파의 속도를 이용하여 배열 안테나를 이루는 각각의 안테나가 방사하는 전파의 초기 위상값이 전체적인 FDA 성능에 끼치는 영향을 분석했다. 또한, 시간(t), 주파수 증분(Δf_m), 거리(R)의 관계가 FDA에 끼치는 영향에 대해 엄밀한 분석을 진행했다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 섹션 II에서는 FDA의 동작 원리와 잘 알려진 FDA 방식들에 대해서 간단히 설명한다. 섹션 III에서는 FDA의 중요한 요소인 시간 변수가 가지는 의미를 분석하고, 다른 FDA 방식에서 어떻게 적용될 수 있는지를 살펴본다. 섹션 IV에서는 지수 FDA에 대해 제시하며, 섹션 V에서는 제안하는 지수 FDA에 대한 분석과 적용 사례에 대해 알아본다.

II. FDA 동작 원리 및 종류

2-1 FDA 동작 원리

M 개의 안테나가 d 의 거리를 가지고 있는 균일한 선형 배열은 그림 1과 같으며, m -번째 안테나에 급전되는 신호의 주파수(f_m)는 식 (1)과 같이 정의할 수 있다.

$$f_m = f_0 + \Delta f_m, \quad m=0, 1, \dots, (M-1) \quad (1)$$

이 때, f_0 는 동작 주파수이고, Δf_m 은 주파수 증분이다.

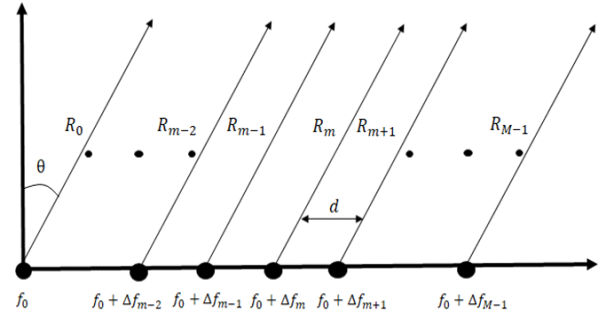


그림 1. 균일 선형 배열 FDA의 구성

Fig. 1. Configuration of uniform linear array (ULA) FDA.

자유 공간에서 관측 지점은 (R, θ) 로 표시될 수 있으며, (R : 거리, θ : 각도), 시간이 t 초일 때 배열 안테나에서 방사된 고주파 신호의 합에 있어서 S 는 임의의 관측 지점에서 식 (2)와 같이 정의될 수 있다

$$S(t, R, \theta) = \sum_{m=0}^{M-1} s_m(t - R_m/c) = \sum_{m=0}^{M-1} e^{j(2\pi \int_0^{t-R_m/c} f_m(t) dt + \phi_m)} \quad (2)$$

여기서 ϕ_m 은 m -번째 안테나의 초기 위상값(phase offset)이고, c 는 빛의 속도, s_m 은 m -번째 안테나가 송출한 신호, 그리고 R_m 은 m -번째 안테나와 관측 지점 간의 거리이다 ($R_m = R - md \sin \theta$). 식 (2)에서 신호의 위상은 주파수(frequency)와 위상(phase)의 정의에 의해서 위상은 적분 형태로 표현되었다^[8]. 만약 f_m 이 시간에 대한 함수가 아니라면 신호는 식 (3)과 같이 정리된다.

$$S(t, R, \theta) = \sum_{m=0}^{M-1} e^{j[2\pi f_m(t - (R - md \sin \theta)/c) + \phi_m]} = e^{j2\pi f_0(t - R/c)} \sum_{m=0}^{M-1} e^{j[2\pi \Delta f_m(t - (R - md \sin \theta)/c) + 2\pi f_0 md \sin \theta + \phi_m]} \quad (3)$$

$f_0 \gg \Delta f_m$ 일 때, 배열 계수(array factor, AF)는 식 (3)으로부터 얻을 수 있으며, 이는 식 (4)와 같이 정리될 수 있다.

$$\begin{aligned} AF(t, R, \theta) &= \sum_{m=0}^{M-1} e^{j[2\pi \Delta f_m(t - R/c) + (2\pi f_0 md \sin \theta + 2\pi m \Delta f_m d \sin \theta)/c + \phi_m]} \\ &\approx \sum_{m=0}^{M-1} e^{j[2\pi \Delta f_m(t - R/c) + (2\pi f_0 md \sin \theta)/c + \phi_m]} \\ &= \sum_{m=0}^{M-1} e^{j[\phi_m^{RTF} + \phi_m^{AF} + \phi_m]} = \sum_{m=0}^{M-1} e^{j\phi_m^{AF}} \end{aligned} \quad (4)$$

배열 안테나 이론에 따라서 d 는 grating lobe를 줄이기 위해서 식 (5)와 같은 조건을 만족하도록 정하였다.

$$d \leq \lambda_{\max}/2 \quad (5)$$

여기서 λ_{\max} 는 가장 낮은 주파수의 파장을 뜻한다. 식 (4)는 가장 기본적인 FDA의 배열 인자이며, 거리-시간-주파수에 관계된 위상 (ϕ_m^{RTF})과 각도-안테나에 연관된 위상 (ϕ_m^{AE})을 포함한다. ϕ_m^{RTF} 은 식 (6)과 같이 표현되며,

$$\phi_m^{RTF} = 2\pi\Delta f_m(t - R/c) \quad (6)$$

ϕ_m^{AE} 는 식 (7)과 같이 정의된다.

$$\phi_m^{AE} = 2\pi m f_0 m d \sin\theta / c \quad (7)$$

다른 FDA 방식들은 식 (4)~식 (7)을 이용하여 쉽게 설명할 수 있다^[10].

2.2 선형 주파수 증가분

가장 기본적인 FDA 방식은 선형적으로 증가하는 주파수 증가분을 사용하는 것이며, 이는 식 (8)과 같이 표현된다.

$$\Delta f_m = m \Delta f \quad (8)$$

이때, $\phi_m = 0$ 이라면 식 (4)에서 제시한 AF는 식 (9)와 같이 정리된다.

$$AF(t, R, \theta) = \sum_{m=0}^{M-1} e^{j2\pi m [\Delta f(t - R/c) + 2\pi f_0 d \sin\theta / c]} \quad (9)$$

2.3 로그 주파수 증가분

로그 FDA는 특정 지점에 전자기 에너지를 집중하기 위해 제시되었다. 로그 FDA의 주파수 증가분은 식 (10)과 같이 정의된다.

$$\Delta f_m = \log(m+1)\delta \quad (10)$$

δ 는 빔 패턴을 최적화하기 위한 인자로써 원하는 FDA의 방사 패턴에 따라 자유롭게 선택할 수 있다. 로그 FDA의 AF는 식 (11)과 같이 정리된다.

$$AF(t, R, \theta) = \sum_{m=0}^{M-1} e^{j[2\pi \log(m+1)\delta(t - R/c) + (2\pi f_0 m d \sin\theta) / c + \phi_m]} \quad (11)$$

식 (11)에 따르면 $\phi_m = 0$ 일 때, 로그 FDA를 이용하여 한곳에 전자기 에너지를 집중시키는 방사 패턴을 형성하는 것은 매우 어렵다. 특정 지점에 빔이 집중된 방사 패턴을 형성하기 위해서 ϕ_m 을 식 (12)와 같이 정의한다.

$$\phi_m = 2\pi \log(m+1)\delta R_0 / c - 2\pi f_0 m d \sin\theta_0 / c \quad (12)$$

식 (12)를 적용한 로그 FDA의 AF는 식 (13)과 같이 표현된다.

$$AF(t, R, \theta) = \sum_{m=0}^{M-1} e^{j2\pi \log(m+1)(t - (R - R_0)/c + 2\pi f_0 m d (\sin\theta - \sin\theta_0)/c)} \quad (13)$$

식 (13)에서 표현된 AF는 m 에 비례하지 않는 ϕ_m^{RTF} 과 ϕ_m^{AE} 를 가지고 있기 때문에 (R_0, θ_0) 에서 하나의 집중된 빔을 얻을 수 있다.

III. 주파수 증가분과 배열 인자

FDA에서 시간과 거리의 관계는 보고된 바 있다^[8]. 하지만, FDA가 가지는 AF에 중요한 변수인 주파수 증가분 (Δf_m)과 시간(t)과의 관계는 명확하게 다루이지 않았다.

식 (4)에서 볼 수 있듯이, 주파수 증가분은 AF에서 거리, 시간, 위상과 곱해지는 관계에 있다. 만약 $t=0$, $d=\lambda_{\max}/2$, 그리고 $\phi_m=0$ 라는 조건을 만족한다면, 식 (4)의 ϕ_m^{AF} 는 식 (14)와 같이 정리된다.

$$\phi_m^{AF} = 2\pi[-\Delta f_m R/c + m \sin\theta/2] \quad (14)$$

식 (14)는 거리-주파수 위상 (ϕ_m^{RF})과 각도-안테나 (ϕ_m^{AE}) 위상으로 나눌 수 있다. 이들은 식 (15) 및 식 (16)과 같이 정의된다.

$$\phi_m^{RF} = -2\pi\Delta f_m R/c \quad (15)$$

$$\phi_m^{AE} = -m\pi \sin\theta \quad (16)$$

$|\sin\theta| \leq 1$ 이기 때문에, ϕ_m^{AE} 의 최댓값은 $m\pi$ 보다 작거나 같다. 지수 함수의 특성상 $\sin\theta \neq 0$ 이라면, 0이 아닌 ϕ_m^{RF} 없이는 다양한 빔 집중 특성을 가지도록 조절할 수 없다. 따라서 FDA의 중요 변수인 시간(t), 주파수 증가분 (Δf_m), 거리(R)는 매우 긴밀하게 연관되어 있다.

선형적으로 변하는 FDA와 비선형적으로 변하는 FDA 방법 사이의 가장 큰 차이는 특정한 거리 내에서 빔이 집중되는 횟수이다. 앞서 살펴보았듯이, 빔이 집중되는 횟수와 그 주기는 R 과 Δf_m 과 매우 큰 상관관계를 가진다. 선

형적으로 증가하는 FDA의 AF는 $1/\Delta f$ 의 함수라고 알려져 있고, 특정한 지점에 전자기 에너지를 집중할 수 없다^[10]. 비선형적으로 Δf_m 이 변하는 FDA 방식은 하나의 지점에 빔을 집중할 수 있기 때문에 많이 연구되고 있다.

본 논문에서는 Δf_m 이 비선형적으로 변화하는 FDA 방법을 정량적으로 분석하기 위해서 Δf_m 의 최대공약수(GCD)를 이용한 새로운 분석 방법을 제안한다. 만약 Δf_m 에 GCD가 존재한다면, 모든 비선형적인 FDA의 경우에서 Δf_m 은 GCD와 자연수의 곱으로 이루어진다. 이 경우, 비선형적인 FDA의 주기는 식 (17)과 같이 정의된다.

$$T_{non-lin} = 1/n_{non-lin} \quad (17)$$

이 때, 가장 작은 주파수 증가분은 $GCD \cdot n_{non-lin}$ 이다. 식 (17)은 비선형적인 FDA가 하나의 지점에 빔을 집중할 수 있는 이론적 근거를 마련해 주고 있다. Δf_m 이 무한소수라면, GCD는 존재할 수 없고, 이에 따라 주기적으로 전자기 에너지가 집중된 AF를 가질 수 없다. 만약, Δf_m 이 무한소수가 아니라면 특정 정수를 곱해줌으로써 정수화된 주기를 구할 수 있다.

ϕ_m 은 ϕ_m^{AE} 과 ϕ_m^{RTF} 중 어느 부분에 영향을 끼치느냐에 따라 2가지로 나눌 수 있다. ϕ_m^{AE} 은 빔이 집중되는 각도(θ)를 결정하는 데 기여하며, ϕ_m^{RTF} 은 거리(R)를 결정하는 데 기여한다. 여기서, ϕ_m^{RTF} 과 R 과의 관계를 고려할 때에는 전파의 속도가 유한하기 때문에 시간의 경과를 염두에 두고 해석해야 한다. 수식 $\phi_m = 2\pi\Delta f_m R_0/c$ 에서, 안테나 배열에서 방사된 전파가 거리 R 만큼 떨어진 위치 도달하는데 걸리는 시간은 식 (18)과 같이 표현된다.

$$t = T + (R - R_0)/c \quad (18)$$

식 (18)을 보면 로그 FDA와 같이 무한소수로 표현되는 Δf_m 을 사용하는 FDA 방식은 T 가 무리수이기 때문에 정확한 시간 표현을 만들기 어렵다는 것을 알 수 있다.

시간과 ϕ_m 의 관계는 식 (19)를 바탕으로 이해할 수 있다.

$$\phi_m = -(2\pi \log(m+1)\delta R_0/c + 2\pi f_0 m d \sin\theta_0/c) \quad (19)$$

이 경우 (R, θ_0)에 빔이 집중되는 log-FDA의 시간은 식 (20)과 같다.

$$t = (R + R_0)/c \quad (20)$$

식 (20)은 주기(T)가 존재하지 않으며, FDA에서 ϕ_m 은 특정 지점에 빔이 집중되는 시간과 각도를 결정짓는 변수라는 것을 알 수 있다.

IV. 지수 FDA 방식

4-1 m^α 를 이용한 지수 FDA 방식

비선형적인 함수를 만드는 가장 쉬운 방법 중 하나는 지수 함수를 이용하는 것이다. 지수 함수를 이용한 Δf_m 은 식 (21)과 같이 정의된다.

$$\Delta f_m = m^\alpha \Delta f \quad (21)$$

여기서 α 는 AF를 조절하는 임의의 변수이다. 이를 이용한 AF는 식 (22)와 같이 정리된다.

$$AF(t, R, \theta) = \sum_{m=0}^{M-1} u(t - R/c) e^{j2\pi m [m^{(\alpha-1)} \Delta f (t - R/c) + 2\pi f_0 d \sin\theta] / c + \phi_m} \quad (22)$$

여기서 $u(t)$ 는 식 (23)과 같이 정의된 스텝 함수를 의미한다.

$$u(t) = \begin{cases} 1, & t \geq 0 \\ 0, & t < 0 \end{cases} \quad (23)$$

지수 함수에 사용되는 ϕ_m 은 식 (24)와 식 (25)로 표현될 수 있다.

$$\phi_m = 2\pi m^\alpha \Delta f R_0/c - 2\pi f_0 m d \sin\theta_0/c \quad (24)$$

$$\phi_m = -(2\pi m^\alpha \Delta f R_0/c + 2\pi f_0 m d \sin\theta_0/c) \quad (25)$$

(R_0, θ_0)라는 위치에 빔이 집중되는 시간을 조절하기 위해 식 (24)는 지수-FDA의 AF가 주기를 가질 때 사용되고, 식 (25)는 주기가 존재하지 않을 때 사용된다.

식 (24)와 식 (25)를 이용한 AF는 식 (26)과 같이 정리된다.

$$\begin{aligned} AF(t, R, \theta) &= \sum_{m=0}^{M-1} u(t - R/c) e^{j2\pi m [m^{(\alpha-1)} \Delta f (t - ((R \pm R_0)/c) + f_0 d (\sin\theta - \sin\theta_0)] / c} \\ & \quad (26) \end{aligned}$$

이 방식을 이용하면 AF의 주기성을 살펴볼 수 있다.

여기서, $f_0 d(\sin\theta - \sin\theta_0)/c = 1$ 과 $t - (R \pm R_0)/c = \frac{1}{\Delta f}$ 라는 조건이 만족된다면 식 (26)은 식 (27)과 같이 정리된다.

$$AF(t, R, \theta) = \sum_{m=0}^{M-1} u(t - R/c) e^{j2\pi m[m^{\alpha-1} + 1]} \quad (27)$$

식 (27)을 확인해 보면 α 가 정수인 경우, 최댓값을 가지는 것을 알 수 있다. 위의 수식을 만들 때 사용한 조건에 따르면, 조건을 만족하는 ϕ_m 의 경우는 2가지 경우가 존재한다. 이는 2개의 지점에 빔이 집중되는 형태의 AF를 형성할 수 있다는 뜻이며, 본 논문에서 제시한 방법을 사용하면 지금까지 보고된 FDA 방식들과는 달리 빔이 집중되는 지점의 개수를 조절할 수 있다. 또한, 논문에서 제시한 ϕ_m 의 정의에 따르면 FDA가 가지는 AF의 주기성을 조절할 수 있다.

4.2 β^m 를 이용한 지수 FDA 방식

m^α 를 사용한 FDA와 비슷하게 β^m 을 사용한 FDA의 주파수 증가분은 식 (28)과 같다.

$$\Delta f_m = \beta^m \Delta f \quad (28)$$

여기서 β 는 AF를 조절하는 변수이다. (R_0, θ_0)라는 위치에 원하는 시간에 빔을 집중하기 위한 ϕ_m 은 식 (29)와 같다.

$$\phi_m = \pm 2\pi \beta^m \Delta f R_0/c - 2\pi f_0 m d \sin\theta_0/c \quad (29)$$

이를 이용한 AF는 식 (30)과 같다.

$$AF(t, R, \theta) = \sum_{m=0}^{M-1} u(t - R/c) e^{j2\pi [\beta^m \Delta f (t - ((R \pm R_0)/c)) + 2\pi m f_0 d (\sin\theta - \sin\theta_0)/c]} \quad (30)$$

표 1. FDA의 중요 매개 변수들

Table 1. Key design parameters of FDA.

FDA type	log-FDA	Linear	2 m	m^2
Frequency increment (M=9)	$\Delta f_m = 3 \log(m+1)10^8$	$\Delta f_m = 3.3 \times 10^7 \times m$	$\Delta f_m = 5.9 \times 10^5 \times 2^m$	$\Delta f_m = 1.1/3 \times 10^7 \times m^2$
GCD	X	3.3×10^7	5.9×10^5	X
Periodicity [s]	X	0.3×10^{-7}	0.17×10^{-5}	2.72×10^{-7}
Maximum frequency increment (MHz)	300	297	297	297
Center frequency (GHz)	24	24	24	24

V. 실험 결과 및 사례 연구

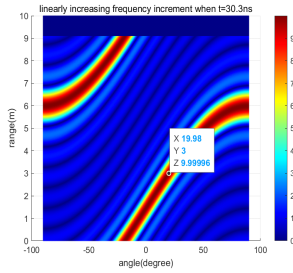
5.1 지수 FDA의 AF

표 1은 조사를 기존의 방식과 제안하는 FDA 방식들의 중요 변수들을 보여준다. 본 연구에서는 (3 m, 20°) 지점에 빔을 집중하는 것을 목표로 하였다. 그림 2는 log-FDA와 선형 FDA를 보여주고 있다. 그림 2(a)와 그림 2(b)는 선형 FDA의 모의실험 결과를 보여주고 있다. 그림 2(a)는 기존에 발표되었던 FDA 방식을 토대로 시간의 경과를 고려하지 않았고, 그림 2(b)는 시간의 경과와 ϕ_m 의 효과를 고려하였다. 전파는 유한한 속도를 가지고 있기 때문에, 그림 2(b)와 같이 약 9 m를 넘어서는 지역에서는 아직 전파가 도달하지 못한 것을 관찰할 수 있다. 그림 2(c)와 그림 2(d)는 log-FDA를 보여준다. 그림 2(c)는 시간의 경과와 유한한 전파 속도를 감안하여 해석하였고, 그림 2(d)는 ϕ_m 을 조절하였다. AF에 주기성이 존재하지 않을 때, ϕ_m 이 가지는 중요성을 명확히 볼 수 있다. ϕ_m 을 조절하지 않을 경우, 그림 2(c)와 같이 빔이 집중되지 않고 원하지 않은 형태로 방사 패턴이 형성되는 것을 볼 수 있다.

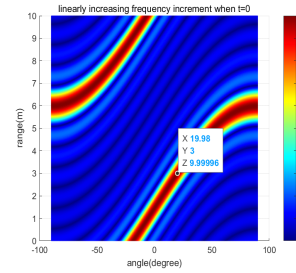
본 논문에서 제안한 지수-FDA의 AF는 그림 3과 같이 나타난다. 그림 3(a)의 경우, 2^m -FDA이며, 이 기법의 경우 GCD를 가지고 있고, 그를 이용하여 주기를 구했다. 그림 3(b)의 경우 m^2 -FDA이며, 이 경우에 GCD는 존재하지 않지만, 무한소수가 아니기 때문에 정수화를 거쳐 주기를 구할 수 있다. 다른 FDA 기법들과는 달리, 하나의 주기 안에서 2개의 다른 지점에서 전자기 에너지를 집중할 수 있다.

5.2 사례 연구: 무선 전력 전송에 사용하기 위한 FDA

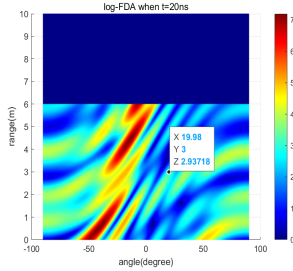
무선 전력 전송(wireless power transfer, WPT) 시스템에



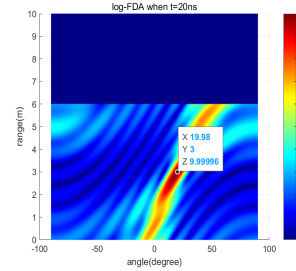
(a) 시간 경과와 전파 속도를 고려하지 않은 선형 FDA
(a) Linear-FDA without analysis of time



(b) 시간 경과, 전파 속도, ϕ_m 를 모두 고려한 선형 FDA
(b) Linear-FDA with analysis of time and phase offset



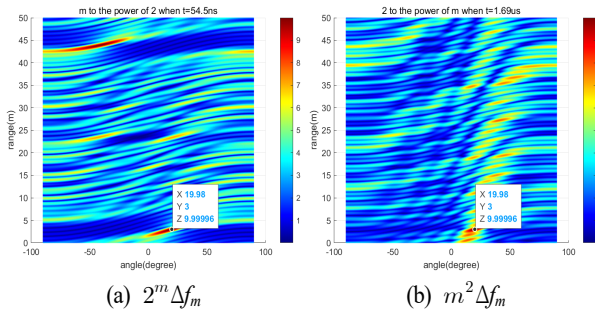
(c) 시간 경과만을 고려한 log-FDA
(c) log-FDA with analysis of time



(d) 시간 경과와 ϕ_m 를 모두 고려한 log-FDA
(d) log-FDA with analysis of time and phase offset

그림 2. FDA의 AF

Fig. 2. AFs in angle-range dimensions.



(a) $2^m \Delta f_m$

(b) $m^2 \Delta f_m$

그림 3. 제안하는 지수-FDA

Fig. 3. AFs of the proposed exponential-FDA methods.

FDA를 적용한 사례 연구를 소개한다. WPT 시스템을 위한 FDA용 안테나는 패치 안테나를 가정하였다. WPT의 동작 주파수는 24 GHz(BW: 24.0~24.3 GHz)로 가정했으며, 송신 안테나에 사용할 FDA 방법은 m^2 FDA를 사용했다. 사례연구를 위한 수신 시스템^[16]은 각각 (10cm, 20°)에 하나 (10 cm, -40°)에 하나를 배치하였고, Friis 전송식을 이용하여 전달된 전력을 구했다. 예를 들어, 전송한 전력

이 37 dBm(5 W)이라면(10 cm, 20°)에 전달된 전력은 16.3 dBm이고, (10 cm, -40°)에 전달된 전력은 14.1 dBm이 된다. 본 사례 연구에서 상정한 수신 시스템^[16]의 효율은 35.1 %이기 때문에 전달된 전력은 (10cm, 20°)에 11.8 dBm이 (10 cm, -40°)에는 9.6 dBm이 전달된다. 이 때 주목해야 하는 사실은 각각의 위치에 m^2 FDA의 주기를 고려하여 계산된 특정 시간들일 때만 전력이 전달되고, 그 이외의 시간에서는 전력이 전달되지 않는다. 또한, 기존의 FDA 방법과 달리 각기 다른 두 위치에 독립적으로 에너지를 집중시켜 전송할 수 있다.

VI. 결 론

이번 논문은 FDA를 이해하는 새로운 분석 방식을 수식적으로 제시하고 검증하였다. 주파수 증가분(Δf_m)과 시간(t)에 대한 관계를 이용하여 시간이 FDA에서 가지는 의미에 대해서 엄밀하게 분석하였다. 본 논문에서 연구된 FDA의 주기성과 ϕ_m 이 가지는 관계는 앞으로 진행될

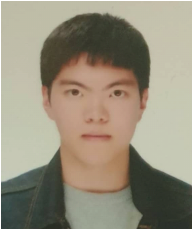
FDA 연구에 새로운 가능성을 제시한다. 주어진 분석 방식들을 이용하면 FDA를 통해 빔 스캐닝과 빔 집중 기능 중에 하나를 쉽게 골라서 사용할 수 있다.

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] A. Akkoc, E. Afacan, and E. Yazgan, "Dot-shaped 3D range-angle dependent beamforming with discular frequency diverse array," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 69, no. 10, pp. 6500-6508, Oct. 2021.
- [3] Y. Liao, J. Wang, and Q. H. Liu, "Transmit beampattern synthesis for frequency diverse array with particle swarm frequency offset optimization," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 69, no. 2, pp. 892-901, Feb. 2021.
- [4] M. Mahmood, H. Mir, "Frequency diverse array beamforming using nonuniform logarithmic frequency increments," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 17, no. 10, pp. 1817-1821, Oct. 2018.
- [5] W. Khan, I. M. Qureshi, "Frequency diverse array radar with time-dependent frequency offset," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 13, pp. 758-761, Apr. 2014.
- [6] A. M. Yao, P. Rocca, W. Wu, A. Massa, and D. G. Fang, "Synthesis of time-modulated frequency diverse arrays for short-range multi-focusing," *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, vol. 11, no. 2, pp. 282-294, Mar. 2017.
- [7] 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.
- [8] K. Chen, S. Yang, Y. Chen, and S. W. Qu, "Accurate models of time-invariant beampatterns for frequency diverse arrays," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 67, no. 5, pp. 3022-3029, May 2019.
- [9] B. Chen, X. Chen, Y. Huang, and J. Guan, "Transmit beampattern synthesis for the FDA radar," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 17, no. 1, pp. 98-101, Jan. 2018.
- [10] M. Secmen, S. Demir, A. Hizal, and T. Eker, "Frequency diverse array antenna with periodic time modulated pattern in range and angle," in *2007 IEEE Radar Conference*, Waltham, MA, Apr. 2007, pp. 427-430.
- [11] W. Khan, I. M. Qureshi, and S. Saeed, "Frequency diverse array radar with logarithmically increasing frequency offset," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 14, pp. 499-502, Nov. 2015.
- [12] L. Zhang, W. Xu, P. Huang, and W. Tan, "Comparison of frequency diverse array patterns with nonuniform frequency offset," in *2020 IEEE MIT-S International Wireless Symposium(IWS)*, Shanghai, Sep. 2020, pp. 1-3.
- [13] G. Huang, Y. Ding, S. Ouyang, and V. Fusco, "Frequency diverse array with random logarithmically increasing frequency offset," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 62, no. 7, pp. 2554-2561, Feb. 2020.
- [14] Y. Liu, H. Ruan, L. Wang, and A. Nehorai, "The random frequency diverse array: A new antenna structure for uncoupled direction-range indication in active sensing," *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, vol. 11, no. 2, pp. 295-308, Mar. 2017.
- [15] Z. Wang, Y. Song, T. Mu, and Z. Ahmad, "A short-range range-angle dependent beampattern synthesis by frequency diverse array," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 22664-22669, Apr. 2018.
- [16] S. Daskalakis, J. Kimionis, J. Hester, A. Collado, M. M. Tentzeris, and A. Georgiadis, "Inkjet printed 24 GHz rectenna on paper for millimeter wave identification and wireless power transfer applications," in *2017 IEEE MIT-S International Microwave Workshop Series on Advanced Materials and Processes for RF and THz Applications(IMWS-AMP)*, Pavia, Sep. 2017, pp. 1-3.

최 우 혁 [부산대학교/석사과정]

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



2021년 2월: 부산대학교 전자공학과(공학사)

2021년 3월~현재: 부산대학교 전기전자공학부 석사과정

[주 관심분야] 안테나, RF회로 및 시스템, 전파응용

김 상 길 [부산대학교/부교수]

<https://orcid.org/0000-0003-1720-2410>



2010년 8월: 연세대학교 전자공학과 (공학사)

2011년 12월: 조지아공과대학 전자공학 (공학석사)

2014년 12월: 조지아공과대학 전자공학과 (공학박사)

2015년 1월~2018년 2월: Qualcomm Inc.

2018년 3월~2022년 2월: 부산대학교 전자공학과 조교수

2022년 3월~현재: 부산대학교 전자공학과 부교수

[주 관심분야] RF회로 및 시스템, 무선시스템, 전파응용