

## 부배열이 적용된 Thinned 위상배열안테나 설계

## Design of Thinned Phased Array Antenna with Subarrays

정태용 · 오경현\* · 정준영\* · 황금철

Taeyong Jeong · Kyunghyun Oh\* · Jun Young Jung\* · Keum Cheol Hwang

## 요 약

본 논문에서는 부배열이 적용된 36×36 thinned 위상배열안테나 설계를 제안한다. Thinning factor가 60 %~65 %의 thinned 위상배열안테나 설계를 위하여 binary-GLPSO가 활용되며, 36개의 부배열 구조를 적용하기 위하여 continuous-GLPSO를 활용하여 thinned 위상배열안테나에 부배열을 적용시키는 방법에 대하여 설명한다. RF 빔 조향 범위는 방위각/고각 40°이며 최적화된 thinned 위상배열안테나의 부엽준위는 각각 26.67 dB, 28.43 dB이며, HPBW(half-power beamwidth)는 4.6°, 4.7°이다. 최적화된 부배열 적용시 디지털 빔 조향 범위는 방위각/고각 방향으로 HPBW/2°이며, 부엽준위는 각각 22.52 dB, 22.53 dB이며, HPBW는 모두 3.5°이다. 방위각/고각 방향으로 40°+HPBW/2°까지 RF 빔 조향과 디지털 빔 조향이 동시에 수행된 경우, 부엽준위는 각각 20.16 dB, 21.25 dB이며, HPBW는 모두 5°이다.

## Abstract

In this paper, a 36×36 design of a thinned phased array antenna with subarrays is proposed. Binary-genetic learning particle swarm optimization (GLPSO) was used to design a thinned phased array antenna with a thinning factor of 60 % to 65 %, and continuous-GLPSO was used to apply 36 subarray shapes. The RF beam steering range was an azimuth/elevation of 40°, the sidelobe levels (SLLs) were 26.67 dB and 28.43 dB, and the half-power beamwidths (HPBW) were 4.6° and 4.7°. When the subarrays were applied, the digital beam steering range was HPBW/2° in the azimuth/elevation direction. SLLs were 22.52 dB and 22.53 dB respectively, and the HPBW were all 3.5°. When RF beam and digital beam steering are simultaneously performed in the azimuth/elevation direction by 40°+HPBW/2°, the SLLs are 20.16 dB and 21.25 dB respectively, and the HPBW are all 5°.

Key words: Thinned Array Antenna, Subarray, Thinned Subarray Antenna, Hybrid Beamforming, Digital Beamforming

## I. 서 론

능동위상배열안테나는 많은 복사소자로 구성되어 있으며 각각의 복사소자에 부착된 TRM(transmitter receiver

module)을 통하여 급전신호의 크기 및 위상이 제어되며 ADC(analog to digital converter)를 통하여 디지털 신호처리가 수행된다. 그러나, 무수히 많은 TRM과 ADC에 의해 배열안테나 시스템의 제작 비용이 비약적으로 증가한다

「이 논문은 2021년도 한화시스템(주)의 재원을 지원받아 수행된 연구임.」

성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과(Department of Electrical and Computer Engineering, Sungkyunkwan University)

\*한화시스템(주) (Hanwha Systems Co., Ltd.)

· Manuscript received February 22, 2022 ; Revised March 14, 2022 ; Accepted March 29, 2022. (ID No. 20220222-018)

· Corresponding Author: Keum Cheol Hwang (e-mail: khwang@skku.edu)

는 문제점과 무수히 많은 복사소자로부터 송/수신된 신호량의 증가는 신호처리의 계산속도가 느려진다는 단점이 있다<sup>[1][2]</sup>. 무수히 많은 TRM으로 인한 안테나 시스템 가격증가 문제를 극복하기 위하여, full 위상배열안테나(안테나의 전체 개구면에 복사소자가 주기적으로 배열된 안테나)에 임의적으로 소자의 급전 신호를 turn off하거나 복사소자가 제거된 형태의 thinned 위상배열안테나가 존재한다<sup>[3]</sup>. Thinned 위상배열안테나는 주기 배열안테나의 복사소자를 임의적으로 제거시킨 형태이므로 복사소자의 배열환경이 비주기적인 상태이기 때문에 부엽준위가 증가할 수 있다. 그러므로, thinned 위상배열안테나의 부엽준위와 HPBW(half-power beamwidth)가 full 위상배열안테나의 부엽준위와 HPBW와 비슷한 수준이 되기 위해서는 최적화 알고리즘을 활용하여 배열 구성(array configuration)을 최적화해야 한다. 참고문헌 [4]의 저자는 genetic algorithm을 활용하여 thinned 위상배열안테나 설계를 위한 배열 구성을 최적화 하였으며, 이외에도 interleaved thinned linear arrays, adaptively thinned arrays 같이 다양한 응용 분야에 thinned 배열안테나가 활용되었다<sup>[5][6]</sup>. 참고문헌 [7]에서는 difference-set과 GA를 결합한 최적화 알고리즘을 활용하여 개구면이 공유된 형태의 이중대역 thinned 위상배열안테나를 최적설계하였다. 그러나, thinned 위상배열안테나 선행연구에는 thinned 위상배열안테나의 설계 방법론에 대하여 서술되어 있으며 thinned 위상배열안테나를 부배열로 형성하는 방법과 빔 조향시 특성에 대해서는 제시되어 있지 않다.

모든 복사소자마다 ADC를 integration할 경우, 무수히 많은 ADC 증가로 인한 안테나 시스템의 가격 및 처리해야될 신호처리량이 비약적으로 증가하게 된다. 이러한 문제를 극복하기 위하여 복사소자를 grouping하는 부배열 기법이 적용되어 왔다<sup>[2]</sup>. 그러나 부배열을 주기성이 있는 상태로 설계하게 되면, 빔을 조향할 때 grating lobe가 발생하게 되므로 부배열을 비주기적인 상태로 설계되도록 부배열을 최적화하여야 한다<sup>[8]</sup>. 참고문헌 [9]는 GA 알고리즘을 활용하여 부배열을 비주기적 상태로 최적화를 하는 연구가 진행되었으며, 최근에는 수정된 PSO 알고리즘을 활용하여 낮은 부엽준위 달성을 위한 부배열 설계 최적화에 대한 연구가 진행되었다<sup>[10]</sup>. 참고문헌 [11]의 저자

는 genetic swarm optimization과 K-means 알고리즘을 결합하여 부배열 최적설계 시간을 단축시켰다. 그러나, 앞선 부배열 설계에 대한 선행연구의 경우, 평면주기배열안테나를 기준으로 부배열을 형성하는 방법에 대하여 제시되어 있으나, 비주기적으로 배열된 thinned 위상배열안테나에 대하여 부배열을 형성하는 방법에 대해서는 제시되어 있지 않다.

본 논문에서는 TRM과 ADC의 개수를 비약적으로 줄여, 안테나 시스템의 제작비용을 낮추고 부배열이 적용된 full 위상배열안테나 성능과 유사한 수준의 부배열이 적용된 thinned 위상배열안테나 설계 방법을 소개하며 빔 조향 시 부엽준위 및 HPBW를 비교하여 제시한다. 부배열이 적용된 thinned 위상배열안테나의 설계를 위하여 참고문헌 [12]에 소개된 최적화 알고리즘인 GLPSO(genetic learning particle swarm optimization)가 활용되었으며, thinned 위상배열안테나 설계를 위하여 binary-GLPSO가 활용되었고 부배열 설계를 위하여 continuous-GLPSO가 활용되었다.

## II. 부배열이 적용된 Thinned 위상배열안테나의 Array Pattern 및 최적화 알고리즘 흐름도 소개

그림 1은 본 논문에서 제안하는 부배열이 적용된 thinned 위상배열안테나 시스템이다. Full 위상배열안테나와 다르게 임의의 복사소자가 제거된 형태로 TRM의 개수가 full 위상배열안테나에 비해 줄어든 형태이다. 그림 1의 구조를 수학적으로 modeling하면 식 (1)~식 (5)와 같

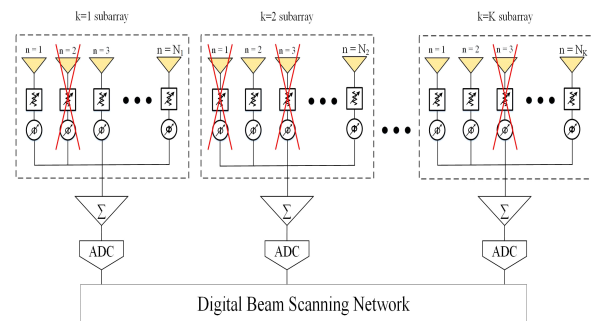


그림 1. 제안된 부배열 구조가 적용된 thinned 위상배열 안테나 구조

Fig. 1. Proposed thinned phased array antenna with subarrays.

이 표현할 수 있다.

$$AP(\theta, \phi) \approx \left( \sum_{k=1}^K f_k(\theta, \phi) \right) f_s(\theta, \phi) \quad (1)$$

$$f_k(\theta, \phi) = \sum_{n=1}^{N_k} a_{k,n} e^{j \frac{2\pi}{\lambda} (x_{k,n}(u-u_t) + y_{k,n}(v-v_t))} \quad (2)$$

$$f_s(\theta, \phi) = \sum_{k=1}^K e^{j \frac{2\pi}{\lambda} (\rho_{k,x}(u-u_s) + \rho_{k,y}(v-v_s))} \quad (3)$$

$$u = \sin(\theta) \cos(\phi)$$

$$v = \sin(\theta) \sin(\phi)$$

$$u_t = \sin(\theta_t) \cos(\phi_t)$$

$$v_t = \sin(\theta_t) \sin(\phi_t)$$

$$u_0 = \sin(\theta_0) \cos(\phi_0)$$

$$v_0 = \sin(\theta_0) \sin(\phi_0)$$

$$(-90^\circ \leq \theta \leq 90^\circ, 0^\circ \leq \phi \leq 360^\circ)$$

$$(-90^\circ \leq \theta_t \leq 90^\circ, 0^\circ \leq \phi_t \leq 360^\circ)$$

$$(-90^\circ \leq \theta_s \leq 90^\circ, 0^\circ \leq \phi_s \leq 360^\circ) \quad (4)$$

$$\rho_{k,p} = \frac{\sum_{n=1}^{N_k} a_{k,n} p_{k,n}}{\sum_{n=1}^{N_k} a_{k,n}} \quad (p = x \text{ or } y) \quad (5)$$

식 (1)은 부배열이 적용된 **thinned** 위상배열안테나의 AP(array pattern)이며  $f_k$ 와  $f_s$ 으로 결정된다. 식 (2)는 단일 부배열에 대한 **array factor**이며  $f_k$ 라고 정의하였으며,  $k$ 번째 단일 부배열에 속한 복사소자의 위치( $x_{k,n}$ ,  $y_{k,n}$ ) 및 TRM에 의해 복사소자에 인가되는 급전신호의 크기( $a_{k,n}$ ) 및 RF 빔 조향(TRM의 위상변위기에 의해 빔이 조향되는 것)을 위해 제어되는 급전신호의 위상값( $u_t$ ,  $v_t$ )으로 결정된다. 식 (3)은 단일 부배열이  $K$ 개만큼 배열되었을 때의 **array factor**이며  $f_s$ 라고 정의하였다.  $f_s$ 는  $k$ 번째의 위상 중심( $\rho_{k,x}$ ,  $\rho_{k,y}$ )과 부배열단에서 수행되는 디지털 빔 조향(ADC 처리 이후 신호처리된 값에 가중치를 적용하여 빔을 조향시키는 것)을 위한 위상값( $u_s$ ,  $v_s$ )에 의해 결정된다. 식 (5)는 각 부배열의 위상중심이며, 복사소자의 위치 및 복사소자에 인가되는 급전신호의 크기에 의해 결정된다.

그림 2는 본 논문에서 제안하는 부배열이 적용된 **thinned**

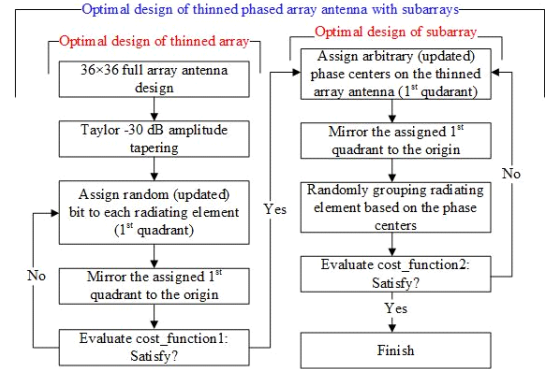


그림 2. 부배열이 적용된 **thinned** 위상배열안테나 최적설계를 위한 알고리즘 흐름도

Fig. 2. Algorithm follow chart for the optimal design of thinned phased array antenna with subarrays.

위상배열안테나 설계를 위한 흐름도이다. 최적화 과정은 2가지 과정으로 나누어 수행되는데, 첫 번째로 최적화 과정 시 **thinned** 위상배열안테나 설계가 수행되며 이를 위하여 **binary-GLPSO** 알고리즘이 활용된다. **Binary** 최적화 알고리즘은 입력변수가 0 또는 1일 때 활용되는 알고리즘이다. 두 번째 최적화는 **continuous-GLPSO**가 활용된다. **Continuous** 최적화 알고리즘은 입력변수가 0 또는 1이 아닌 연속적인 분포를 가질 경우 활용되는 알고리즘이다.

그림 3은 부배열이 적용된 **thinned** 위상배열안테나의 최적화 수행 과정을 정성적으로 설명한 예시이다. Full 위

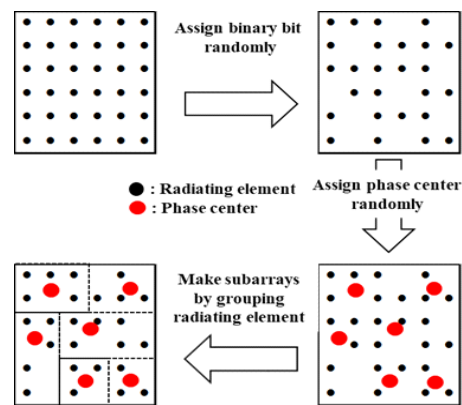


그림 3. 부배열이 적용된 **thinned** 위상배열안테나 최적화 과정

Fig. 3. Optimization process of thinned phased array antenna with subarrays.

상배열안테나에 binary-GLPSO가 적용되어 임의의 복사소자를 제거시켜 thinned 위상배열안테나를 구현하고, thinned 위상배열안테나의 개구면에 continuous-GLPSO가 적용되어 임의의 위상중심을 할당한다. 할당된 위상중심의 인접한 복사소자를 grouping함으로써 부배열을 적용시킨다.

부배열이 적용된 thinned 위상배열안테나 설계목표 및 정량적 설계 과정은 아래와 같다.

- Thinning factor: 60 %~65 %
- 부엽준위: Taylor 30 dB 및 부배열이 적용된 36×36 full 위상배열안테나와 동등한 수준
- HPBW: Taylor 30 dB 및 부배열이 적용된 36×36 full 위상배열안테나와 동등한 수준
- 부배열 개수: 36개
- RF 빔 조향 범위: 방위각/고각 40° 조향
- 디지털 빔 조향 범위: 방위각/고각 HPBW/2° 조향

Step 1: 복사소자 간격은  $0.56 \lambda$  이고, Taylor -30 dB가 적용된 36×36 full 위상배열안테나를 설계

Step 2: 36×36 full 위상배열안테나의 1사분면 개구면 중심부에 49개의 binary 1-bit 강제로 할당

Step 3: 1사분면 개구면 중심부에 강제로 할당된 1-bit를 제외한 1-bit 입력 변수 145~ 161개(thinning factor: 60 %~65 %)는 개구면 중심부를 제외한 다른 구간에 임의의(updated)로 할당. 나머지 부분은 0-bit 할당

Step 4: 1사분면에 1-bit 및 0-bit 할당이 완료되면 원점 대칭을 수행하여 임의의 thinned 개구면 형성

Step 5: 임의의로 형성된 thinned 개구면의 array factor 계산(식 (2))을 통하여 cost\_function1의 만족 여부 확인

Step 6: Cost\_function1이 만족되지 않은 경우 binary bit를 update하여 1사분면 개구면에 무작위 할당

Step 7: Step 3~step 6을 반복 수행하여 cost\_function1이 달성되거나, 설정한 iteration이 완료된 경우 thinned 위상배열안테나 설계 알고리즘 종료

Step 8: 설계된 thinned 위상배열안테나의 1사분면의 개구면에 임의의(upadtae) 위상중심을 할당

Step 9: 1사분면에 할당된 임의의 위상중심 주변에 있는 복사소자를 grouping하여 부배열을 형성

Step 10: 형성된 부배열을 원점대칭

Step 11: 임의의 부배열이 적용된 thinned 위상배열안테나의 AP (식 (1)) 계산을 통하여 cost\_function2 충족 여부 확인

Step 12: Cost\_function2가 충족되지 않은 경우, 임의의 위상중심 위치를 update 하여 step 8~step 11을 반복 수행

Step 13: Cost\_function2가 충족되거나 설정한 iteration이 완료된 경우 최적화 종료

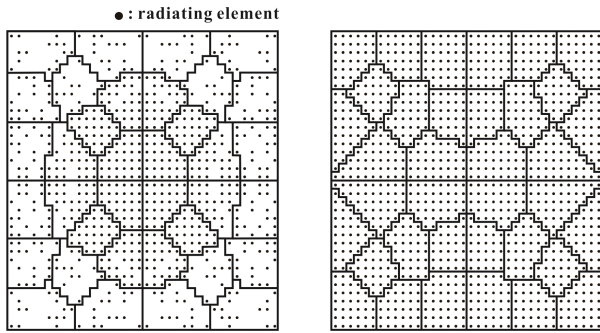
최적화 과정에서 사용된 비용함수는 식 (6)과 식 (7)과 같다. 식 (6)은 thinned 위상배열안테나 설계를 위해 사용된 비용함수이며, 방위각/고각으로 40° RF 빔 조향 시 달성된 부엽준위 중 최대값으로 설정하였다. 식 (7)은 부배열 설계를 위해 사용된 비용함수이며 방위각/고각으로 HPBW/2° 디지털 빔 조향을 수행하였을 때 달성된 부엽준위 중 최대값으로 설정하였다. 두 개의 비용함수는 모두 최소값에 수렴되도록 최적화가 수행된다.

$$\text{cost\_function1} = \text{Max}(\text{SLL}_{\text{Azimuth}40}, \text{SLL}_{\text{elevation}40}) \quad (6)$$

$$\text{cost\_function2} = \text{Max}(\text{SLL}_{\text{Azi\_HPBW/2}}, \text{SLL}_{\text{ele\_HPBW/2}}) \quad (7)$$

### Ⅲ. 최적화된 부배열 구조가 적용된 Thinned 위상배열안테나 구조 및 빔 방사패턴

그림 4는 제안된 thinned 및 부배열 최적화 알고리즘을 통하여 설계된 최적화 부배열이 적용된 thinned 위상배열안테나 및 full 위상배열안테나의 thinned 형상과 부배열 구조를 보여주고 있다. ‘●’은 복사소자 위치를 의미하고 실선으로 나누어진 경계는 부배열로 묶인 경계를 의미하며 각각 36개의 최적화된 부배열로 구성되어 있다. 여기서, 최적화 부배열이 적용된 full 위상배열안테나 설계의 경우, binary-GLPSO가 사용되지 않고 Taylor -30 dB가 적용된 36×36 full 위상배열안테나를 설계 후 본 논문에서 제안된 부배열 최적화 알고리즘이 활용되어 설계되었다. Thinned 위상배열안테나에서 사용된 복사소자의 개수 및

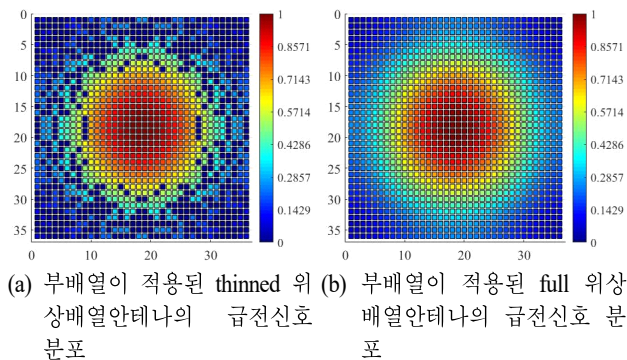


(a) 최적화된 부배열이 적용된 thinned 위상배열안테나 구조  
(a) Thinned phased array antenna with optimized subarrays  
(b) 최적화된 부배열이 적용된 full 위상배열안테나 구조  
(b) Full phased array antenna with optimized subarrays

그림 4. 최적화된 부배열이 적용된 위상배열안테나 형상  
Fig. 4. Phased array antenna shape with optimized subarrays.

TRM의 개수는 792개로 full 위상배열안테나에서 사용된 1,296개보다 약 38.9 % 적은 수치이며, thinning factor는 61.1 %로 설계 목표의 thinning factor를 충족하였다.

그림 5는 그림 4의 부배열이 적용된 thinned 위상배열안테나와 full 위상배열안테나의 급전신호의 크기 분포를 보여주고 있으며, 크기 분포는 Taylor -30 dB를 따르고 있다. 부배열이 적용된 thinned 위상배열안테나의 급전신호 분포의 경우, 복사소자가 존재하는 위치에만 급전신호가 인가되며 복사소자가 없는 곳에는 급전신호가 없는



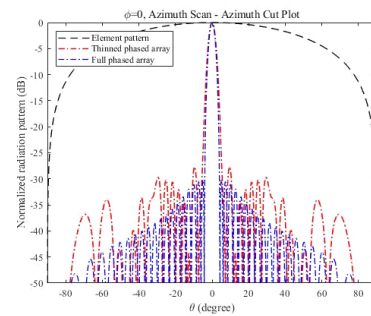
(a) 부배열이 적용된 thinned 위상배열안테나의 급전신호 분포  
(a) Feed signal distribution of thinned phased array antenna with subarrays  
(b) 부배열이 적용된 full 위상배열안테나의 급전신호 분포  
(b) Feed signal distribution of full phased array antenna with subarrays

그림 5. 위상배열안테나에 인가된 급전신호의 분포  
Fig. 5. Distribution of the feed signal applied to the phased array antenna.

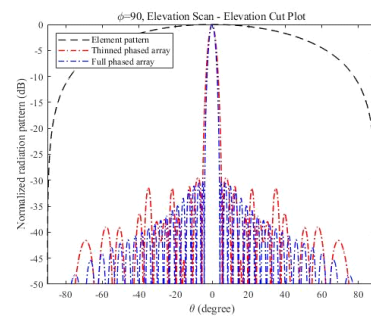
것을 확인할 수 있다.

그림 6~그림 9는 그림 4에서 제시된 안테나의 빔 특성을 보여주고 있다. 제시된 패턴은 식 (1)~식 (5)를 MATLAB을 활용하여 계산된 패턴으로 단일 복사소자 방사패턴은  $\cos^{1.5}\theta$ 의 형태를 활용하였으며, 모든 배열 구조에 상호 간섭 조건 없이 계산되었다.

그림 6은 boresight 방향에서 최적화된 thinned 위상배열안테나와 full 위상배열안테나의 빔 특성을 보여주고 있다. Thinned 위상배열안테나의 방위각 평면에서 바라본 부엽준위의 크기와 HPBW는 각각 27.65 dB, 3.7°이며 고각 평면에서 바라본 부엽준위의 크기는 29.52 dB, 3.7°이다. Full 위상배열안테나의 최대 부엽준위 및 HPBW는 30.1 dB, 3.2°로 부엽준위 크기는 최대 2.48 dB, HPBW는 0.5°



(a) 방위각 평면의 boresight 방사패턴  
(a) Radiation pattern boresight direction in azimuth cut

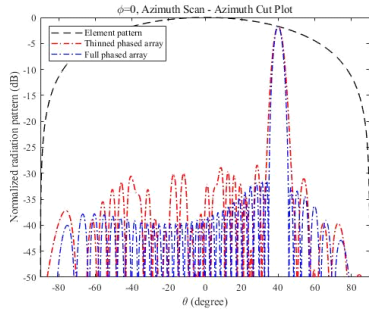


(b) 고각 평면의 boresight 방사패턴  
(b) Radiation pattern boresight direction in elevation cut

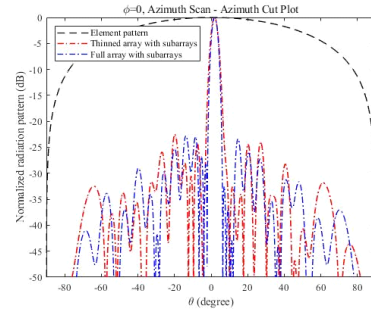
그림 6. Boresight 조향 시 thinned 위상배열안테나 및 full 위상배열안테나의 방사패턴

Fig. 6. Radiation patterns of thinned phased array antenna and full phased array antenna during boresight steering.

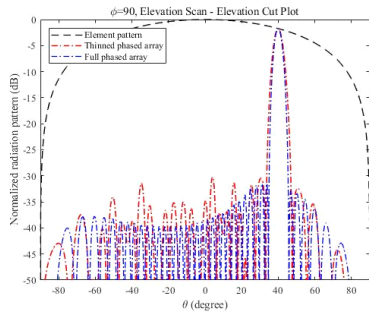




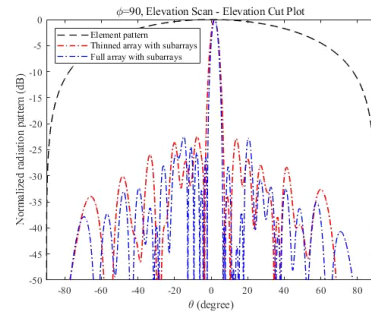
(a) 방위각 40° 방향으로 조향 시 방사패턴  
(a) Radiation pattern when steering 40° in azimuth



(a) 방위각 HPBW/2° 방향으로 조향 시 방사패턴  
(a) Radiation pattern when steering HPBW/2° in azimuth



(b) 고각 40° 방향으로 조향 시 방사패턴  
(b) Radiation pattern when steering 40° in elevation



(b) 고각 HPBW/2° 방향으로 조향 시 방사패턴  
(b) Radiation pattern when steering HPBW/2° in elevation

그림 7. 방위각/ 고각 방향으로 40° 조향 시 thinned 위상배열안테나 및 full 위상배열안테나의 방사패턴  
Fig. 7. Radiation patterns of thinned phased array antenna and full phased array antenna when steering 40° in azimuth/elevation direction.

차이가 난다.

그림 7은 방위각 및 고각 방향으로 각각 40° RF 빔 조향하였을 때, 최적화된 thinned 위상배열안테나 및 full 위상배열안테나의 방사패턴을 보여준다. 방위각/고각 40° RF 빔 조향 시 부엽준위의 크기는 각각 26.7 dB, 28.43 dB이다. Scan loss에 의한 이득감소 1.73 dB를 고려하면 납득 가능한 변화이다. HPBW는 각각 4.6°, 4.7°이다. Full 위상배열안테나의 최대 부엽준위의 크기 및 HPBW는 각각 29.7 dB, 4.2°로 부엽준위 크기 및 HPBW는 최대 3 dB, 0.5° 차이가 발생한다.

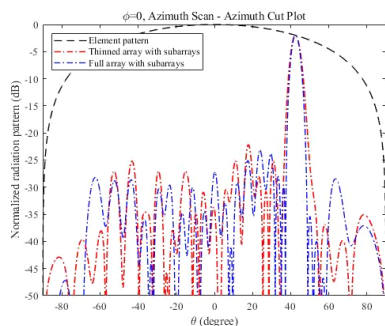
그림 8은 최적화된 부배열이 적용된 thinned 위상배열안테나와 full 위상배열안테나가 부배열 단에서 방위각/고각 방향으로 HPBW/2°만큼 디지털 빔 조향을 수행하였

그림 8. 방위각/고각 방향으로 HPBW/2° 조향 시 부배열이 적용된 thinned 위상배열안테나 및 full 위상배열안테나의 방사패턴

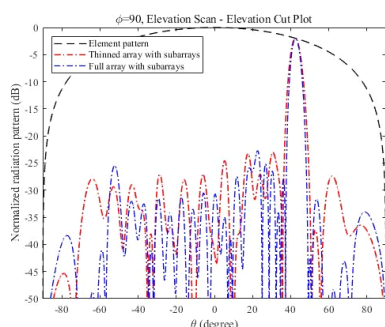
Fig. 8. Radiation patterns of thinned phased array antenna and full phased array antenna with subarrays during HPBW/2° steering in azimuth/elevation direction.

을 때 방사패턴을 보여주고 있다. 방위각 방향으로 빔 조향을 수행하였을 때 부배열이 적용된 thinned 위상배열안테나와 full 위상배열안테나의 부엽준위의 크기는 각각 22.52 dB, 22.75 dB이며, HPBW는 각각 3.5°, 3.4°이다. 고각 방향으로 빔 조향을 수행하였을 때 부배열이 적용된 thinned 위상배열안테나와 full 위상배열안테나의 부엽준위의 크기는 각각 22.53 dB, 22.42 dB이며 HPBW는 각각 3.5°, 3.4°이다. 최적화된 부배열이 적용된 thinned 위상배열안테나와 full 위상배열안테나의 빔 특성이 유사한 것을 확인할 수 있다.

그림 9는 TRM에서 수행되는 RF 빔 조향과 DC 단 이후의 신호처리단에서 수행되는 디지털 빔 조향이 동시에



(a) 방위각  $40^\circ + \text{HPBW}/2^\circ$  방향으로 조향 시 방사패턴  
(a) Radiation pattern when steering  $40^\circ + \text{HPBW}/2^\circ$  in azimuth



(b) 고각  $40^\circ + \text{HPBW}/2^\circ$  방향으로 조향 시 방사패턴  
(b) Radiation pattern when steering  $40^\circ + \text{HPBW}/2^\circ$  in elevation

그림 9. 방위각/고각 방향으로  $40^\circ + \text{HPBW}/2^\circ$  조향 시 부배열이 적용된 thinned 위상배열안테나 및 full 위상배열안테나의 방사패턴

Fig. 9. Radiation pattern of thinned phased array antenna and full phased array antenna with sub-array applied when steering  $40^\circ + \text{HPBW}/2^\circ$  in azimuth/elevation direction.

수행되었을 때의 방사패턴으로 조향 각도는 방위각/고각 방향으로 각각  $40^\circ + \text{HPBW}/2^\circ$ 이다. 방위각 방향으로 빔 조향을 수행하였을 때 부배열이 적용된 thinned 위상배열안테나와 full 위상배열안테나의 부엽준위의 크기는 각각 20.16 dB, 21.15 dB이며 HPBW는 각각  $5^\circ$ ,  $4.5^\circ$ 이다. 고각 방향으로 빔 조향을 수행하였을 때 부배열이 적용된 thinned 위상배열안테나와 full 위상배열안테나의 부엽준위의 크기는 각각 21.25 dB, 20.72 dB이며 HPBW는 각각  $5^\circ$ ,  $4.5^\circ$ 이다. 최적화된 부배열이 적용된 thinned 위상배열안테나와 full 위상배열안테나의 부엽준위의 크기는 유사한 크기를 가졌으나, HPBW는 full 위상배열안테나가  $0.5^\circ$

표 1. 부배열이 적용된 thinned 위상배열안테나의 빔 조향에 따른 부엽준위 및 HPBW 변화

Table 1. Sidelobe level (SLL) and HPBW change according to beam steering of thinned phased array antenna to which subarrays are applied.

	Thinned phased array antenna with subarray		Full phased array antenna with subarrays	
	SLL [dB]	HPBW [ $^\circ$ ]	SLL [dB]	HPBW [ $^\circ$ ]
Boresight	27.65	3.7	30.1	3.2
Azimuth $40^\circ$ RF beamforming	26.7	4.6	29.7	4.2
Elevation $40^\circ$ RF beamforming	28.43	4.7	29.7	4.2
Azimuth HPBW/ $2^\circ$ digital beamforming	22.52	3.5	22.75	3.4
Elevation HPBW/ $2^\circ$ digital beamforming	22.53	3.5	22.42	3.4
Azimuth hybrid beamforming ( $40^\circ + \text{HPBW}/2^\circ$ scan)	20.16	5	21.15	4.5
Elevation hybrid beamforming ( $40^\circ + \text{HPBW}/2^\circ$ scan)	21.25	5	20.72	4.5

더 작은 것을 확인할 수 있다.

표 1에 그림 6~그림 9에서 제시된 빔 특성(부엽준위, HPBW)을 정량적 수치를 제시하였다. RF 빔 조향 시 부배열이 적용된 full 위상배열안테나가 thinned 위상배열안테나보다 우수한 빔 특성을 가지고 있다. 그러나 디지털 빔 조향의 경우와 RF 빔 조향을 디지털 빔 조향과 동시에 수행하는 hybrid 빔 조향의 경우 두 배열안테나의 빔 특성이 유사한 것을 확인할 수 있다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 TRM과 ADC의 개수를 비약적으로 줄이기 위한 부배열이 적용된 thinned 위상배열안테나 설계를 수행하였다. 부배열이 적용된 thinned 위상배열안테나와 full 위상배열안테나의 RF 빔 조향 특성, 디지털 빔 조향 특성과 RF 빔 조향과 디지털 빔 조향이 동시에 수행될 때의 빔 특성을 비교 분석하였다. RF 빔 조향의 경우 부

배열이 적용된 full 위상배열안테나의 빔 특성이 우수한 것으로 확인되었으나 디지털 빔 조향과, RF와 디지털 빔 조향을 동시에 수행한 hybrid 빔 조향의 경우 두 배열안테나의 빔 특성이 유사한 것을 확인하였다. Full 위상배열안테나에 사용된 TRM 개수에 비하여 38.9 % 감소된 TRM의 개수를 고려하였을 때 충분히 활용 가능할 것으로 기대되며, 낮은 부엽준위 달성을 위한 급전신호 최적화에 대한 추가 연구를 통하여 본 논문에 제시된 빔 특성을 개선할 수 있을 것으로 사료된다. 본 논문에서 제시된 부배열이 적용된 thinned 위상배열 설계 방법은 레이다, 통신 안테나에 활용 가능할 것으로 예상된다.

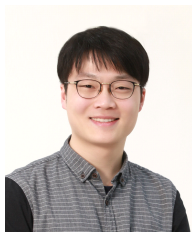
### References

- [1] R. L. Haupt, *Timed Arrays: Wideband and Time Varying Antenna Arrays*, Hoboken, NJ, Wiley-IEEE Press, 2015.
- [2] U. R. O. Nickel, "Properties of digital beamforming with subarrays," in *2006 CIE International Conference on Radar*, Shanghai, Oct. 2006, pp. 1-5.
- [3] R. L. Haupt, *Antenna Arrays: A Computational Approach*, Hoboken, NJ, Wiley-IEEE Press.
- [4] R. L. Haupt, "Thinned arrays using genetic algorithms," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 42, no. 7, pp. 993-999, Jul. 1994.
- [5] R. L. Haupt, "Interleaved thinned linear arrays," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 53, no. 9, pp. 2858-2864, Sep. 2005.
- [6] R. L. Haupt, "Adaptively thinned arrays," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 63, no. 4, pp. 1626-1632, Apr. 2015.
- [7] G. Kwon, J. Park, D. Kim, and K. C. Hwang, "Optimization of a shared-aperture dual-band transmitting/receiving array antenna for radar applications," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 65, no. 12, pp. 7038-7051, Dec. 2017.
- [8] U. R. O. Nickel, "Subarray configurations for digital beamforming with low sidelobes and adaptive interference suppression," in *Proceedings International Radar Conference*, Alexandria, VA, May 1995, pp. 714-719.
- [9] O. S. Kwon, Y. S. Chung, H. G. Yang, C. Y. Cheon, D. S. Kim, and H. Y. Lee, et al., "A new circular subarray configuration using a modified genetic algorithm," *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, vol. 27, no. 4, Mar. 2013, pp. 405-412.
- [10] K. Yang, Y. Wang, and H. Tang, "A subarray design method for low sidelobe levels," *Progress in Electromagnetics Research Letters*, vol. 89, pp. 45-51, Jan. 2020.
- [11] G. Kwon, J. Y. Park, and K. C. Hwang, "Design of a subarray configuration for multifunction radars using a nested optimization scheme," *Electromagnetics*, vol. 36, no. 4, pp. 276-285, May 2016.
- [12] Y. J. Gong, J. J. Li, Y. Zhou, Y. Li, H. S. H. Chung, and Y. H. Shi, et al., "Genetic learning particle swarm optimization," *IEEE Transactions on Cybernetics*, vol. 46, no. 10, pp. 2277-2290, Oct. 2016.



정 태 용 [성균관대학교/석·박사통합과정]

<https://orcid.org/0000-0002-4779-937X>



2018년 2월: 충남대학교 전자공학과 (공학사)

2019년 9월: 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과 석·박사통합과정

2018년 1월~2019년 4월: Keysight Technologies Korea Ltd. Engineer

[주 관심분야] 위상배열안테나 설계, 필터 일체형 안테나 설계, 최적화 알고리즘

정 준 영 [한화시스템/전문연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-7593-8525>



2010년 2월: 성균관대학교 전자전기공학과 (공학사)

2010년 2월~2015년 6월: 삼성탈레스(주) 연구원

2015년 7월~2019년 2월: 한화시스템(주) 선임연구원

2019년 3월~현재: 한화시스템(주) 전문연구

원

[주 관심분야] 레이더/탐색기 시스템, 레이더/탐색기 신호처리

오 경 현 [한화시스템/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-7715-8995>



1998년 2월: 아주대학교 전자공학과 (공학사)

2010년 2월: 아주대학교 전자공학과 (공학석사)

1998년 2월~2015년 6월: 삼성탈레스(주) 수석연구원

2015년 7월~현재: 한화시스템(주) 수석연구

원

[주 관심분야] 밀리미터파 안테나, 배열 안테나, 빔조향 배열안테나

황 금 철 [성균관대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0002-8074-1137>



2001년 2월: 부산대학교 전자공학과 (공학사)

2003년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학 (공학석사)

2006년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학 (공학박사)

2006년 1월~2008년 7월: 삼성탈레스 기

술연구소 책임연구원

2015년 3월~2018년 8월: 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학부 부교수

2018년 9월~현재: 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학부 교수

[주 관심분야] 전자파 복사 및 산란 해석, 안테나, 최적화 알고리즘 등