

# 재귀적 소자 교환 방식을 이용한 능동위상배열안테나 부배열 구조 최적화 알고리즘

## Subarray Structure Optimization Algorithm for Active Phased Array Antenna Using Recursive Element Exchanging Method

채희덕 · 주정명 · 유제우 · 박종국

Heeduck Chae · Joung Myoung Joo · Je-Woo Yu · Jongkuk Park

### 요 약

능동위상배열레이다 기술의 발전에 따라 최근에는 수십 개의 디지털 수신기를 사용하여 부배열 단위에서 수신된 신호를 디지털적인 방법으로 합성하는 능동위상배열안테나가 개발되고 있다. 디지털 빔 합성시 빔 특성은 부배열 단위의 가중치에 의해서도 영향을 받지만, 부배열 구조의 형상에 의해서도 크게 영향을 받는다. 그래서 본 논문에서는 재귀적인 소자 교환 방식을 사용하여 부배열 구조를 생성하는 방법과 운용하는 빔의 부엽을 최소화할 수 있도록 부배열 구조를 최적화하는 알고리즘을 제안하였다. 또한, 본 논문에서 제안한 알고리즘을 적용하여 디지털 빔 형성에 가장 많이 사용되는 모노펄스빔과 펜슬 다중빔에 대해 각각 또는 동시에 최대 부엽을 최소화하는 최적화된 부배열 구조 해를 찾아 그 결과를 제시하였다.

### Abstract

With the development of active phased array radar technology in recent years, active phased array antennas, which digitally combine signals received from subarray units using dozens of digital receiver, have been developed. The beam characteristics are greatly affected by the shape of the subarray structure as well as the weight of subarray in digital beamforming. So in this paper, the method to generate subarray structures by using recursive element exchanging method and the method to optimize subarray structures that can minimize sidelobes of operating beams are proposed. Additionally it presents the result to find the optimized subarray structure to minimize the maximum sidelobe of monopulse beam and pencil multi-beam respectively or simultaneously which are commonly used for digital beamforming by applying the algorithm proposed in this paper.

Key words: Subarray Optimization, Active Phased Array Antenna, Digital Beamforming

### I. 서 론

레이다 기술의 발전에 따라 아날로그 급전기를 통해 빔을 형성하는 방식에서 발전하여 부배열 구조를 이용하

여 아날로그 방식과 디지털 방식이 결합된 하이브리드 형태로 빔을 형성하는 능동위상배열안테나가 늘고 있다. 기존의 아날로그 방식은 사용되는 급전기에 의해 빔의 형태와 개수가 고정되지만, 부배열 단위의 디지털 빔 형

LIG넥스원(LIGNex1)

· Manuscript received May 2, 2016 ; Revised July 22, 2016 ; Accepted August 8, 2016. (ID No. 20160502-051)

· Corresponding Author: Heeduck Chae (e-mail: heeduck.chae@lignex1.com)

성 방식은 빔 형성 시 사용하는 부배열 단위의 디지털 가중치를 조정하여 다양한 형태로 여러 개의 빔을 만들 수 있고, 재밍이나 클러터 등의 방해 신호가 크게 들어오는 방향으로 널을 생성하는 적응빔을 구현하여 신호 대 잡음 특성을 개선할 수 있는 장점이 있다<sup>1)</sup>.

레이다의 목적에 따라 운용하는 빔의 형태와 개수는 달라질 수 있으나, 기본적으로 가장 많이 사용되는 빔의 형태는 저부엽의 펜슬빔, 각도 정확도 향상을 위한 모노펄스빔, 그리고 수신 펜슬 다중빔이다. 부배열 단위의 디지털 빔 형성 시 저부엽 펜슬빔(기본빔)은 각각의 반도체 송수신모듈 내의 감쇄기와 변위기를 조절하여 전체 개구면의 전력 분포를 테일러 또는 해밍과 같이 저부엽을 생성할 수 있는 가중치 분포를 만들어서 생성할 수 있고, 모노펄스빔과 수신 펜슬 다중빔은 디지털로 수신된 부배열 단위의 신호를 합성할 때 추가적인 부배열 단위 디지털 가중치를 적용하여 기본빔과 함께 동시에 생성할 수 있다. 모노펄스빔은 개구면을 좌우 또는 상하로 구분하여 180도의 위상차를 주는 모노펄스 비교기 방식으로 생성할 수도 있으나, 이렇게 생성된 모노펄스빔은 부엽이 느리게 감쇄하여 방해 신호의 영향을 많이 받게 된다. 다중빔의 경우에도 부배열 단위의 디지털 가중치를 이용하여 빔 조향 방식으로 다중빔을 생성하게 되면, 부배열 간의 위상 중심 거리차가 상당히 크기 때문에, 그레이팅 로브와 같은 큰 부엽이 발생하게 된다. 그러므로 부배열 단위의 디지털 빔 형성을 이용하여 기본빔과 동시에 저부엽의 모노펄스빔과 다중빔을 생성하기 위해서는 디지털 가중치도 최적화되어야 하지만, 디지털 빔 형성에 사용되는 부배열 단위의 빔패턴 즉 부배열 구조 자체 또한 최적화할 필요가 있다.

부배열 구조를 나누는 방법은 각 부배열을 대표하는 기준점을 정한 후, 각각의 배열소자가 가장 가까운 기준점에 해당하는 부배열에 소속되도록 하는 방법<sup>2)</sup>과 기본빔 가중치와 최적화하고자 하는 이상적인 가중치를 비교하여 가중치의 분포를 가장 잘 따라갈 수 있는 형태로 부배열을 나누는 방법<sup>3)</sup>이 있다. 전자의 방법은 간단하지만, 부배열에 속하는 소자의 개수를 임의로 정할 수 없고, 후자의 방법은 목적에 따른 저부엽의 빔을 형성할 수 있지만, 가중치의 형태에 의해 부배열 형상이 결정되므로

여러 형태의 빔 가중치가 존재할 경우에는 동시에 최적화하는 데 사용하기 어렵다. 그래서 본 논문에서는 부배열을 구성하는 배열소자의 개수를 임의로 정할 수 있으면서도 부배열을 통해 형성하는 모노펄스빔과 다중빔이 각각 또는 동시에 최적화될 수 있도록 부배열 구조를 최적화하는 방법을 제안하였다. II장에서는 재귀적 소자 교환 방식으로 부배열 구조를 생성하는 새로운 방법과 부배열 가중치를 결정하는 방법, 그리고 부배열 구조를 최적화하기 위해 새롭게 고안한 알고리즘에 대해 제시하도록 한다. III장에서는 제안한 방법을 이용하여 부배열 구조를 최적화한 결과를 제시하고, 마지막으로 결론을 맺도록 한다.

## II. 부배열 구조 최적화 알고리즘

### 2.1 부배열 구조 생성 및 재귀적 소자 교환 방법

먼저 초기 부배열 구조를 생성하는 방법에 대해 살펴

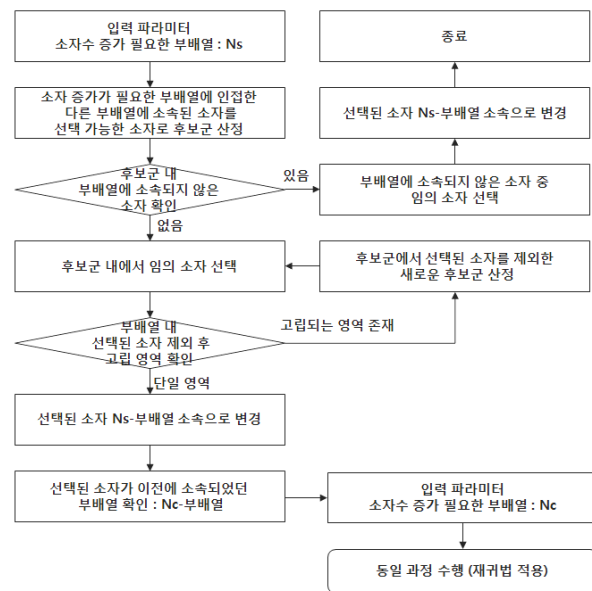


그림 1. 부배열이 정해지지 않은 소자가 있을 경우, Ns-부배열의 단위 소자 수를 증가시키는 재귀적 소자 교환 방법

Fig. 1. Recursive element trading method to increase the number of Ns-subarray element in the case that subarray-undesignated elements exist.

본다. 모든 단위 소자가 부배열에 소속되지 않은 경우에는 각각의 부배열마다 한 개씩의 배열소자를 랜덤하게 선택하여 해당 부배열에 소속되도록 설정한다. 이후 각 부배열에 소속되는 배열소자를 한 개씩 증가시키기 위해 그림 1의 재귀적 소자 교환 방법을 반복적으로 수행한다. 이 과정을 거쳐 최종적으로 생성되는 부배열 구조는 모든 부배열에서 원하는 개수의 배열소자를 가지게 되고, 부배열에 소속되지 않는 배열소자가 존재하지 않게 된다.

만약 이미 생성되어 있는 부배열 구조에서 각 부배열이 원하는 배열소자 개수를 가지도록 부배열 구조를 변경하고자 할 경우에는, 배열소자 개수가 줄어야 하는 부배열과 배열소자 개수가 늘어야 하는 부배열을 선정 한 후, 그림 2의 재귀적 소자 교환 방법을 적용한다. 더 이상 배열소자 개수가 늘거나 줄어야 하는 부배열이 존재하지 않을 때까지 그림 2의 과정을 반복적으로 적용하면, 원하는 배열소자 개수를 가지는 부배열 구조가 최종적으로

생성된다.

앞의 두 방법은 결국 교환할 소자를 랜덤하게 선택할 뿐 아니라, 하나의 소자를 교환하는 데 사용되는 부배열 들 또한 재귀적인 방법으로 랜덤하게 선택되기 때문에, 한 번의 소자 교환이 수행될 때 몇 개의 부배열만 사용되어 부배열 구조에 적은 변화가 발생할 수도 있고, 여러 개의 부배열이 사용되어 최종적으로 부배열 구조에 많은 변화가 발생할 수도 있는 랜덤한 경향을 가진다.

### 2-2 부배열 가중치 산출 방법

부배열 구조를 가지는 능동위상배열안테나는 일반적으로 부배열 형성 모듈을 통해 아날로그적인 방식으로 부배열 단위의 빔을 형성하고, 디지털 수신기를 거쳐 변환된 디지털 신호를 합성하는 디지털 빔 형성 과정을 거쳐 최종적인 빔패턴을 생성한다. 부배열 단위의 빔패턴은 복사소자를 통해 수신된 신호가 반도체수신모듈의 가변감쇄기와 변위기, 그리고 부배열 형성 모듈의 급전기를 거치면서 합성되므로 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$f_{SA_n}(\theta, \phi) = \sum_m f_{(SA_n, m)}^e(\theta, \phi) w_{(SA_n, m)} \quad (1)$$

여기서  $f_{(SA_n, m)}^e(\theta, \phi)$ 는  $n$ 번째 부배열의  $m$ 번째 복사 소자 패턴이고,  $w_{(SA_n, m)}$ 는  $n$ 번째 부배열의  $m$ 번째 수신 경로 가중치로 복사소자로부터 수신된 신호가 저잡음 증폭기, 가변감쇄기와 변위기 등을 거쳐 디지털 신호로 변환되기까지 전 수신 경로에서 발생한 복소 이득을 의미한다.

부배열 단위 빔패턴을 이용하여 디지털 빔 형성을 통해 생성되는 최종 빔패턴은 다음 식과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} f_{MB_P}(\theta, \phi) &= \sum_n w_{SA_n}^{MB_P} f_{SA_n}(\theta, \phi) \\ &= \sum_n \sum_m f_{(SA_n, m)}^e(\theta, \phi) \{w_{(SA_n, m)} w_{SA_n}^{MB_P}\} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서  $w_{SA_n}^{MB_P}$ 는  $P$ 번째 디지털 빔을 형성하기 위해  $n$ 번째 부배열에 적용되는 부배열 가중치이다.

부배열 빔패턴을 결정하는  $w_{(SA_n, m)}$ 은 변위기와 가변 감쇄기에 의해 아날로그적으로 고정되는 값으로 디지털

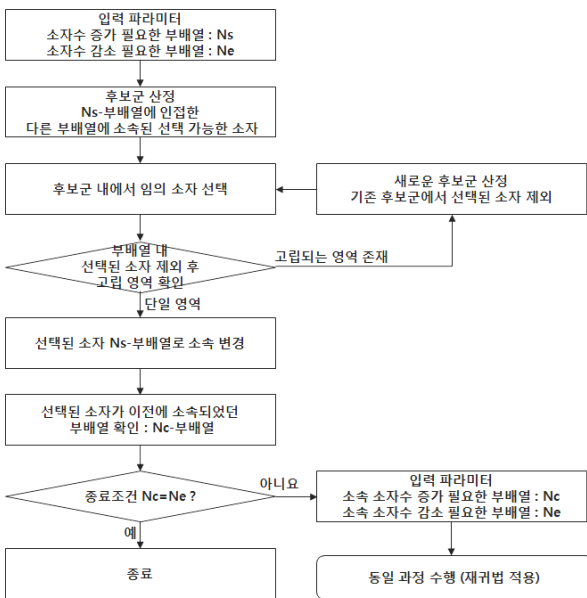


그림 2. Ns-부배열의 단위 소자 수를 증가시키면서 Ne-부배열의 단위소자 수를 감소시키는 재귀적 소자 교환 방법

Fig. 2. Recursive element exchanging method to increase the number of element in Ns-subarray and simultaneously to decrease the number of element in Ne-subarray.

빔 형성 과정 중에는 바뀔 수 없는 값이다. 하지만 부배열 가중치  $w_{SA_n}^{MB_P}$ 는 디지털 빔 형성에 사용되는 가중치로 원하는 디지털 빔의 개수만큼 원하는 형태의 빔을 만들도록 자유로이 변경할 수 있다. 일반적으로 부배열 구조를 사용해서 디지털 빔을 형성하는 경우, 저부엽의 펜슬빔을 기본빔으로 사용하고, 추가적으로 모노펄스를 위해 모노펄스빔을 사용하거나, 넓은 영역의 동시 수신을 위해 펜슬 다중빔을 사용한다. 기본빔인 저부엽 펜슬빔은 최종 가중치인  $w_{(SA_n, m)} w_{SA_n}^{MB_0}$ 가 테일러나 해밍 등과 같이 저부엽 빔을 생성하는 가중치 분포가 되도록 적용하여 생성하고, 추가적인 빔은 부배열 가중치인  $w_{SA_n}^{MB_P}$ 를 이용하여 생성한다. 추가적인 빔 형성을 위한 부배열 가중치의 최적화도 하나의 주제일 수 있으나, 본 논문에서는 참고 문헌 [4]의 방법을 사용하여 부배열 가중치를 결정하였고, 그 방법은 다음과 같다.

먼저 변환행렬을 다음과 같이 정의한다.

$$T = \begin{bmatrix} w_{(SA_1)} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & w_{(SA_2)} & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & w_{(SA_N)} \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서  $w_{(SA_n)}$ 는  $\{w_{(SA_n, m)}\}$ 를 원소로 가지는 열벡터이고, 기본빔 형성에 사용되는 가중치에 의해 정해지는 값이다.

다음으로  $P$ 번째 빔 형성에 사용되는 부배열 가중치  $\{w_{SA_n}^{MB_P}\}$ 로 이루어진 열벡터를  $w^{MB_P}$ 라 두면,  $P$ 번째 빔 형성에 사용되는 전체 개구면의 최종 가중치 전력 분포는  $T w^{MB_P}$ 로 표현된다.  $P$ 번째 빔의 이상적인 형태의 가중치 열벡터를  $w_{ideal}^{MB_P}$ 로 두면, 이상적인 가중치( $w_{ideal}^{MB_P}$ )와 부배열을 통해 형성되는 최종 가중치( $T w^{MB_P}$ ) 사이의 이차오차가 최소화되게 결정되는  $P$ 번째 빔을 형성하는 부배열 가중치는 다음 식을 통해 구할 수 있다.

$$w^{MB_P} = (T^* T)^{-1} T^* w_{ideal}^{MB_P} \quad (4)$$

모노펄스빔을 형성하기 위한 이상적인 가중치는 일반적으로 베일리스 분포를 사용하고, 다중빔을 형성하기 위

한 이상적인 가중치는 기본빔 가중치에 조향빔 생성을 위한 위상 분포만 추가하여 사용된다. 이 방법을 사용하면 모노펄스빔의 경우, 베일리스 분포에 유사한 부배열 가중치를 추출할 수 있어 단순한 모노펄스 비교기를 사용하는 경우보다 훨씬 낮은 부엽의 차폐턴을 형성할 수 있고, 다중빔의 경우에는 부배열의 위상 중심을 찾을 필요 없이 바로 부배열 가중치를 추출하여 조향된 빔으로 구성된 다중빔을 형성할 수 있는 장점이 있다.

### 2.3 부배열 구조 최적화 방법

본 논문에서 제안한 부배열 구조 생성 방법은 재귀적인 방법으로 부배열에 소속된 소자들을 교환하여 새로운 부배열을 생성하는 형태이기 때문에 최적화에 사용할 변수를 산정할 수 없으므로, 일반적으로 많이 사용되는 유전 알고리즘(Genetic algorithm)<sup>[5]</sup>이나 PSO(Particle Swarm Optimization)와 같은 최적화 방법을 적용하기 어렵다. 그래서 본 논문에서는 재귀적 소자 교환 방식에 적합한 새로운 형태의 최적화 방법을 그림 3과 같이 제안하여 적용

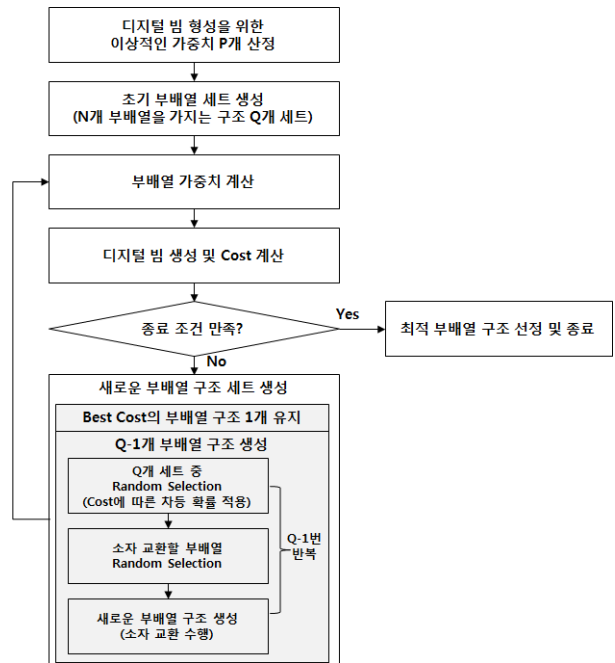


그림 3. 부배열 구조 최적화 알고리즘 순서도  
Fig. 3. Procedure of algorithm to optimize subarray structure.

하였다.

먼저 유전 알고리즘의 모집단과 유사한 방법으로 Q개의 부배열 구조를 모집단으로 생성하고, 식 (4)를 이용하여 각각의 부배열 구조에서 생성하고자 하는 빔들의 가중치를 결정한 후 빔패턴을 합성하고, 비용 함수 값을 계산한다. 다음으로 반복적인 최적화를 통해 새로운 해집단을 생성하기 위하여 유전 알고리즘의 선택과 돌연변이와 유사한 방법을 적용하였다. 먼저 모집단의 비용 함수 값에 따라 모집단의 부배열 구조가 선택될 확률을 차등 적용하여 모집단 내에서도 좋은 비용 함수 값을 가진 부배열 구조가 가장 많은 선택을 받도록 하였다. 그리고 선택 받은 부배열 구조에서 소자수 증가와 감소가 동시에 필요한 부배열을 랜덤하게 선택하도록 한 후, 그림 2의 방법을 적용하여 새로운 부배열 구조가 생성되도록 하였다. 이와 같은 순서로 반복을 거듭하면 비용 함수 값이 좋은 부배열은 보다 많은 선택을 받아 새로운 부배열 구조를 생성하게 되므로 유전 알고리즘과 비슷하게 최종적으로는 비용 함수 값이 좋은 최적의 부배열 구조들만 해집단으로 남게 된다.

### III. 부배열 구조 최적화 결과

세로 방향으로 0.575파장 간격의 34개 복사소자 열을 삼각 배열 형태가 되게 가로 방향으로 0.52파장 간격으로 38개 배열한 원형의 개구면을 가지는 능동위상배열안테나를 이용하여 본 논문에서 제안한 방법으로 32개의 부배열을 가지도록 부배열 구조 최적화를 수행하였다. 배열 간격은 모든 방향으로 70도까지 빔조향을 하더라도 그레이팅로브가 발생하지 않도록 설계되었다. 일반적으로 광각 빔조향을 위해 배열 간격을 좁게 설계하면 복사소자 간 상호 결합량의 커져, 조향 범위 내 능동반사가 증가하여 조향 불가능한 영역이 발생할 수도 있으므로, 복사소자 설계시 조향 범위 내에서 능동반사가 최소화될 수 있도록 주의하여 설계하여야 한다. 빔 패턴 계산 시 식 (2)의 복사소자 패턴  $f_{(SA_n, m)}^e(\theta, \phi)$ 은 모두 동일하게 가정하였다. 실환경에서는 복사소자 각각 위치에서 구조물 영향과 상호 간섭 영향이 달라 복사소자 패턴마다 약간의 차이가 존재한다. 가장자리보다 안쪽으로 중앙에 가까이

위치한 복사소자들의 경우에는 주기적인 배열 효과에 의해 능동 복사 패턴이 거의 동일하지만, 가장자리에 가까이 위치한 복사소자들의 경우에는 안쪽의 복사소자들에 비해 능동 복사 패턴의 왜곡이 심해진다. 복사소자 간의 복사 패턴의 차이는 최종 빔패턴의 부엽 수준을 설계치보다 전반적으로 상승시키는 영향을 미친다. 본 논문에서는 복사 패턴의 왜곡이 심한 부분에 적용되는 가중치 값이 상대적으로 작기 때문에, 전체 복사 패턴에 미치는 영향이 적어 부엽 수준의 증가 정도가 크지 않고, 모든 복사소자 패턴을 시뮬레이션 또는 실측하여 반영하기 어려운 점을 감안하여 복사소자 패턴을 동일하게 가정하고, 부배열 구조 최적화를 수행하였다. 실제 구현을 위해 부배열 구조를 최적화할 경우에는 시뮬레이션 또는 실측을 통해 획득한 각 복사소자 위치마다의 능동 복사 패턴을 독립적으로 적용하여 보다 정확한 빔 패턴 계산을 통해 최적화를 수행하는 것이 바람직하다. 추가적으로 본 논문에서는 빔의 대칭성을 고려하여 부배열 구조도 대칭을 이루도록 설계하였다.

1,000개의 부배열 구조를 II장에서 제안한 부배열 구조 생성 방법으로 랜덤하게 생성한 후 각 부배열 구조에서 저부엽의 기본빔 외에 2축 모노펄스빔과 다중빔을 각각 생성한 경우와 동시에 생성한 경우의 최대 부엽을 분석하였고, 그 결과는 그림 4와 같다. 1,000개의 부배열 구조 생성 시에도 랜덤한 소자 선택과 교환 방법이 적용되었기 때문에, 부배열 구조의 최대 부엽 수준 발생 분포도 정규 분포 형태를 따른다. 또한, 랜덤한 생성에 의해 좋은 결과의 최대 부엽 수준을 가지는 부배열 구조도 존재하지만, 평균적으로 높은 최대 부엽 수준을 가진다.

표 1의 파라미터를 사용하여 II장에서 제안한 부배열 구조 최적화 방법을 적용하여 총 500회의 최적화를 수행하였고, 최적화된 부배열 구조들의 최대 부엽 수준을 분석하여 구한 최대 부엽 수준 발생 분포는 그림 5와 같다. 제안한 최적화 방법을 통해 전반적으로 최대 부엽 수준이 그림 4의 결과와 비교해 보면 상당히 개선되었음을 확인할 수 있다. 또한, 최대 부엽 수준도 -20 dB 이하인 경우가 모노펄스빔의 경우 95 %, 다중빔의 경우 83 % 수준으로, 본 논문에서 제안한 부배열 구조 최적화 방법을 통해 저부엽의 비용 함수 값을 가지는 최적의 부배열 구조 해

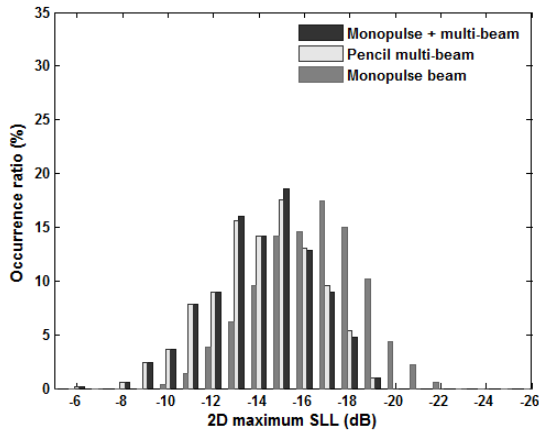


그림 4. 랜덤하게 생성한 초기 부배열 구조 1,000개 샘플의 전공간 최대 부엽 발생 빈도 분포  
 Fig. 4. Full-space maximum sidelobe occurrence ratio distribution of randomly generated 1,000 samples as initial subarray structures.

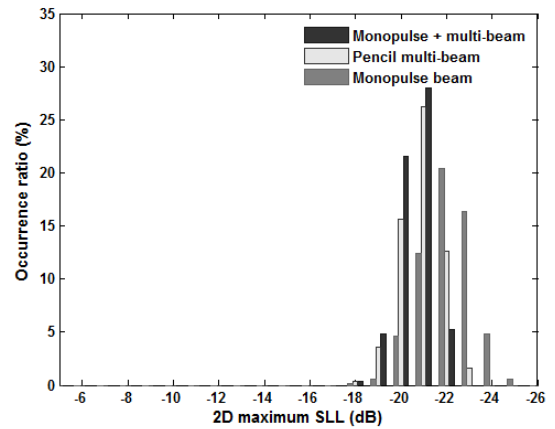


그림 5. 최적화된 부배열 구조 500개 샘플의 전공간 최대 부엽 발생 빈도 분포  
 Fig. 5. Full-space maximum sidelobe occurrence ratio distribution of 500 samples as optimized subarray structures.

표 1. 부배열 구조 최적화에 사용된 파라미터  
 Table 1. Parameters used in subarray structure optimization.

항목	내용
모집단 수	10개
비용 함수	전공간 최대 부엽 수준
선택 확률	가장 좋은 비용 함수 값부터 $\left[ \frac{2}{5}, \frac{1}{5}, \frac{1}{10}, \frac{1}{20}, \frac{1}{20}, \frac{1}{25}, \frac{1}{25}, \frac{1}{25}, \frac{1}{25}, \frac{1}{25} \right]$
종료조건	최대 반복 횟수 50회 이상 또는 최적 비용 함수값 무변화 반복 횟수 5회 이상
기본빔 가중치	-40 dB 테일러 분포, nbar=5
이상적인 모노펄스 가중치	-40 dB 베일리스 분포, nbar=5
이상적인 다중빔 가중치	기본빔에서 방위각/고각 방향 $\pm 3.6$ 도 조향된 빔

를 찾을 수 있음을 검증하였다.  
 그림 6은 최적화를 수행하지 않고 인위적으로 만든 부배열 구조 형태이다. 그림 6의 부배열을 통해 모노펄스빔과 다중빔을 형성할 경우, 인위성에 의한 규칙적인 배열 성분으로 인해 그림 7과 같이 부엽이 그레이팅로브와 비

슷한 형태로 발생하여 최대 부엽이 증가하는 현상을 보인다.

반면, 그림 8은 2축 모노펄스빔의 최대 부엽이 최소화 되도록 최적화된 부배열 구조 형상으로, 그림 6의 인위적인 부배열 구조에 비해 비규칙적인 형태로 저부엽의 모노펄스빔 가중치에 최적화된 형태를 가진다. 그림 9(a), (b)와 같은 원형 베일리스 분포의 이상적인 가중치와 식 (4)를 이용하여 부배열 가중치를 구한 후 모노펄스빔 형성에 사용되는 최종 가중치를 계산한 결과는 그림 9의

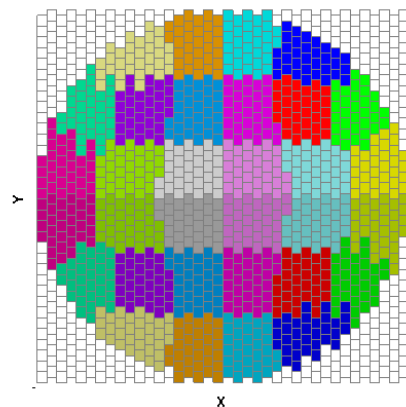
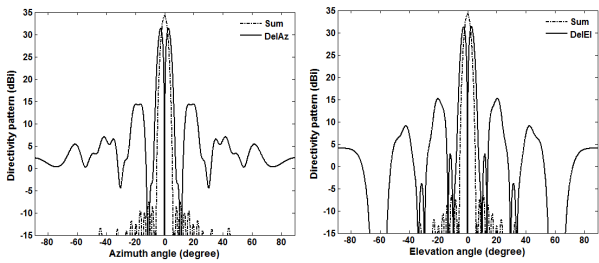
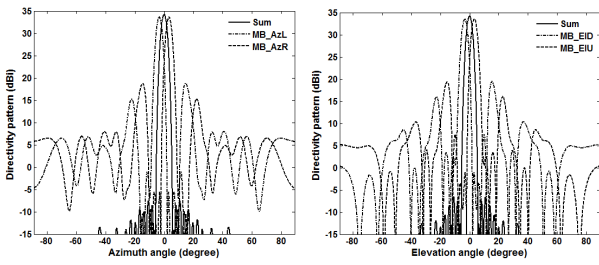


그림 6. 인위적으로 만들어진 부배열 구조  
 Fig. 6. Artificially created subarray structure.



(a) 방위각 모노펄스빔패턴 (b) 고각 모노펄스빔패턴  
(a) Azimuth monopulse pattern (b) Elevation monopulse pattern



(c) 방위각 다중빔 패턴 (d) 고각 다중빔 패턴  
(c) Azimuth multi-beam pattern (d) Elevation multi-beam pattern

그림 7. 인위적 부배열 구조(그림 6)를 이용한 모노펄스빔과 다중빔 패턴

Fig. 7. Pattern results of monopulse-beam and multi-beam using artificial subarray structure(Fig. 6).

(c), (d)와 같다. 그림 8의 부배열 구조에 그림 9(c), (d)의 방위각 방향과 고각 방향 가중치를 적용하여 생성한 2축 모노펄스빔은 그림 10(a), (b)의 실선으로 표시된 패턴과 같다. 그림 10의 Sum 패턴은 기본빔 가중치가 적용된 저

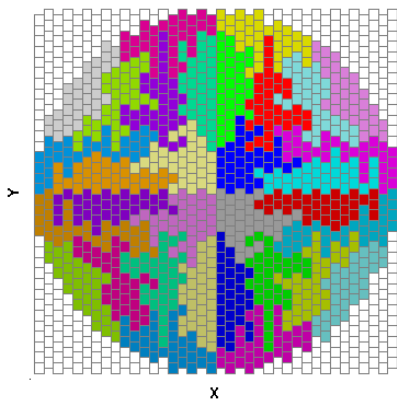
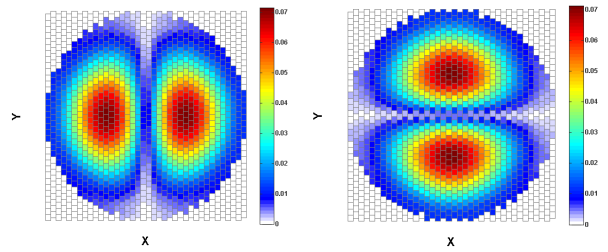
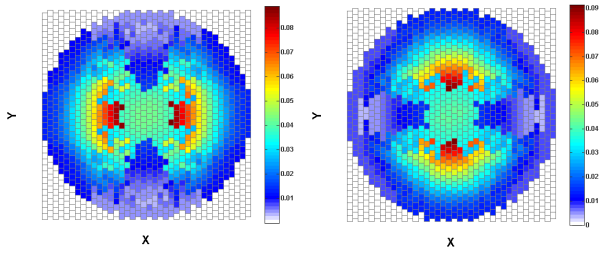


그림 8. 모노펄스빔에 최적화된 부배열 구조  
Fig. 8. Subarray structure optimized for monopulse beams.



(a) 이상적인 방위각차빔 가중치 (b) 이상적인 고각차빔 가중치  
(a) Ideal weight for Az. Del. (b) Ideal weight for El. Del.



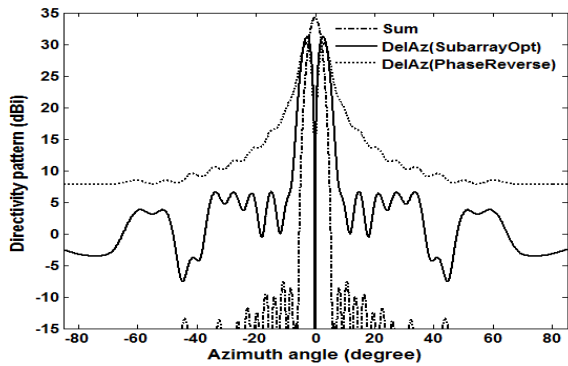
(c) 실제 방위각차빔 가중치 (d) 실제 고각차빔 가중치  
(c) Real weight for Az. Del. (d) Real weight for El. Del.

그림 9. 모노펄스빔 형성을 위한 이상적인 가중치와 부배열에 의한 실제 가중치

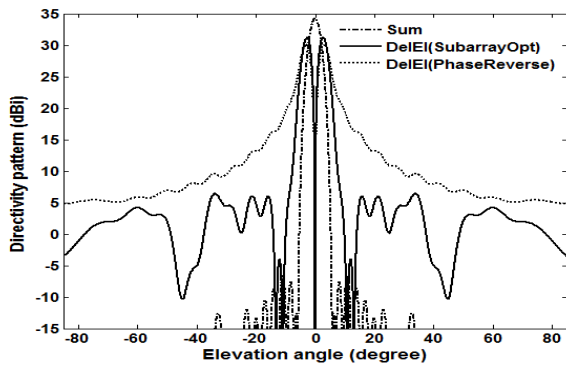
Fig. 9. Ideal weights and real weights of subarray structure for monopulse beamforming.

부엽 펜슬빔이다. 방위각과 고각 방향으로 180도 차이만 적용한 단순한 모노펄스 비교기 방식을 쓴 모노펄스빔(그림 10에서 점선으로 표시된 Phase Reverse 경우)에 비해 최적화된 부배열 구조의 모노펄스빔은 최대 부엽 수준이 상대적으로 낮을 뿐 아니라, 주 빔 밖에서도 부엽이 빠르게 감소하므로 지향성도 각각 31.25 dBi와 31.22 dBi로 모노펄스 비교기만을 사용한 경우의 30.18 dBi와 30.11 dBi에 비해 약 1.1 dB의 이득이 있어 모노펄스 정확도를 좀 더 향상시킬 수 있는 장점이 있다.

기본빔에서 방위각과 고각 방향으로 빔폭만큼 조향된 형태의 다중빔 형성에 최적화된 부배열 구조는 그림 11과 같다. 다중빔의 가중치는 기본빔의 크기 가중치에 조향을 위한 위상 가중치가 더해진 형태로 생성된다. 그림 12(a), (b)와 같이 이상적인 조향을 위한 위상 가중치와 식 (4)를 이용하여 다중빔 형성을 위한 위상 가중치를 그림 12(c), (d)와 같이 생성할 수 있다. 일반적으로 부배열을 통해 다중빔을 형성할 경우, 부배열마다 위상 중심을 선정하고, 조향을 위한 가중치를 계산하여야 하지만, 식 (4)



(a) 방위각 빔패턴  
(a) Azimuth beam pattern



(b) 고각 빔패턴  
(b) Elevation beam pattern

그림 10. 모노펄스빔 패턴 결과  
Fig. 10. Pattern results of monopulse beam.

를 이용하면 위상 중심을 찾을 필요 없이 위상 가중치를 계산할 수 있는 장점이 있다. 그림 11의 부배열 구조에 그림 12(c), (d)의 위상 가중치를 적용하여 생성된 최적화된 2축 다중빔 빔패턴은 그림 13과 같다. 2축 다중빔은 그림 13(a), (b)와 같이 실선으로 표시된 기본빔에서  $\pm 3.6$ 도만큼 방위각과 고각 방향으로 조향된 빔으로 구성된다. 생성된 방위각 방향과 고각 방향의 다중빔은 각각 33.11 dBi와 33.12 dBi의 지향성을 가지고, 기본빔의 지향성 34.24 dBi에 비해 약 1.12 dB 낮은 값을 가진다. 이는 기본빔에 비해 다중빔의 부엽이 상대적으로 크기 때문에 발생하는 현상으로, 부배열을 이용하여 다중빔을 형성할 경우 다중빔의 이득을 높이기 위해서는 부엽을 낮추어야 함을 의미한다.

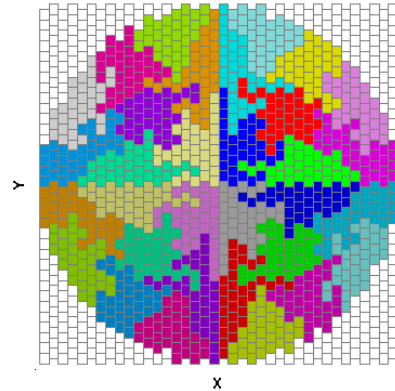
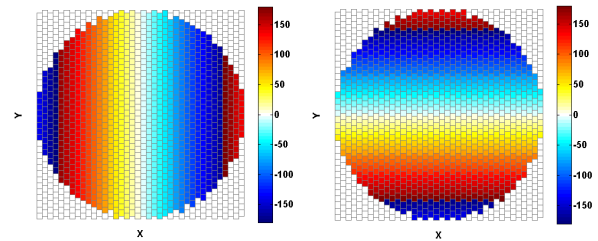
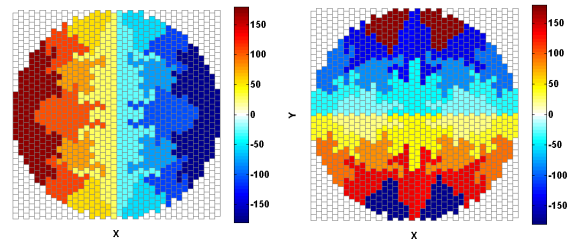


그림 11. 펜슬 다중빔에 최적화된 부배열 구조  
Fig. 11. Subarray structure optimized for pencil multi-beams.



(a) 이상적인 방위각 다중빔 가중치 위상  
(a) Phase of ideal weight for azimuth multi-beam  
(b) 이상적인 고각 다중빔 가중치 위상  
(b) Phase of ideal weight for elevation multi-beam

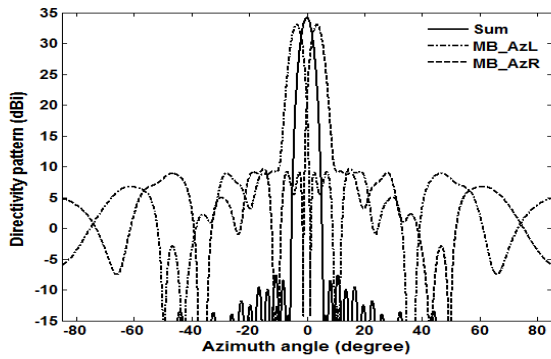


(c) 실제 방위각 다중빔 가중치 위상  
(c) Phase of real weight for azimuth multi-beam  
(d) 실제 고각 다중빔 가중치 위상  
(d) Phase of real weight for elevation multi-beam

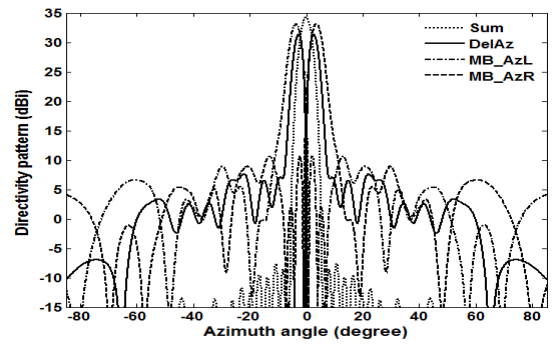
그림 12. 다중빔 형성을 위한 이상적인 가중치 위상 분포와 부배열에 의한 실제 가중치 위상 분포  
Fig. 12. Phase distributions of ideal weights and real weights of subarray structure for multi-beam forming.

추가적으로 본 논문에서 제안한 알고리즘을 이용하여 모노펄스빔과 다중빔의 최대 부엽을 동시에 최소화하는 최적화된 부배열 구조는 그림 14와 같다. 그림 14의 부배

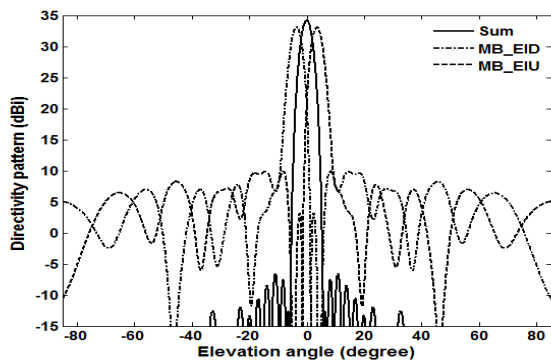




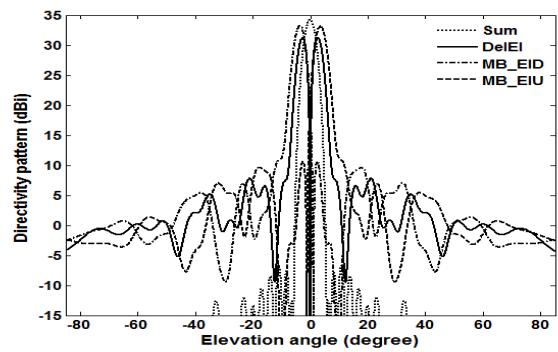
(a) 방위각 빔패턴  
(a) Azimuth beam pattern



(a) 방위각 빔패턴  
(a) Azimuth beam pattern



(b) 고각 빔패턴  
(b) Elevation beam pattern



(b) 고각 빔패턴  
(b) Elevation beam pattern

그림 13. 펜슬 다중빔 패턴 결과

Fig. 13. The pattern results of pencil multi-beam.

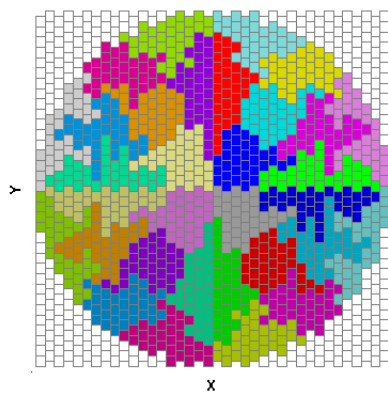


그림 14. 모노펄스빔과 펜슬 다중빔에 동시 최적화된 부배열 구조

Fig. 14. Subarray structure optimized for monopulse beams and pencil multi-beams simultaneously.

그림 15. 동시 최적화된 모노펄스빔과 다중빔 패턴 결과  
Fig. 15. Pattern results of simultaneously optimized monopulse beams and multi-beams.

열 구조를 통해 동시에 생성된 2축 모노펄스빔과 2축 다중빔의 빔패턴은 그림 15와 같다. 그림 15의 빔패턴은 모노펄스빔과 다중빔을 동시에 최적화하였기 때문에 모노펄스빔 단독 또는 다중빔 단독으로 최적화한 결과인 그림 10과 그림 13의 빔패턴과 비교하여 최대 부엽 수준이 각각 약 1.2 dB와 0.6 dB 정도 상승하지만, 서로 다른 형태의 빔을 동시에 최적화한 결과임을 감안하면 충분히 합리적인 결과이다.

인위적으로 생성한 부배열 구조, 그리고 모노펄스빔과 다중빔을 각각 또는 동시에 최적화한 부배열 구조에 의해 생성된 빔패턴의 전공간에서의 최대 부엽 수준은 표 2와 같다. 인위적인 부배열 구조에 비해 모노펄스빔을 최적화한 부배열 구조는 7.6 dB 이상, 다중빔을 최적화된

표 2. 전공간에서의 최대 부엽 비교  
Table 2. Comparison of maximum SLL in full space.

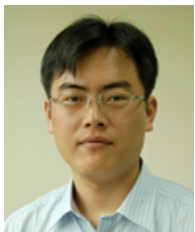
부배열 구조 및 생성되는 빔		전공간 최대 부엽
인위적으로 생성한 부배열 구조(그림 6)	방위각 모노펄스빔	-17.0 dB
	고각 모노펄스빔	-16.1 dB
	방위각 다중빔	-14.9 dB
	고각 다중빔	-14.2 dB
모노펄스빔 최적화 부배열 구조(그림 8)	방위각 모노펄스빔	-24.6 dB
	고각 모노펄스빔	-24.8 dB
펜슬다중빔 최적화 부배열 구조(그림 11)	방위각 다중빔	-23.3 dB
	고각 다중빔	-23.1 dB
모노펄스빔+펜슬다중빔 동시최적화 부배열 구조(그림 14)	방위각 모노펄스빔	-23.6 dB
	고각 모노펄스빔	-23.4 dB
	방위각 다중빔	-22.5 dB
	고각 다중빔	-22.5 dB

부배열 구조는 8.4 dB 이상 최대 부엽 수준이 개선되었고, 모노펄스빔과 다중빔을 동시에 최적화한 부배열 구조는 6.6 dB 이상 최대 부엽 수준이 개선되었다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 재귀적인 소자 교환 방식을 이용하여 부배열 구조를 생성하는 방법을 제안하였고, 재귀적 소자 교환 방식의 부배열 생성에 적합한 부배열 구조 최적화

#### 채 회 덕



1999년 2월: 서울대학교 전기컴퓨터공학부 (공학사)  
2001년 2월: 서울대학교 전기컴퓨터공학부 (공학석사)  
2008년 2월: 서울대학교 전기컴퓨터공학부 (공학박사)  
2007년 3월~현재: LIG넥스원 수석연구원

[주 관심분야] 위상 배열 안테나 설계, 능동 위상 배열 안테나 시스템, 레이더 시스템, 초고주파 수동 회로 설계 및 전자파 수치 해석

알고리즘을 추가로 제안하였다. 또한, 제안한 알고리즘을 이용하여 디지털 빔 형성에 가장 많이 사용되는 모노펄스빔과 펜슬 다중빔에 대해 각각 또는 동시에 최대 부엽을 최소화하는 최적화된 부배열 구조 해를 찾고, 그 결과를 제시하였다. 본 논문에서 제시한 알고리즘은 능동위상 배열레이더의 운용 빔에 최적화된 부배열 구조를 설계하는 데 유용하게 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

#### References

- [1] S. H. Talisa, K. W. O'haver, T. M. Comberiate, M. D. Sharp, and O. F. Somerlock, "Benefits of digital phased array radars", *Proceedings of the IEEE*, vol. 104, no. 3, pp. 530-543, Mar. 2016.
- [2] 채희덕, 유제우, 박종국, "다기능 레이더용 부배열 구조 최적화 알고리즘 개발", 한국군사과학기술학회 종합학술대회, pp. 255-256, 2015년 6월.
- [3] U. Nickel, "Subarray configurations for digital beamforming with low sidelobes and adaptive interference suppression", *IEEE International Radar Conference*, pp. 714-719, Alexandria, May. 1995.
- [4] W. -D. Wirth, *Radar Techniques Using Array Antennas*, IET, 2000.
- [5] Y. Rahmat-Samii, E. Michielssen, *Electromagnetic Optimization by Genetic Algorithms*, Wiley, 1999.

#### 주 정 명



2011년 2월: 홍익대학교 전자전기공학부 (공학사)  
2013년 2월: 홍익대학교 전자정보통신공학과 (공학석사)  
2013년 1월~현재: LIG넥스원 레이더연구센터 선임연구원

[주 관심분야] 레이더 시스템, 수동 및 능동 위상 배열 안테나

유 제 우



2005년 8월: 충남대학교 정보통신공학부 (공학사)  
2008년 2월: 충남대학교 전자공학과 (공학 석사)  
2008년 2월~현재: LIG넥스원 레이더연구 센터 선임연구원  
[주 관심분야] 능동 위상 배열 안테나 설계, 능동 위상 배열 레이더 시스템

박 중 국



1995년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학사)  
1997년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학 석사)  
2001년 8월: 서울대학교 전기컴퓨터공학부 (공학박사)  
2001년 11월~현재: LIG넥스원 수석연구원

[주 관심분야] 위상 배열 안테나 설계, 능동 위상 배열 안테나 시스템, 레이더 시스템, 초고주파 수동 회로 설계 및 전자파 수치 해석