

광대역 균일 빔 생성을 위한 최적의 평면형 배열 설계 방안

Approach to Optimal Planar Array Design
for Broadband Frequency-Invariant Beam Generation

유태호 · 이원진* · 조상왕* · 변강일

Taeho Yu · Wonjin Lee* · Sangwang Cho* · Gangil Byun

요 약

본 논문에서는 신호의 방향 탐지 시, 광대역에서 목표 빔폭을 만족하는 균일 빔을 생성하기 위해 필요한 배열 간격을 도출하는 설계 프로세스를 제안한다. 제안된 프로세스에서 안테나는 평면형 배열로 구성되며, 3 bit를 가지는 위상천이기를 가정하고 목표 빔패턴을 생성한다. 그리고 광대역에서 목표 빔패턴을 균일하게 생성하기 위해 discrete Fourier transform을 활용하여 가중치를 계산하고, 계산된 가중치를 배열에 적용하여 주파수 균일 빔을 생성한다. 또한, 안테나 배열 간격에 따른 균일 빔의 특성을 비교하고, 제안한 균일 빔 평가 기준에 따라 최적의 배열 간격을 선정한다. 선정된 최적 배열에서 빔조향을 실시하였을 때의 빔패턴을 분석하였으며, 3:1 주파수 대역에서 균일한 빔패턴과 목표 커버리지 내에서 부엽이 발생하지 않음을 확인하였다. 또한, 생성된 균일 빔의 반전력 빔폭을 분석하였으며, 시뮬레이션 결과 목표 주파수 대역에서 1.7° 이하의 작은 표준편차를 확인하였다.

Abstract

This paper proposes an array design process to determine the array interval required for generating frequency-invariant beams satisfying the target beamwidth and frequency bandwidth. The proposed process used a planar array configuration assuming a phase shifter with 3 bits to create the target beampattern. The weights were calculated using a discrete Fourier transform and applied to the array to produce a frequency-invariant beampattern. The frequency-invariant beam characteristics were compared based on the antenna interval, and an optimal interval was selected based on the proposed evaluation criteria. Analyzing the beam patterns under the optimal configuration confirmed the frequency-invariant beampattern and the absence of sidelobes within the 3:1 frequency band. Additionally, the analysis of the generated frequency-invariant beampatterns represented simulation results with small standard deviations below 1.7° in the target frequency band.

Key words: Frequency-Invariant Beampattern, Design Process, Broadband, Discrete Fourier Transform, Array Antenna

I. 서 론

최근 군사 및 이동통신 응용 분야에서 무선 신호의 방

향을 탐지하는 기술에 대한 수요가 크게 증가하고 있다 [1][2]. 일반적으로 무선 신호의 방향을 추정하기 위해서는 배열 안테나가 사용되며, 각 배열 안테나에 의해 수신되

「이 논문은 2021년 정부(방위사업청)의 재원으로 국방기술진흥연구소의 지원을 받아 수행된 연구임(KRIT-CT-21-033).」

울산과학기술원 전기공학과 (Department of Electrical Engineering, UNIST)

*LIG넥스원 (LIG Nex1 Co., Ltd)

· Manuscript received August 31, 2023 ; Revised September 18, 2023 ; Accepted December 26, 2023. (ID No. 20230831-068)

· Corresponding Author: Gangil Byun (e-mail: byun@unist.ac.kr)

는 위상 정보를 기반으로 빔스캔을 실시하여 전파 신호의 방향을 추정한다^[3]. 광대역 주파수에서 선형 배열로 신호 방향을 탐지하는 경우, 주파수가 증가할수록 생성된 빔의 빔폭이 좁아지게 된다. 이는 신호처리 연산량과 탐지 시간을 증가시킬 수 있다. 또한, 시스템에서 디지털 위상천이기의 bit 수에 따라 생성할 수 있는 빔의 개수가 달라지며, 위상천이기의 bit 수가 n 일 때 가질 수 있는 나타낼 수 있는 위상은 $360/2^n$ 의 정수배일 때만 가능하므로 불연속적인 값을 가진다. 위상천이기의 bit 수가 적을수록 생성 가능한 위상 개수가 감소하며 이로 인해 빔조향 시 부엽의 크기가 증가할 수 있다^[4]. 따라서 bit가 적은 위상천이기를 활용할 경우 조향 가능한 빔의 개수가 감소하며 좁은 빔폭을 가진 빔을 운용할 때 스캔 블라인드 영역이 발생할 수 있다. 특히, 전자전 분야에서는 3:1 이상의 넓은 주파수 대역에서 신호 탐지가 요구되므로, 고주파수에서 빔폭이 좁아지는 현상으로 인한 문제가 두드러진다. 이러한 문제를 해결하는 방안으로서, 주파수 균일 빔(frequency-invariant beam pattern, FIB) 기술이 활용될 수 있다. 균일 빔은 목표 주파수 대역에서 일정한 빔폭을 가진 빔패턴을 생성하는 기술이며, 다양한 알고리즘에 기반한 균일 빔 생성 연구가 진행되고 있다^{[5]~[10]}. 그러나 안테나 배열 간격에 따라 균일 빔 특성을 비교하고, 이를 통해 최적의 배열을 설계하는 연구는 부족한 실정이다.

본 연구에서는 목표 균일 빔 특성에 따라 요구되는 최적의 안테나 배열을 도출하는 설계 프로세스를 제안한다. 제안된 프로세스에서는 목표 빔패턴을 생성하고, 해당 빔패턴을 광대역에서 생성하기 위해 균일 빔 가중치를 계산한다. 균일 빔 가중치는 MATLAB을 활용하여 IDFT (inverse discrete Fourier transform) 계산을 통해 도출할 수 있으며, 계산된 가중치를 isotropic source 방사패턴을 가정한 배열 안테나에 적용함으로써 균일 빔을 생성할 수 있다. 생성된 균일 빔 특성을 평가하기 위해 균일한 빔폭을 유지하는 주파수 대역(frequency-invariant bandwidth ratio, FIBR), 빔 커버리지, 반전력빔폭(half-power beam width, HPBW), grating lobe free range을 제시한다. 제시된 평가 기준으로 배열 간격에 따른 생성된 균일 빔 특성을 평가하고 이를 기반으로 최종적으로 목표 빔 특성을 만족하는 배열 간격을 도출한다. 또한, 제안한 설계 프로세

스의 예제를 제시하였으며 주파수 대역은 6~18 GHz, 위상천이기의 bit 수는 3으로 가정하였다. 설계 프로세스를 활용하여 최적의 배열 간격을 도출하고 균일 빔 특성을 확인하였다.

II. 제안된 배열 설계 프로세스

그림 1은 목표 빔패턴을 광대역에서 균일하게 생성할 수 있는 최적 배열을 도출하는 프로세스이다. 광대역 균일 빔 패턴을 생성하기 위해서, 먼저 운용하기에 적합한 빔폭과 부엽 수준 등을 고려한 목표 패턴을 결정한다. 그 후 해당 목표 패턴을 광대역에서 균일하게 생성하기 위해 활용할 배열 형상과 안테나 소자 수를 선정한다. 선정

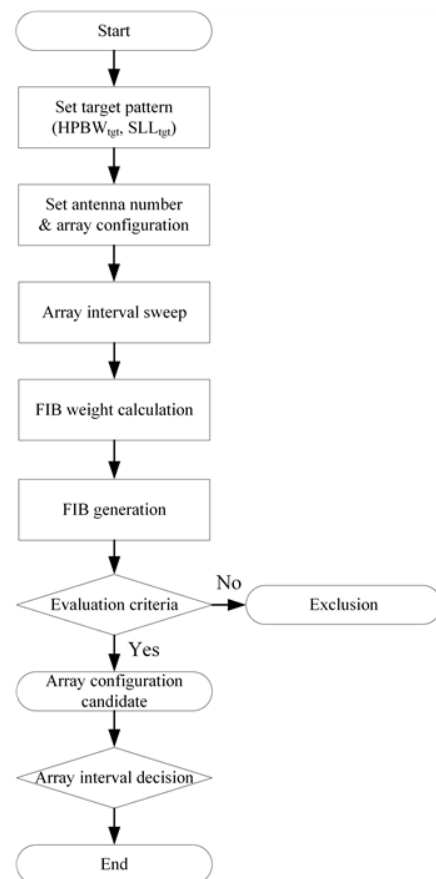


그림 1. 균일 빔 생성을 위한 최적 배열 설계 프로세스
Fig. 1. Optimal array design process for frequency-invariant beam generation.

된 배열에서 안테나 소자 간 간격을 조정하며, 각 배열에서의 균일 빔 가중치를 계산한다. 이때 균일 빔 가중치는 DFT(discrete Fourier transform)을 활용하여 도출할 수 있으며, 균일 빔 가중치를 배열 안테나에 대입하여 균일 빔을 생성한다. 각각의 배열에 따라 생성된 균일 빔은 표 1에서 제시한 평가 기준을 만족하지 못할 경우 해당 배열 간격은 제외된다. 평가 기준에 부합하는 배열 후보군 중 적합한 배열 간격을 선택함으로써 원하는 대역에서의 균일 빔을 생성할 수 있는 최적의 배열을 도출할 수 있다.

그림 2는 광대역 균일 빔 생성을 위한 목표 빔패턴을 나타낸 그래프이다. 이때 목표 빔패턴은 운용 환경에 따라 요구되는 HPBW를 반영하여 다양하게 선정될 수 있다. 3 bit의 위상 천이기를 활용할 경우 8개의 위상 state를 생성할 수 있으며 이에 따라 생성 가능한 빔의 개수가 제한되기 때문에 블라인드 영역 발생할 수 있으므로 블라

표 1. 균일 빔 특성 평가 기준
Table 1. Evaluation criteria of FIB characteristic.

FIBR	≥ 3
Beam coverage	$\pm 45^\circ(\text{Az}), \pm 25^\circ(\text{El})$
HPBW _{igt} (θ)	$\geq 16^\circ (\theta=0^\circ)$
HPBW (frequency)	$\leq \text{HPBW}_{igt}(\theta) \pm 2^\circ (\theta=0^\circ)$ $\leq \text{HPBW}_{igt}(\theta) \pm 5^\circ (\theta>40^\circ)$
Grating lobe free range	$\theta \leq 45^\circ(\text{Az}), \theta \leq 25^\circ(\text{El})$

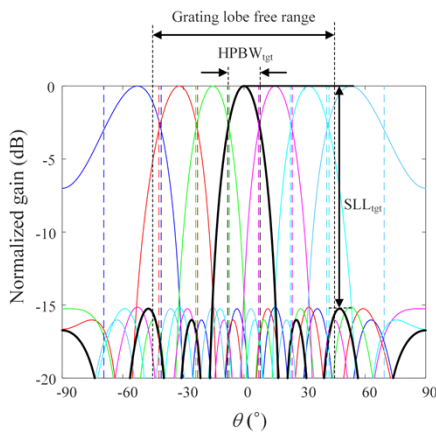


그림 2. 광대역 균일 빔의 목표 빔패턴
Fig. 2. Target beampattern for generating frequency-invariant beam.

인드 영역 없이 빔스캔을 하기 위해 전면 방향 기준 16° 이상의 빔폭을 가지는 목표 빔패턴 선정이 요구된다.

그림 3은 본 예제의 균일 빔 구현하기 위한 배열 형상으로 안테나는 8×8 의 삼각 배열을 활용하였다. x 축 평면을 방위각 면, y 축 평면을 고각 면으로 정의하였고, 안테나 간격은 Δx 와 Δy 로 나타내었다. 삼각 배열 형상을 활용할 경우, 동일한 소자 수의 정사각형 배열을 활용할 때보다 방위각 면에서 두 배의 배열 크기를 확보할 수 있다. 넓어진 배열 크기는 균일 빔 생성할 시 좁은 빔폭부터 넓은 빔폭까지 생성할 수 있으므로 목표 빔패턴의 자유도가 증가한다는 장점이 있다. Δx 와 Δy 를 각각 $0.4 \lambda_{\max}$ 에서 $0.7 \lambda_{\max}$ 로 변화시켜가며 각 배열에서의 균일 빔을 생성하였고, 그 특성을 방위각 면과 고각 면에서 결과를 확인하였다.

본 연구에서 균일 빔을 생성하기 위해 discrete Fourier transform 방식을 활용하여 균일 빔 가중치를 도출하였다^[5]. 목표 빔패턴은 임의의 그래프를 활용할 수 있으나, 일반적으로 식 (1)과 같이 band pass filter 형태로 나타낼 수 있다.

$$F_{2D}(\sin\theta\cos\phi, \sin\theta\sin\phi) = \sum_{l_{igt}=1}^{L_{igt}} \sum_{m_{igt}=1}^{M_{igt}} h(l_{igt}, m_{igt}) \times e^{-j\frac{\omega\sin\theta\cos\phi l_{igt}\Delta x_{igt}}{c}} e^{-j\frac{\omega\sin\theta\sin\phi m_{igt}\Delta y_{igt}}{c}}, \quad (1)$$

이때 ω 는 각주파수를 의미하며, bandpass filter를 구성하는 h 는 band pass filter의 계수를 나타낸다. h 에 따라 패

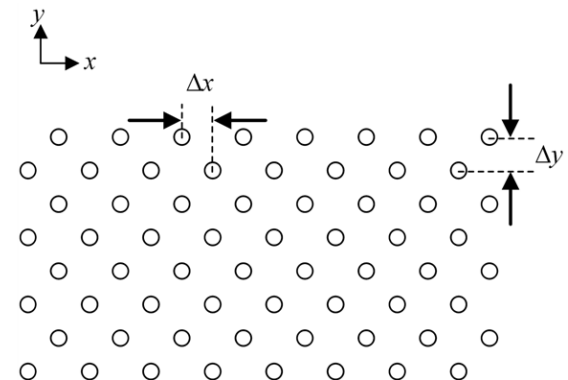


그림 3. 균일 빔 생성을 위한 배열 안테나 형상
Fig. 3. Array antenna configuration for frequency-invariant beam generation.

턴의 빔폭, 부엽 크기가 결정되므로 목표 빔패턴을 생성하기 위해서 적절한 h 가 요구된다^[5]. h 의 크기를 도출하기 위해 다양한 window 함수들이 활용될 수 있으며, 본 연구에서는 MATLAB의 Taylor window 함수를 활용하여 h 를 도출하였으며, 이를 활용하여 목표 빔폭 별 목표 패턴을 생성하였다. 또한, L_{igt} 와 M_{igt} 는 filter 크기, l_{igt} , m_{igt} 는 filter index를 나타낸다. Bandpass filter 형태의 목표 빔패턴을 생성하기 위해 x 축, y 축을 따라 무한한 안테나 소자가 있다고 가정하면 빔 응답 $B(w, q, f)$ 는 식 (2)에서와 같이 FIB 가중치 $D(l\Delta x, m\Delta y, w)$ 와 지수함수 형태의 위상항들과의 합으로 표현할 수 있다.

$$B(w, \theta, \phi) = \sum_{l, m=-\infty}^{\infty} D(l\Delta x, m\Delta y, w) \times e^{-j\frac{\omega \sin\theta \cos\phi l\Delta x}{c}} e^{-j\frac{\omega \sin\theta \sin\phi m\Delta y}{c}}, \quad (2)$$

이때 Δx , Δy 는 x 축과 y 축에서의 안테나 간격을 나타내고, l , m 은 안테나 index를 나타낸다. 또한 $(\omega/c)\Delta x \sin\theta \cos\phi$ 와 $(\omega/c)\Delta y \sin\theta \sin\phi$ 를 각각 ω_1 , ω_2 로 치환하면 빔응답은 식 (3)과 같이 DFT 형태로 나타낼 수 있다.

$$B(\omega_1, \omega_2, w) = \sum_{l, m=-\infty}^{\infty} D(l\Delta x, m\Delta y, w) \times e^{-jl\omega_1} e^{-jm\omega_2}. \quad (3)$$

FIB 가중치 $D(l\Delta x, m\Delta y, w)$ 는 식 (4)와 같이 \tilde{M} 개의 주파수 샘플에 대하여 IDFT(inverse discrete Fourier transform)를 적용하여 구할 수 있다.

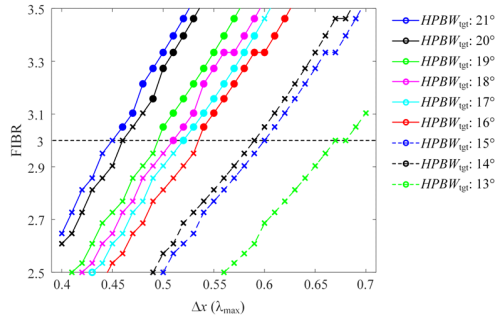
$$D(l\Delta x, m\Delta y, w) = \frac{1}{\tilde{M} \times \tilde{M}} \sum_{\tilde{l}, \tilde{m}=0}^{\tilde{M}-1} B(\omega_1, \omega_2, w) \times e^{-j\tilde{l}\omega_1} e^{-j\tilde{m}\omega_2}, \quad (4)$$

이때 ω_1 과 ω_2 는 \tilde{l} 과 \tilde{m} 에 대하여 $\omega_1 = -\pi + 2\tilde{l}\pi/\tilde{M}$, $\omega_2 = -\pi + 2\tilde{m}\pi/\tilde{M}$ 로 나타낼 수 있다. 또한, 식 (4)에서의 D 의 차원은 $\tilde{M} \times \tilde{M} \times \tilde{M}$ 이며 \tilde{M} 은 안테나 소자 수(L, M)보다 더 크므로, 안테나 소자 수와 차원을 맞추기 위해 D 에 적절한 window 함수 적용이 요구되며 본 연구에서는 rectangular window를 적용하였다. 따라서 windowing 이후의 균일 빔 가중치 D 의 차원은 $L \times M \times \tilde{M}$ 해당하며 계산된 균일 빔 가중치를 활용하여 균일 빔을 생성한다.

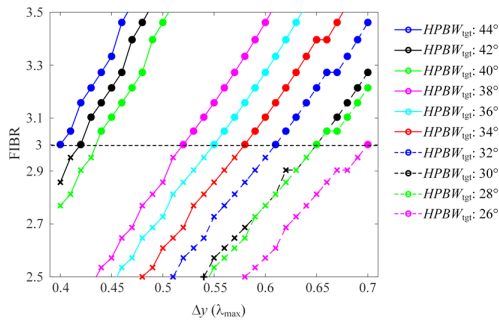
III. 설계 프로세스 예제

본 논문에서 제시된 설계 프로세스를 바탕으로 안테나 간격을 $0.4 \lambda_{\max}$ 에서 $0.7 \lambda_{\max}$ 로 변화함에 따라 균일 빔 성능을 분석하였다. 그림 4는 목표 빔폭($HPBW_{igt}$) 변화에 따른 안테나 간격과 FIBR의 관계를 나타낸 그래프이며, 평가 기준에 부적합할 시 ‘x’ 표시를 하였고, 평가 기준을 만족시킨 경우 ‘○’로 표기하였다. 그림 4(a)는 방위각 면에서의 결과로, 일반적인 배열 간격인 $0.5 \lambda_{\max}$ 로 균일 빔을 생성할 때 18° 보다 큰 빔폭을 가지는 목표 빔패턴으로 선정하면 3 이상의 FIBR을 만족할 수 있다. 보다 좁은 빔폭을 생성하기 위해서는 더 넓은 안테나 간격이 요구되거나 안테나 간격이 커짐에 따라 부엽 발생 및 빔패턴의 왜곡으로 인해 평가 기준에 부적합한 배열이 존재한다. 평가 기준에 부합하는 배열 중, 빔 해상도와 블라인드 영역을 고려하여 16° 의 빔폭을 가지는 목표 빔패턴을 생성하기 위해 배열 간격 Δx 는 $0.54 \lambda_{\max}$ 으로 결정될 수 있다. 그림 4(b)는 고각 면에서의 경우이며, 배열 크기는 방위각 면에서의 배열 크기의 절반에 해당하므로 좁은 빔폭을 생성하는데 제한이 있다. 방위각 면과 동일하게 Δy 를 $0.54 \lambda_{\max}$ 로 결정할 경우 38° 의 빔을 생성할 수 있다. 그림 5는 결정된 배열 형상을 활용하여 나타낸 균일 빔 패턴 그래프이며, 그림 5(a) 및 그림 5(b)는 방위각 면에서의 균일 빔 패턴이고 그림 5(c) 및 그림 5(d)는 고각 면에서의 균일 빔 패턴이다. 그림 5(a)는 전면 방향을 지향할 때, 16° 의 목표 빔폭을 가지는 패턴을 6~18 GHz 대역에서 균일하게 생성한 것을 나타내었다. 그림 5(b)는 3 bit의 위상천이기를 가정하여 43.98° 로 조향하였을 때의 균일 빔 패턴을 나타내었으며, 빔조향에 따라 목표 빔폭은 22.8° 로 증가한다. 고주파 대역에서 -90° 방향에서 부엽이 발생하였으나 목표 범위 내에서 발생하지 않았으며, 목표 주파수 대역에서 빔폭이 유지되었다. 그림 5(c)는 전면 방향 지향한 경우의 빔패턴을 나타내었으며, 이때의 목표 빔폭은 38° 이고, 6 GHz에서 18 GHz의 목표 대역에서 균일한 빔폭을 유지하였다. 그림 5(d)는 13.38° 로 빔조향할 경우, 목표 빔폭은 43° 로 넓어지며 부엽 발생 없이 목표 주파수 대역에서 균일한 빔폭을 유지하였다.

그림 6은 빔패턴의 각도 step을 1° 단위로 나타내었을



(a) 방위각 면에서의 Δx 와 FIBR간의 상호 관계
(a) Relationship between Δx and FIBR in azimuth plane

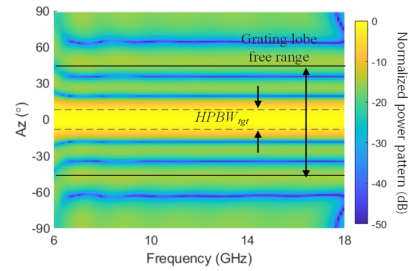


(b) 고각 면에서의 Δy 와 FIBR간의 상호 관계
(b) Relationship between Δy and FIBR in elevation plane

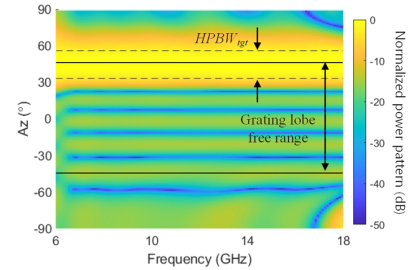
그림 4. $HPBW_{igt}$ 에 따른 배열 간격과 FIBR의 상호 관계
Fig. 4. Interrelationship between array interval and FIBR according to $HPBW_{igt}$.

때의 방위각, 고각 면에서의 HPBW를 나타낸 그래프로, 그림 6(a)는 방위각 면에서 전면 방향을 지향한 경우와 43.98°를 지향한 경우에 주파수에 따른 HPBW를 나타내었다. 전면 방향 지향 시 목표 빔폭에 대한 표준편차는 0.31°이며, 43.98°로 지향한 경우에 표준편차는 0.87°로 균일한 빔폭을 유지하는 것을 확인할 수 있다. 그림 6(b)는 고각 면에서의 주파수별 HPBW를 나타낸 그래프이며, 전면 방향과 13.38° 빔조향한 균일 빔 패턴의 HPBW의 표준편차는 각각 1.64°와 0.77°로 목표 주파수 내에서 균일한 빔폭을 유지하는 것을 확인할 수 있다. 이때 step이 좁아질수록 HPBW 그래프는 보다 연속적으로 나타나며 표준편차 값은 조정될 수 있다. 추가적으로 본 프로세스를 활용하여 도출한 배열 안테나의 성능을 표 2에 나타내었다.

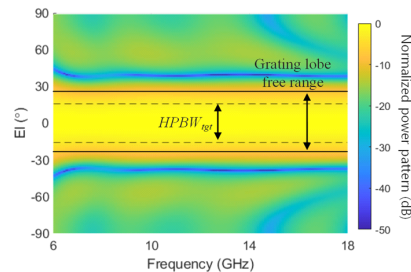
그림 7은 제시한 최적의 배열에서의 방위각 면과 고각 면의 빔조향 결과를 나타낸 그래프이다. 그림 7(a)는 방위



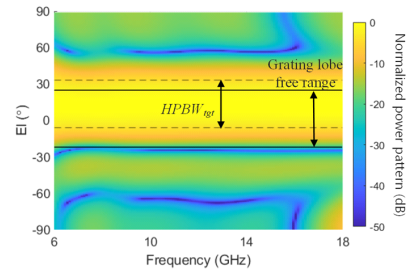
(a) 방위각 면에서의 균일 빔 패턴(조향각: 0°)
(a) FIB pattern in azimuth plane (steering angle: 0°)



(b) 방위각 면에서의 균일 빔 패턴(조향각: 43.98°)
(b) FIB pattern in azimuth plane (steering angle: 43.98°)

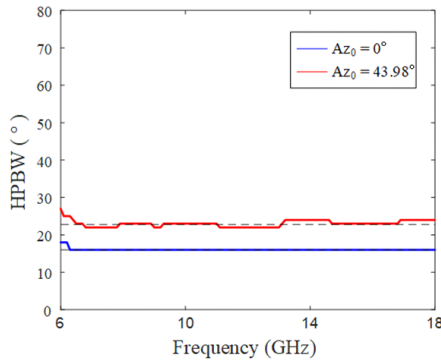


(c) 고각 면에서의 균일 빔 패턴(조향각: 0°)
(c) FIB pattern in elevation plane (steering angle: 0°)

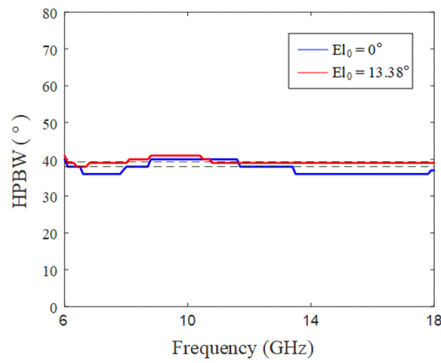


(d) 고각 면에서의 균일 빔 패턴(조향각: 13.38°)
(d) FIB pattern in elevation plane (steering angle: 13.38°)

그림 5. 빔조향에 따른 광대역 균일 빔 패턴
Fig. 5. Broadband frequency-invariant beam according to beam steering.



(a) 방위각 면에서의 HPBW 특성
(a) HPBW characteristic of azimuth plane



(b) 고각면에서의 HPBW 특성
(b) HPBW characteristic of elevation plane

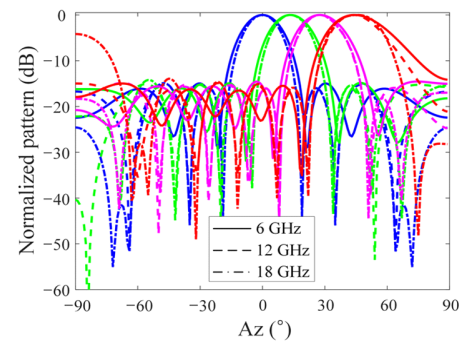
그림 6. 빔조향에 따른 HPBW 특성 분석

Fig. 6. HPBW characteristic analysis according to beam steering.

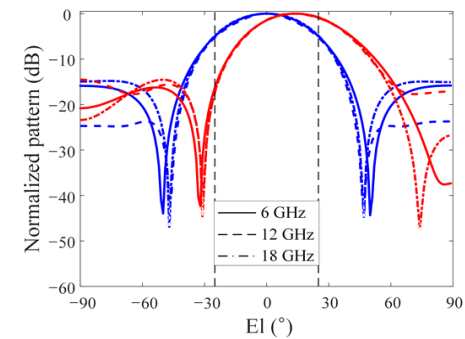
각 면에서 3 bit를 가지는 위상천이기를 활용할 경우 $\pm 45^\circ$ 빔 커버리지 내에서 빔조향 가능한 각도 중 0° , 13.38° , 27.58° , 43.98° 에서의 빔조향 결과를 나타낸 그래프이며, 그림 7(b)는 고각 면에서 $\pm 25^\circ$ 의 빔 커버리지 내 빔조향 가능한 각도 중 0° , 13.38° 로 빔조향 패턴을 나타낸 그래프이다. 고각 면에서의 배열 크기는 방위각 면에서의 배열 크기에 절반이므로 빔 형성 시 상대적으로 넓은 빔폭을 가지기 때문에 두 개의 빔으로도 목표 빔 커버리지 $\pm 25^\circ$ 내에서 빠짐없이 신호를 수신할 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 광대역에서 목표 빔폭과 주파수 대역폭



(a) 방위각 면에서의 빔조향 패턴
(a) Beam steering pattern of azimuth plane



(b) 고각 면에서의 빔조향 패턴
(b) Beam steering pattern of elevation plane

그림 7. 제안된 배열 안테나의 빔조향 패턴

Fig 7. Beam steering pattern of proposed array antenna.

표 2. 제안된 배열 안테나의 균일 빔 성능

Table 2. Frequency-invariant beam performance of the proposed array antenna.

Parameter	The number of antennas	FIBR	Antenna interval	HPBW _{tgt}	Standard deviation of HPBW (Boresight)
x-axis	8	3.05	$0.54 \lambda_{\max}$	16°	0.31°
y-axis	8	3.10	$0.54 \lambda_{\max}$	38°	1.64°

을 만족하는 균일 빔 생성에 필요한 배열 간격을 도출하는 설계 프로세스를 제안하였다. 제안된 프로세스는 목표 빔폭을 선정하고 배열 개수와 배열 형상을 결정한 후, 안테나 배열 간격에 따라 균일 빔을 생성한다. 균일 빔을 생성하기 위해서 DFT를 활용하여 균일 빔 가중치를 계산하

였으며 생성된 균일 빔은 평가 기준에 따라 적합성이 평가된다. 이를 기반으로 적합한 배열 간격을 도출할 수 있다. 이를 검증하기 위해 제시된 설계 프로세스 예제에서 목표 빔폭은 13° 에서 44° 로 다양하게 선정하였으며, 목표 빔폭 선정의 자유도를 높이기 위해 더 넓은 배열 크기를 가지는 8×8 삼각 배열을 활용하여 균일 빔을 생성하였다. 안테나 간격은 $0.4 \lambda_{\max}$ 에서 $0.7 \lambda_{\max}$ 로 변화시키며 각 경우에서의 균일 빔을 생성하였다. 균일 빔 평가 기준으로 FIBR은 3 이상을 만족하도록 하였으며, 빔 커버리지, HPBW, grating lobe free range를 제시하였다. 또한, 3 bit의 위상 천이기를 활용한다고 가정하였으며, 방위각 면에서는 빔 스캔과 빔 해상도를 고려하여 목표 빔폭을 16° 로 선정하였다. 이를 구현하기 위해 가장 적합한 배열 간격으로 $0.54 \lambda_{\max}$ 로 선정하였으며 고각 면에서의 배열 간격은 방위각 면과 동일한 간격은 $0.54 \lambda_{\max}$ 로 배열할 때 38° 의 목표 빔폭을 3 이상의 FIBR에서 만족하였다. 본 프로세스로 도출한 배열을 활용하여 균일 빔 성능을 확인하였으며 빔조향 시 평가 기준에 위반되지 않는 것을 확인하였다. 또한, 방위각 면에서 전면 방향 조향과 빔조향 시의 HPBW를 나타내었으며 표준편차는 각각 0.31° , 0.87° 였다. 고각 면에서의 전면 방향 조향과 빔조향 시 각각의 HPBW 표준편차는 1.64° , 0.77° 로 6~18 GHz의 3:1 주파수 대역에서 균일한 빔폭을 유지하는 것을 확인하였다.

References

- [1] N. Ruan, H. Wang, F. Wen, and J. Shi, "DOA estimation in B5G/6G:Trends and challenges," *Sensors*, vol. 22, no. 14, p. 5125, Jul. 2022.
- [2] A. Al-Khawaja, S. B. Sadkhan, "Intelligence and electronic warfare: Challenges and future trends," in *2021 7th International Conference on Contemporary Information Technology and Mathematics (ICCITM)*, Mosul, Iraq, 2021, pp. 118-123.
- [3] H. L. Van Trees, *Optimum Array Processing: Part IV of Detection, Estimation, and Modulation Theory*, New York, NY, Wiley, 2008.
- [4] P. Delos, B. Broughton, and J. Kraft, "Phased-array antenna patterns(part 6)-sidelobes and tapering", *Micro-waves&RF*, 2020. Available: <https://www.mwrf.com/technologies/embedded/systems/article/21143497/analog-devices-phasedarray-antenna-patterns-part-6sidelobes-and-tapering>
- [5] W. Liu, S. Weiss, "Design of frequency invariant beamformers for broadband arrays," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 56, no. 2, pp. 855-860, Feb. 2008.
- [6] D. B. Ward, R. A. Kennedy, and R. C. Williamson, "Theory and design of broadband sensor arrays with frequency invariant far-field beam patterns," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 97, no. 2, pp. 1023-1034, Feb. 1995.
- [7] D. B. Ward, R. A. Kennedy, and R. C. Williamson, "FIR filter design for frequency invariant beamformers," *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 3, no. 3, pp. 69-71, Mar. 1996.
- [8] M. Crocco, A. Trucco, "Design of robust superdirective arrays with a tunable tradeoff between directivity and frequency-invariance," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 59, no. 5, pp. 2169-2181, May. 2011.
- [9] F. Traverso, M. Crocco, and A. Trucco, "Design of frequency-invariant robust beam patterns by the oversteering of end-fire arrays," *Signal Processing*, vol. 99, pp. 129-135, Jun. 2014.
- [10] M. Li, Y. Chang, Y. Li, J. Dong, and X. Wang, "Optimal polarised pattern synthesis of wideband arrays via convex optimisation," *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, vol. 7, no. 15, pp. 1228-1237, Jul. 2013.

유 태 호 [울산과학기술원/석·박사통합과정]

<https://orcid.org/0000-0002-1015-0112>



2020년 2월: 광운대학교 전자융합공학과 (공학사)

2020년 2월~현재: 울산과학기술원 전기 전자공학과 석·박사통합과정

[주 관심분야] Antenna, Array Antenna, Direction Finding Antennas 등

조 상 왕 [LIG 넥스원/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0001-8799-1684>



2008년 2월: 성균관대학교 정보통신공학부 (공학사)

2007년 12월~현재 : LIG넥스원 전자전연구소 수석연구원

[주 관심분야] RF 수신기, 재밍 시스템, 전자전 시스템 등

이 원 진 [LIG 넥스원/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0003-2911-6835>



1999년 2월: 고려대학교 제어계측공학과 (공학사)

2002년 7월: LG이노텍 연구원

2007년 4월~현재: LIG넥스원 수석연구원

[주 관심분야] 임베디드 시스템, 광대역 디지털 신호처리, 고속데이터 통신, 이격거리 시각동기화

변 강 일 [울산과학기술원/부교수]

<https://orcid.org/0000-0001-9388-9205>



2010년 2월: 홍익대학교 전자전기공학 (공학사)

2012년 2월: 홍익대학교 전자정보통신공학과 (공학석사)

2015년 8월: 한양대학교 전자컴퓨터통신공학과 (공학박사)

2018년 2월~현재: 울산과학기술원 전기

전자공학과 부교수

[주 관심분야] Antenna, Array Antenna, Metasurface, Bio EM Sensor 등