

## 단일포트 위상배열안테나에서 주빔 왜곡 현상을 줄이기 위한 적응형 널링 알고리즘

### Adaptive Nulling Algorithm to Reduce the Main-Beam Distortion in Single-Port Phased Array Antenna

서종우 · 박동철\*

Jongwoo Seo · Dongchul Park\*

#### 요약

본 논문에서는 단일포트시스템으로 설계된 배열안테나에서 수신신호의 스펙트럼 분포로부터 목표신호와 재밍신호를 분리하여 목표신호 방향의 주빔 왜곡을 최소화 하며, 재밍신호 방향으로 패턴 널(null)을 형성하는 새로운 기법 및 비용함수를 제안한다. 제안한 비용함수는 최적화 알고리즘의 한 종류인 PSO(Particle Swarm Optimization) 알고리즘과 gradient-based 섭동 알고리즘을 혼합한 적응형 알고리즘에 적용하여 시간에 따라 재밍신호의 입사방향이 변화하는 이동형 재밍 환경에서도 적응적으로 안정적인 널링 성능을 가진다.

#### Abstract

In this paper, a new technique and cost function which can be to classify jamming signal and target signal from the spectral distribution of received signal in order to minimize the main beam distortion of target signal and to form nulls in the direction of jamming signal in array antennas of single port system is proposed. The proposed cost function is applied to the adaptive algorithm which has the fast convergence and stable nulling performance through the combination of the PSO(Particle Swarm Optimization) algorithm and the gradient-based perturbation algorithm, which shows stable nulling performance adaptively even under the moving jamming signal where the incident direction of the jamming signal is changing with time.

Key words: Adaptive Nulling, PSO, Gradient-Based Perturbation, Anti-Jamming, Phased Array Antenna, Moving Jammer

#### I. 서론

재밍신호나 간섭신호 방향으로 안테나 방사패턴에 널(null)을 형성하여 수신신호의 SINR(Signal to Interference Ratio)이나 SJR(Signal to Jamming Ratio)을 증가시키는 방법으로 구조가 복잡하고 비용이 많이 드는 다중포트시스

템에 비해 구조가 간단하고 구현이 용이한 단일포트시스템을 많이 사용하고 있다. 그러나 제한된 정보만을 이용할 수 있는 단일포트시스템에 적용할 수 있는 알고리즘은 방향성을 가지는 랜덤프로세스 방식을 적용하여 반복 계산에 따른 비용함수가 일정한 값으로 수렴해 가는 자기학습형 최적화 알고리즘<sup>[1]~[6]</sup>과 배열안테나의 수신신

국방과학연구소 제2기술연구본부(The 2nd Research and Development Institute, Agency for Defense Development)

\*충남대학교 전파정보통신공학과(Department of Radio & Information Communication Engineering, Chungnam National University)

· Manuscript received July 25, 2016 ; Revised August 13, 2016 ; Accepted September 10, 2016. (ID No. 20160725-083)

· Corresponding Author: Dongchul Park (e-mail: dcpark@cnu.ac.kr)

호의 출력값을 최소가 되는 방향으로 위상을 최적화하는 방식<sup>[7]</sup> 등으로 제한된다. 여기서, 자기학습형 최적화 알고리즘으로는 유전자 교배와 돌연변이 방식을 이용한 유전 알고리즘(Genetic Algorithm)<sup>[11]~[14]</sup>이나 입자와 군집 간의 위치 및 속도 정보를 활용하여 최적의 값을 찾아가는 PSO(Particle Swarm Optimization)<sup>[5],[6]</sup> 알고리즘을 주로 사용한다.

이러한 자기학습형 최적화 알고리즘의 경우, 랜덤 프로세스를 사용하기 때문에 시간에 따라 재밍신호의 입사 방향이 변경되는 경우, 알고리즘의 구동 과정에서 널 합성 성능이 일관되지 못하다는 단점이 있다. 이러한 이유로 재밍신호나 간섭신호 방향에 대한 사전정보가 없는 경우, 재밍신호나 간섭신호 방향으로 널을 형성하기 위해 배열안테나의 수신신호 출력이 최소가 되는 방향으로 동작되도록 gradient-based 섭동 알고리즘 방법<sup>[8]</sup>을 사용하기도 한다. 그러나 gradient-based 섭동 알고리즘 방법은 매 iteration 별로 각 위상의 gradient 값을 계산해야 하므로 계산 속도가 매우 느리다는 단점을 가지고 있다.

상기 설명한 단일포트시스템에서 사용되는 각각의 알고리즘별 상보관계를 이용해 자기학습형 최적화 알고리즘과 gradient-based 섭동 알고리즘을 혼합한 적응형 알고리즘을 사용할 수 있다. 이러한 혼합 적응형 알고리즘은 실시간으로 변화하는 전파환경에서 초기 동작은 수렴속도가 빠른 PSO 알고리즘을 사용하여 재밍신호에 대한 초기대응을 하고, 이후 gradient-based 섭동 알고리즘을 사용하여 안정적이면서도 시간적으로 변화하는 간섭환경에 효율적으로 대처할 수 있다<sup>[9]</sup>.

그러나 근본적으로 단일포트시스템에서 배열안테나의 수신전력의 출력값이 최소가 되는 방향으로 위상값을 조정하는 방식으로 동작하는 구조에서는 재밍 신호의 억압 뿐만 아니라, 주빔의 이득도 동시에 감소할 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 배열안테나 전체를 적응소자(adaptive element)로 사용하지 않고, 배열안테나의 일부분만 적응소자로 활용하는 부분적응배열안테나(partially adaptive array antenna) 방식을 사용하기도 한다<sup>[7]</sup>. 하지만 이러한 경우, 제한된 적응웨이트를 사용함으로 인해, 주빔 근처로 입사하는 재밍 신호에 대해서는 제대로 동작하지 않는 단점을 가지고 있다.

본 논문에서는 상기에서 지적인 단일포트 시스템에서의 다양한 문제점들을 해결하기 위해 재밍신호나 간섭신호의 입사방향에 대한 사전정보 없이 시간변화의 전파환경에서도 지속적이고 안정적인 SINR을 유지할 수 있도록 PSO와 gradient-based 섭동 알고리즘을 혼합한 적응형 널링 알고리즘을 사용하였다. 또한, 배열안테나의 수신신호로부터 목표신호와 간섭신호를 분리하여 목표신호의 수신전력 감소와 간섭신호의 수신전력을 최소가 되도록 위상을 조정하여 주빔신호의 왜곡 현상을 줄이는 기법을 제안한다. 이에 대한 자세한 내용은 2장에서 설명하기로 한다.

본 논문의 2장에서는 제안된 기법에 적용된 적응알고리즘과 배열안테나 출력신호의 스펙트럼 분포를 통한 비용함수를 정의하는 방법에 대해 살펴보고, 3장에서는 제안된 기법 및 비용함수의 성능분석을 수행하고, 4장에서는 요약과 함께 결론을 맺는다.

## II. 제안된 기법 및 비용함수

PSO 알고리즘은 자기학습을 통해 최적의 해를 찾는 최적화 알고리즘에 속하며, 알고리즘이 매우 간단하고 구현이 용이하여 함수 최적화, 신호처리, 자동적응제어 등의 다양한 분야에 널리 사용되고 있다<sup>[5],[6]</sup>. 그러나 PSO 알고리즘과 같은 자기학습형 최적화 알고리즘 계열만으로는 시간에 따라 목표신호의 정보가 변화하는 환경의 경우, 과거 경험한 비용함수값이 변질되므로 갱신되는 웨이트가 최적의 방향으로 움직이는 것을 기대하기 어렵다. 그럼에도 불구하고 재밍신호 환경이 랜덤에 가까운 급작스러운 변화를 가정하지 않는다면 매우 짧은 구간동안에는 적용이 가능할 수 있을 것으로 기대할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 PSO 알고리즘을 간섭이나 재밍 환경 초기에 매우 짧은 구간동안 구동시켜 재밍신호의 수신전력을 빠르게 감소시키는 수단으로 사용하였으며, 다양한 시뮬레이션을 통하여 최적의 particle size 및 반복구간을 설정하는 기능에 중점을 두었다.

Gradient-based 섭동 알고리즘은 과거 추정치와 현재 값으로부터 다음 단계의 추정치로 진행하는데 필요한 비용함수의 미분치를 미세 섭동 시퀀스에 기반한 근사 미분

값으로 대체하는 방법이다. 자기학습형 최적화 알고리즘에 비해 상대적으로 수렴 속도가 느리다는 단점을 가지고 있지만, 미세 섭동에 의한 시스템 응답변화가 작으며, 갱신되는 웨이트의 변화량을 작게 설정하면 매우 안정적인 시스템 응답을 기대할 수 있다는 장점이 있다<sup>[8],[9]</sup>.

본 논문에서는 PSO 알고리즘과 gradient-based 섭동알고리즘을 혼합하여 시간에 따라 재밍신호의 입사방향이 변화하는 환경에서도 적응적으로 대처할 수 있도록 하였다. 성능분석을 위한 위상배열안테나 시스템의 위상제어는 6 bit의 디지털 위상변이기를 가정하였으며, 이때 계산된 최소제어위상 단위인 섭동의 크기  $\delta=5.625^\circ$ 이며, 이는 6 bit 디지털 위상변이기의 해상도에 해당되는 값이다.

본 논문에서 제안하는 배열안테나 수신신호의 스펙트럼 분포를 통해 목표신호 수신전력의 감소를 최소화하는 동시에 재밍신호를 최소화하는 기법을 설명하기 위한 위상제어 시스템 구성도 및 좌표계는 그림 1과 같다.

그림 1의 M×N의 배열소자로 이루어진 평면배열안테나에서 x-z 평면을 안테나 배열평면으로 설정하였으며,

전체 배열안테나에 적응웨이트(adaptive weight)를 적용하는 방식을 사용한다. 각각의 배열소자들로부터 수신된 신호는 위상변이기를 거쳐 합쳐진 후, ADC를 통해 디지털 신호로 변환 후 FFT(Fast Fourier Transform)를 수행하여 제어부로 전달된다.

제어부는 FFT 결과로부터 목표신호 및 재밍신호 각각의 주파수 스펙트럼을 분석하여 목표신호의 주파수 스펙트럼과 재밍신호의 주파수 스펙트럼의 겹침 여부를 판단하고, 판단된 결과에 따라 비용함수를 선택하게 된다.

배열안테나 최종 출력 신호( $S(t)$ )를  $N_F$  개로 FFT한 결과 나타나는 목표신호의 스펙트럼 점유 대역이  $N_L \sim N_H$  사이에 있다고 가정할 때, 본 논문에서 제안하는 비용함수  $F$  및 각각의 파라미터값에 대한 정의는 식 (1) ~ (5)와 같다. 목표신호의 스펙트럼 점유 대역이  $N_L \sim N_H$ 의 FFT bin에 있다고 가정하면 식 (2)의  $\Gamma_{avg}$ 는 목표신호의 평균 스펙트럼 전력이며, 식 (3)의  $\Gamma_\sigma$ 는 목표신호의 점유 스펙트럼 영역에서의 스펙트럼 전력의 표준편차를 나타낸다.

$$F = \frac{f + g}{\Gamma_{avg}} \tag{1}$$

$$\Gamma_{avg} = \frac{1}{N_F} \sum_{\ell=N_L}^{N_H} \mathcal{J}_\ell^2(S(t)) \tag{2}$$

$$\Gamma_\ell = \Gamma_{avg} + \Gamma_\sigma, \quad N_L \leq \ell \leq N_H \tag{3}$$

$$f = \begin{cases} \sum_{\ell=N_L}^{N_H} \mathcal{J}_\ell^2(S(t)) - \Gamma_\ell, & \text{if } f > 0 \\ 0, & \text{if } f \leq 0 \end{cases} \tag{4}$$

$$g = \sum_{\ell=0}^{N_L-1} \mathcal{J}_\ell^2(S(t)) + \sum_{\ell=N_H+1}^{N_F-1} \mathcal{J}_\ell^2(S(t)) \tag{5}$$

식 (1)에서 목표신호의 점유 스펙트럼 대역의 스펙트럼 전력 평균값이 분모에 위치하여 목표신호의 수신전력이 커질수록 비용함수는 감소하게 된다. 이때, 식 (2)의  $\mathcal{J}_\ell^2(S(t))$ 는 배열안테나 최종출력신호( $S(t)$ )를 FFT한 후 제어부에 구한  $\ell$ 번째 FFT bin에서의 스펙트럼 전력의

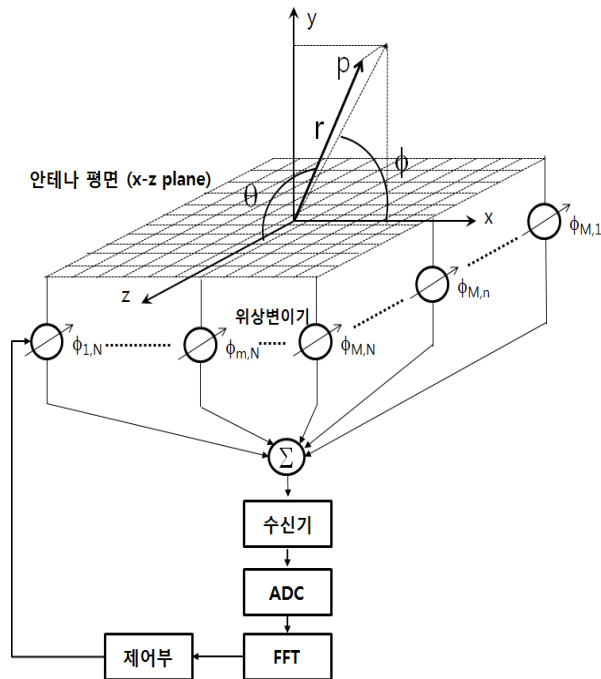


그림 1. 위상제어 시스템 구성도 및 좌표계  
Fig. 1. Phase control system configuration and coordinate.

미한다. 식 (4)로 주어지는  $f$ 는 목표신호의 점유 스펙트럼 대역에서 스펙트럼 전력의 표준편차 이상의 특이점들의 전력의 합을 의미하며, CW 또는 협대역의 재밍신호가 목표신호의 점유 스펙트럼 영역으로 유입되는 경우를 가정한 것이다. 식 (5)로 주어지는  $g$ 는 목표신호의 점유 스펙트럼 외부에 유입될 수 있는 다양한 재밍신호를 대비한 것이다. 따라서 식 (1)로 주어지는 비용함수를 최소화하는 적응알고리즘에 의한 위상 조절은 목표신호의 수신전력이 커지고, 목표신호의 점유 스펙트럼 바깥에 유입되는 재밍신호 및 잡음이 줄어들며, 목표신호의 점유 스펙트럼 내에 비정상적으로 큰 스펙트럼 성분이 감소하는 방향으로 이루어지게 된다. 이는 결과적으로 식 (1)로 주어지는 비용함수의 분자항에 사용되는  $f$  또는  $g$ 의 선택은 유입되는 재밍신호나 간섭신호의 스펙트럼 분포에 의존함을 의미한다. 이때, 스펙트럼 분포 내외에  $f$  또는  $g$  단일 재밍신호가 인가될 경우에는 나머지 변수를 0으로 설정하며, 두 개 이상의 재밍신호가 스펙트럼 분포 내외에 동시에 존재할 경우  $f$ 와  $g$ 를 합한 값을 비용함수에 적용하게 된다.

제안하는 비용함수의 실제 적용방법을 보다 구체적으로 설명하기 위해 그림 1의 배열안테나 입력단에 특정 대역폭의 OFDM 목표신호와 목표신호의 점유 스펙트럼 내에 존재하는 CW 재밍신호, 그리고 목표신호의 점유 스펙

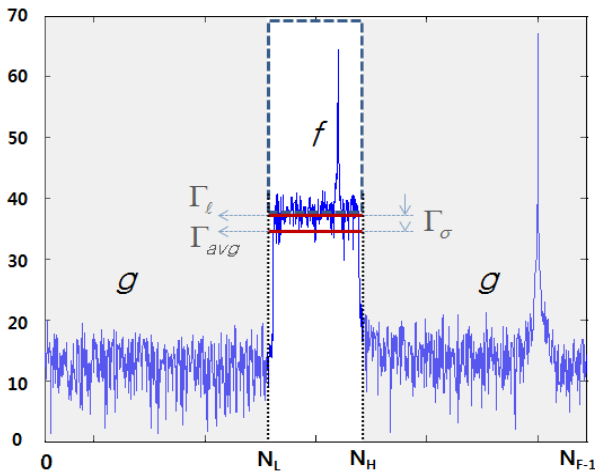


그림 2. 수신신호의 스펙트럼 분포  
Fig. 2. A spectral distribution of received signal.

트럼 외부에 존재하는 CW 재밍신호가 합쳐진 신호가 배열안테나에 인가되었을 때, 디지털 영역에서 FFT한 결과의 예를 그림 2에 나타내었다. 이때, 스펙트럼 분포를 나타내기 위해 사용된 샘플링 주파수는 24.5 MHz이며, FFT에 사용된 샘플 수  $N_F$ 는 1,024개이다.

### III. 제안기법 및 비용함수의 성능분석

본 장에서는 모의분석을 통한 제안된 기법 및 비용함수를 적용한 적응알고리즘의 성능에 대해 고찰하도록 한다. 성능분석에 사용된 배열안테나 구조는 12×12 평면배열안테나이다. 앞서 II장의 식 (1)로 정의되는 비용함수의 구성상 적대적인 재밍신호가 매우 강하게 유입되는 경우, 최대위상 변화범위를 제한하지 않을 경우, 적응알고리즘 동작 초기에 사용되는 PSO 알고리즘은 목표신호의 수신전력 변화보다 재밍신호의 수신전력 변화에 민감하게 반응하여 목표신호 방향의 주빔 이득이 필요 이상으로 감소할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 적응알고리즘의 초기 단계에 사용되는 PSO 알고리즘에는 최대위상 변화범위를  $\pm 80^\circ$ 로 제한을 두고, 그 이후의 동작 단계인 gradient-based 섭동 알고리즘에는 최대위상 조절범위에 대한 제한을 두지 않았다. 이때 사용된 PSO 알고리즘의 파라미터들은 연구과정중 수행된 모의분석 결과들을 토대로 신뢰할 수 있는 특정 값을 도출하였으며, 이에 따라 입자개수는 20개, 반복계산은 3회로 설정하였다. PSO 알고리즘 구동 후 gradient-based 섭동 알고리즘으로 변환하여 안정적인 면에서도 시간적으로 변화하는 간섭환경에 대처할 수 있도록 최소제어위상단위인 섭동의 크기  $\delta=5.625^\circ$ 로 설정하였다.

지금부터는 본 논문에서 제안하는 배열안테나 출력신호의 스펙트럼 분포를 사용하는 비용함수의 타당성을 검증하기 위해 배열안테나의 전체 수신전력을 최소화하도록 비용함수를 설정하는 기존방식과 비교하고자 한다. 특히, I장에서 설명한 바와 같이 목표신호의 주빔 영역으로 재밍신호가 입사되는 경우, 전체 수신전력을 최소화하는 기존방식에서 주빔 왜곡 현상이 두드러지게 발생하므로 목표신호의 주빔 영역으로 재밍신호가 입사되는 경우로 국한하여 비교 분석을 수행한다. 모의분석을 위해 사용된

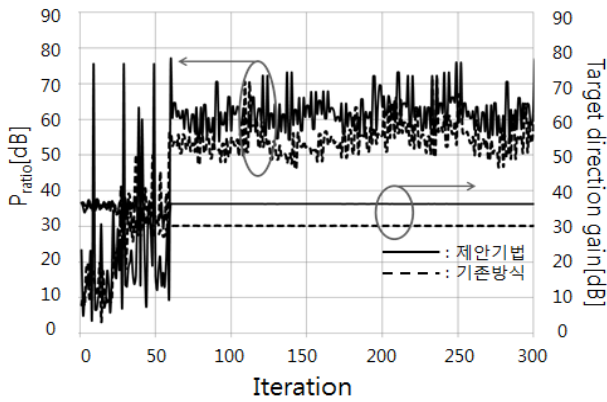


그림 3. 스펙트럼이 겹치지 않는 경우  $P_{ratio}(\theta_0=90^\circ, \phi_0=90^\circ, \theta_i=84^\circ, \phi_i=84^\circ)$   
 Fig. 3.  $P_{ratio}$  if the spectrum does not overlap( $\theta_0=90^\circ, \phi_0=90^\circ, \theta_i=84^\circ, \phi_i=84^\circ$ ).

목표신호는 앞서 그림 2와의 연계성을 고려하여, 5 kHz 간격의 부반송파 256개로 이루어진 5 MHz 대역폭의 OFDM 신호를 사용하였고, 재밍신호는 CW 신호를 인가하였다. 또한, 그림 2에서 설명한 바와 같이 제안된 비용함수의 평가에 필요한 FFT를 위해 24.5 MHz의 샘플링 주파수에서 1,024개 샘플이 사용되었다. 목표신호와 재밍신호의 스펙트럼 분포에 따른 모의분석 수행을 위해 각 신호의 스펙트럼이 겹칠 때와 겹치지 않을 때로 구분하여 분석하였다.

그림 3은 CW 재밍신호가 목표신호의 점유대역 외에 존재하여 서로 겹치지 않는 경우에 대한 모의분석 결과이다. 이때, 목표신호의 주빔 방향은 그림 1의 broadside ( $\theta_0=90^\circ, \phi_0=90^\circ$ )이고, 재밍신호가 목표신호의 주빔 영역에 해당하는  $\theta_i=84^\circ, \phi_i=84^\circ$ 로부터 입사되는 경우이다. 재밍신호로 사용된 CW 신호의 중심주파수는 목표신호의 중심주파수로부터 10 MHz 이격되어 제안된 비용함수의 분자에 식 (5)로 주어지는 함수  $g$ 를 사용한 경우이다.

제안하는 비용함수의 타당성 검증을 위해 기존의 최종 수신전력을 최소화하는 비용함수를 사용한 경우(점선)와 비교 도시하였다. 이때, 왼쪽 세로축의  $P_{ratio}$ 는 1,024개 샘플마다 측정되는 수신전력을 최소화하는 방향으로 알고리즘을 구동하여 도출된 위상변이기 값으로부터 계산된 패턴함수에서 목표신호의 주빔 방향 안테나 이득 대비

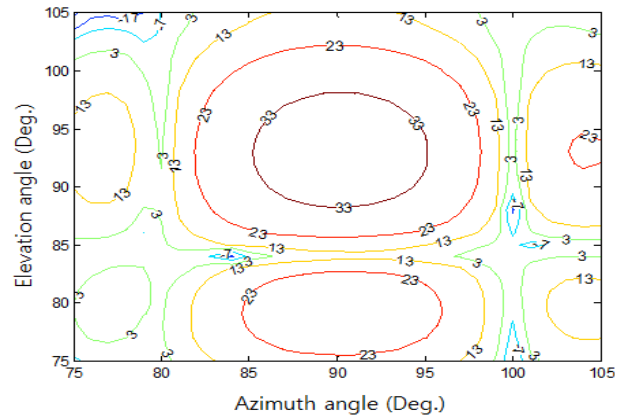


그림 4. 스펙트럼이 겹치지 않는 경우 적응빔 패턴( $\theta_0=90^\circ, \phi_0=90^\circ, \theta_i=84^\circ, \phi_i=84^\circ$ )  
 Fig. 4. Adaptive beam pattern if the spectrum does not overlap( $\theta_0=90^\circ, \phi_0=90^\circ, \theta_i=84^\circ, \phi_i=84^\circ$ ).

재밍신호 방향 안테나 이득비를 의미하며, 오른쪽 세로축의 target direction gain은 각각의 비용함수에 의한 목표신호 방향의 주빔 이득을 의미한다. 그림 3에서 보듯이,  $P_{ratio}$ 는 평균 60 dB 정도의 값을 가지며, target direction gain은 대략 6 dB 정도로 제안한 알고리즘 구동을 통한 주빔 왜곡 현상이 현저히 작게 나타남을 확인하였다. 또한, 초기 PSO 알고리즘의 구동이 끝난 후 gradient-based 알고리즘의 구동상태에서 목표신호 방향의 주빔 이득과 널링 성능의 변화가 거의 없음을 볼 수 있다. 이것은 PSO 알고리즘의 수렴속도가 매우 빠르며, 재밍신호나 간섭신호 상황에서 초기 대응 알고리즘으로 적절하다는 것을 의미한다.

그림 4는 보다 입체적인 널패턴 형성결과를 나타내기 위해 그림 3의 모의분석에서 도출된 적응 위상값을 적용한 적응빔 패턴을 도시하였으며, 보는 바와 같이 재밍신호 인가 방향 ( $\theta_i=84^\circ, \phi_i=84^\circ$ )으로 널(null)이 형성됨을 확인할 수 있다.

그림 5는 제안된 비용함수를 적용한 적응알고리즘을 통해 그림 4의 적응빔 패턴을 형성할 때 도출된 제어위상 분포를 도시하였다. PSO 알고리즘의 구동시  $\pm 80^\circ$ 로 제한하였던 최대위상 변화범위가 gradient-based 섭동 알고리즘으로의 변환이후 240회의 반복계산이 더 진행되었음에도 불구하고 대체적으로 유지되고 있음을 알 수 있다.

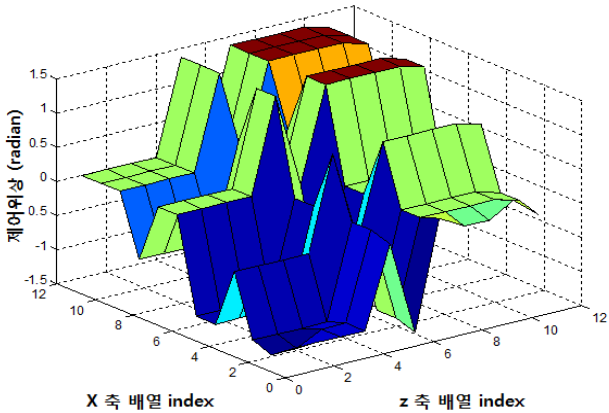


그림 5. 그림 4의 적응빔패턴을 형성하기 위한 제어위상 분포( $\theta_0=90^\circ, \phi_0=90^\circ, \theta_i=84^\circ, \phi_i=84^\circ$ )

Fig. 5. Phase distribution for the adaptive beam pattern of Fig. 4( $\theta_0=90^\circ, \phi_0=90^\circ, \theta_i=84^\circ, \phi_i=84^\circ$ ).

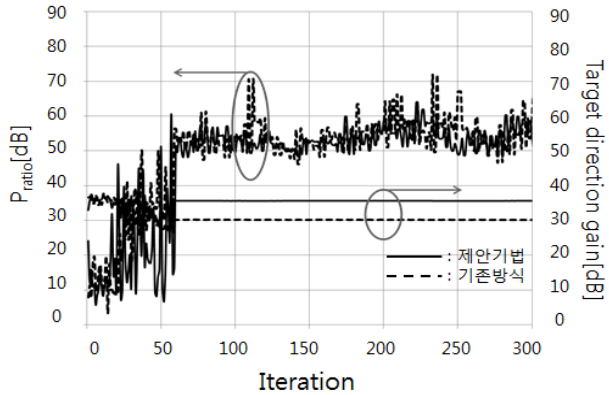


그림 6. 스펙트럼이 겹치는 경우  $P_{ratio}(\theta_0=90^\circ, \phi_0=90^\circ, \theta_i=84^\circ, \phi_i=84^\circ)$

Fig. 6.  $P_{ratio}$  if the spectrum overlap( $\theta_0=90^\circ, \phi_0=90^\circ, \theta_i=84^\circ, \phi_i=84^\circ$ ).

그림 6은 재밍신호가 목표신호의 점유대역내 존재하는 경우에 대한  $P_{ratio}$  및 비용함수별 목표신호 방향의 주빔 이득 차에 대한 모의분석 결과이다. 재밍신호로 사용된 CW 신호의 중심주파수는 목표신호의 중심주파수와 동일한 경우이며, 이때 사용된 비용함수의 분자는 식 (4)로 주어지는 함수  $f$ 를 사용하였다.

그림 6에서 보는 바와 같이,  $P_{ratio}$  평균 값은 스펙트럼이 겹치지 않는 경우(그림 3)에 비해 다소 작은 평균 55 dB 정도의  $P_{ratio}$ 를 가지는 것을 확인할 수 있다. 이는 목표

신호와 재밍신호의 스펙트럼이 겹치지 않는 경우, 각각의 신호전력이 스펙트럼 차원에서 명확하게 분리되어 정확한 비용함수의 계산이 이루어지는 반면, 두 신호의 스펙트럼이 겹치는 경우에는 재밍신호에 대한 억압이 일정수준 이상이 되면 목표신호와의 상대적인 위상차에 따라 발생하는 스펙트럼 fluctuation에 의하여 비용함수의 정확성이 떨어지기 때문이다. 그러나 제안된 비용함수와 수신전력을 최소화하는 비용함수에 의한 목표신호 방향의 주빔 이득 차는 약 6 dB로 스펙트럼이 겹치지 않는 경우와 동일함을 확인하였다.

그림 7은 주빔신호와 재밍신호의 스펙트럼이 겹치는 경우에 대한 그림 6의 모의분석에서 도출된 적응 위상값을 적용한 적응빔 패턴을 도시하였으며, 재밍신호 인가 방향 ( $\theta_i=84^\circ, \phi_i=84^\circ$ )으로 널(null)이 형성됨을 확인할 수 있다. 그림 8에는 그림 7의 적응빔을 형성하기 위한  $12 \times 12$  평면배열안테나의 제어위상분포를 나타내었다.

그림 9는 두 개의 재밍신호가 목표신호의 점유대역 내외에 각각 존재하는 경우에 대한 널패턴 합성 결과이다. 이때 1<sup>st</sup> 재밍신호는 ( $\theta_{i1}=84^\circ, \phi_{i1}=84^\circ$ )로 목표신호의 주빔 영역으로 입사되며, 목표신호 중심주파수에서 1 MHz 이격시켜 목표신호의 스펙트럼과 겹치는 경우에 해당되며, 2<sup>nd</sup> 재밍신호는 ( $\theta_{i2}=100^\circ, \phi_{i2}=96^\circ$ )로 입사되며, 목표신호의 중심주파수에서 10 MHz 이격시켜 목표신호의 스펙트럼과 겹치지 않는 경우

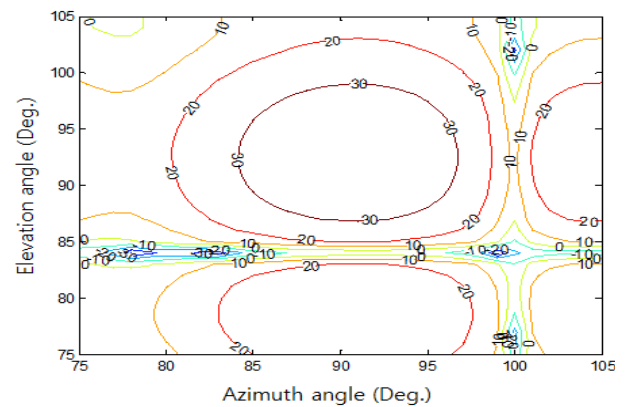


그림 7. 스펙트럼이 겹치는 경우 적응빔 패턴( $\theta_0=90^\circ, \phi_0=90^\circ, \theta_i=84^\circ, \phi_i=84^\circ$ )

Fig. 7. Adaptive beam pattern if the spectrum overlap( $\theta_0=90^\circ, \phi_0=90^\circ, \theta_i=84^\circ, \phi_i=84^\circ$ ).



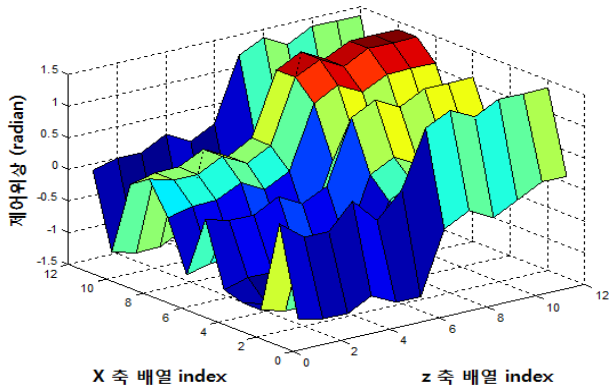


그림 8. 그림 7의 적응빔패턴을 형성하기 위한 제어위상 분포( $\theta_0=90^\circ, \phi_0=90^\circ, \theta_i=84^\circ, \phi_i=84^\circ$ )  
 Fig. 8. Phase distribution for the adaptive beam pattern of Fig. 7( $\theta_0=90^\circ, \phi_0=90^\circ, \theta_i=84^\circ, \phi_i=84^\circ$ ).

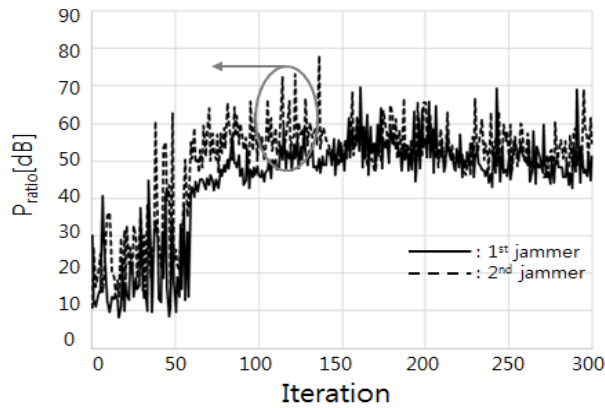


그림 9. 두 개의 재밍신호가 스펙트럼 내부와 외부로 동시에 인가되는 경우의  $P_{ratio}$  ( $\theta_{i1}=84^\circ, \phi_{i1}=84^\circ, \theta_{i2}=100^\circ, \phi_{i2}=96^\circ$ )  
 Fig. 9.  $P_{ratio}$  when two jamming signals are incident at the same time inside and outside of the spectrum ( $\theta_{i1}=84^\circ, \phi_{i1}=84^\circ, \theta_{i2}=100^\circ, \phi_{i2}=96^\circ$ ).

펙트럼과 겹치지 않는 경우에 해당된다. 이때 사용된 비용함수의 분자는 식 (4), (5)를 통해 주어지는 함수  $f$ 와  $g$ 를 합한 값을 사용하였다.

이때 수렴 속도는 단일재밍신호 인가 시와 비슷한 결과를 보이고 있으며, 이는 알고리즘의 초기 대응에 사용된 PSO가 다중 재밍신호가 인가되더라도 효율적으로 동작하는 것을 재확인한 결과이며, 수렴후의  $P_{ratio}$  값의 평균이 단일재밍신호의 경우에 비해 5~10 dB 정도 떨어지는

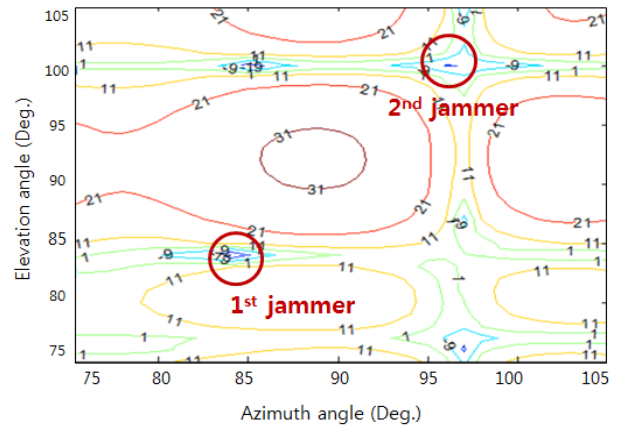


그림 10. 두 개의 재밍신호가 스펙트럼 내부와 외부로 동시에 인가되는 경우의 적응빔 패턴( $\theta_{i1}=84^\circ, \phi_{i1}=84^\circ, \theta_{i2}=100^\circ, \phi_{i2}=96^\circ$ )  
 Fig. 10. Adaptive beam pattern when two jamming signals are incident at the same time inside and outside of the spectrum( $\theta_{i1}=84^\circ, \phi_{i1}=84^\circ, \theta_{i2}=100^\circ, \phi_{i2}=96^\circ$ ).

이유는 비용함수의 구성상  $f$ 와  $g$ 의 값을 평균적으로 낮아지도록 만드는 perturbation의 한계에 의한 것이다. 다시 말해, gradient-based 섭동 알고리즘에 의해  $f$ 와  $g$ 가 모두 작아지는 확률은 낮고,  $f$  또는  $g$ 중에 하나만 작아지는 확률이 높아 대부분의 iteration 결과가 버려지기 때문이다.

그림 10은 두 개의 재밍신호가 인가될 경우에 대한 적응빔 패턴으로 재밍신호 각각의 방향으로 널(null)이 형성됨을 확인할 수 있다.

지금부터는 본 논문에서 제안하는 비용함수가 적용된 적응형 널링 알고리즘이 재밍신호의 입사방향이 시간적으로 변하는 환경에서 얼마만큼의 입사방향 변화속도에 대처할 수 있는지 알아보도록 한다.

이를 위해 재밍신호의 입사방향이  $\theta_i=84^\circ, \phi_i=84^\circ$ 에서 시작하여 그림 1의 z축과 x축 사이를 등간격으로 유지하면서 배열안테나의 broadside로부터 각속도 40°/초로 재밍신호의 입사방향이 변하는 환경에 대한 모의분석을 수행하였다.

본 논문에서 제안하는 수신신호의 스펙트럼 분포에 따른 성능분석을 위해 재밍신호와 목표신호의 스펙트럼이 겹치지 않는 경우와 겹치는 경우에 따른 모의분석 결과

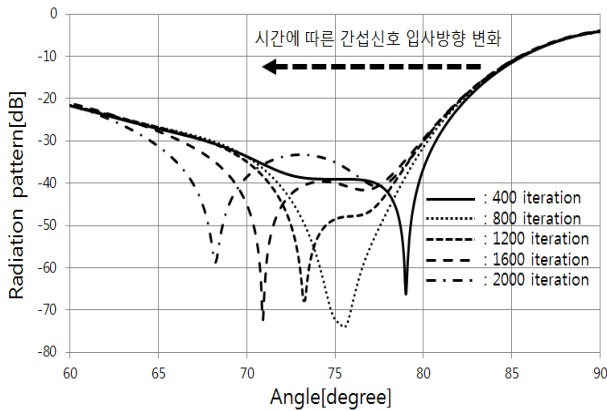


그림 11. 스펙트럼이 겹치지 않는 경우, 방사패턴의 변화 ( $\theta_0=90^\circ$ ,  $\phi_0=90^\circ$ ,  $\delta=5.625^\circ$ )

Fig. 11. Radiation pattern change if the spectrum does not overlap ( $\theta_0=90^\circ$ ,  $\phi_0=90^\circ$ ,  $\delta=5.625^\circ$ ).

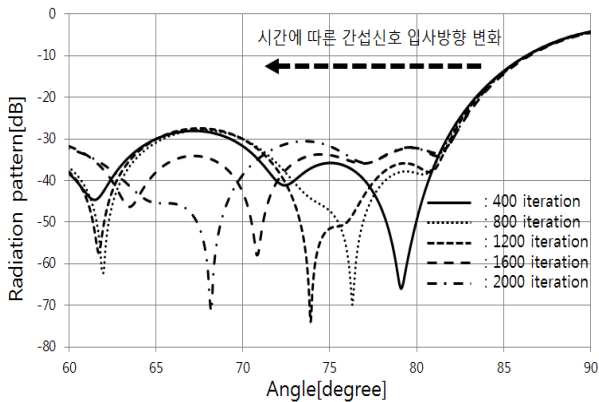


그림 12. 스펙트럼이 겹치는 경우, 방사패턴의 변화( $\theta_0=90^\circ$ ,  $\phi_0=90^\circ$ ,  $\delta=5.625^\circ$ )

Fig. 12. Radiation pattern change if the spectrum overlap ( $\theta_0=90^\circ$ ,  $\phi_0=90^\circ$ ,  $\delta=5.625^\circ$ ).

를 그림 11과 그림 12에 각각 나타내었다. 이때, 빔패턴은 평면배열안테나가 바라보는 반구(half sphere)에서 재밍 신호가 움직이는 궤적을 포함하는 theta-cut에 해당하며, 400~2,000번의 반복계산 범위에서 매 400번의 반복계산마다 도출된 제어위상값으로부터 계산된 결과이다. 이동형 재밍환경에서의 보다 안정적인 스펙트럼의 전력 계산을 위하여 앞에서와 달리 두 번의 FFT로부터 평균값을 취하여 비용함수에 반영하였다. 이때, gradient-based 섭동알고리즘의 경우, 최소 섭동량을 양의 방향과 음의 방향으로

각각 구한 것을 1회의 iteration 값으로 취하였으며, 이로 인해 실제 샘플수는 1,024개의 4배인 4,096개에 해당되게 된다. 재밍신호의 이동에 따라 일정한 반복계산마다 패턴 null의 위치가 일정한 간격으로 변하는 것을 관찰할 수 있으며, 제안된 비용함수와 알고리즘이 이동형 재밍 환경에서도 적응적으로 동작됨을 확인할 수 있다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 단일포트시스템으로 설계된 위상배열 안테나에서 수신신호의 스펙트럼 분포로부터 목표신호와 재밍신호를 분리하는 기법 및 비용함수를 제안하였다. 제안된 기법 및 비용함수를 사용할 경우, 목표신호의 수신전력 감소와 재밍신호의 수신전력이 최소가 되도록 위상을 조정할 수 있으며, 이를 통해 주빔신호의 왜곡 현상을 줄일 수 있음을 확인하였다.

기존 단일포트시스템에서 주로 사용되던 비용함수는 목표신호와 재밍신호를 분리하지 않고, 배열안테나 수신신호의 최종 출력신호 세기를 최소화하는 방법을 사용함으로써 주빔 왜곡 현상이 크게 발생하는 문제가 있으나, 제안한 기법 및 비용함수를 적용한 적응알고리즘을 사용할 경우 이러한 문제점을 극복할 수 있다.

제한한 비용함수를 적용한 적응알고리즘은 PSO 알고리즘과 gradient-based 섭동 알고리즘을 혼합하여 시간의 변화에 따른 재밍신호의 입사방향이 변하는 상황에서도 빠른 수렴과 안정적인 널링 성능을 가진다.

#### References

- [1] R. L. Haupt, "Phase-only adaptive nulling with genetic algorithms", *IEEE Transactions on Antennas Propagation*, vol. 45, no. 5, pp. 1009-1015, Jun. 1997.
- [2] Y. C. Chung, R. L. Haupt, "Amplitude and phase adaptive nulling with a genetic algorithm", *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, vol. 14, pp. 631-649, Jan. 2000.
- [3] Y. J. Lee, J. W. Seo, J. K. Ha, and D. C. Park, "Null steering of linear phased array antenna using genetic algorithm", *Asia Pacific Microwave Conference 2009*,



APMC 2009, pp. 2726-2729, Dec. 2009.

[4] 이용준, 서종우, 박동철, "부호 교차 위상 개념이 적용된 유전 알고리즘을 이용한 널링 안테나 연구", 한국전자과학회 논문지, 21(6), pp. 690-697, 2010년 6월.

[5] M. M. Khodier, C. G. Christodoulou, "Linear array geometry synthesis with minimum sidelobe level and null control using particle swarm optimization", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 8, no. 53, pp. 2674-2679, Aug. 2005.

[6] 서종우, 권오혁, 박동철, 전중훈, "PSO 알고리즘을 적용한 평면형 위상배열 안테나의 널 패턴 합성", 한국군사과학기술학회 종합학술대회, pp. 1059-1060, 2015년 6월.

[7] B. D. van Veen, R. A. Roberts, "Partially adaptive beam former design via output power minimization", *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, vol. 35, no. 11, pp. 1524-1532, Nov. 1987.

[8] M. Fakharzadeh, S. Safavi-Naeini, S. H. Jamali, and P. Mousavi, "Zero-knowledge beamforming of phased array antennas based on simultaneous perturbation gradient approximation", *IEEE Int. Symp. Antennas Propagat., Albuquerque, NM*, pp. 537-540, Jul. 2006.

[9] 서종우, 박동철, "이동형 재밍환경에서 널 합성을 위한 적응형 널링 알고리즘", 한국전자과학회논문지, 27(8), pp. 676-683, 2016년 8월.

서 종 우



2000년 2월: 충남대학교 전파공학과 (공학사)  
 2002년 2월: 충남대학교 전파공학과 (공학석사)  
 2002년 1월~현재: 국방과학연구소 선임 연구원  
 2013년 3월~현재: 충남대학교 전파정보

통신공학과 전파공학전공 박사과정

[주 관심분야] 널링 안테나, 패턴합성 알고리즘, 컨포멀 안테나

박 동 철



1974년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학사)  
 1976년 2월: 한국과학기술원 전기전자공학과 (공학석사)  
 1984년 12월: Univ. of California, Santa Barbara (공학박사)  
 1977년~1978년: Ruhr University, Bochum, Germany 방문교수

1994년~1998년: IEEE MTT Korea Chapter Chairman

1998년~2001년: IEEE EMC Korea Chapter Chairman

2000년~2001년: 한국전자과학회 회장

2005년~2007년: 대덕 Wireless 포럼 회장

1976년~현재: 충남대학교 전파공학과 교수

[주 관심분야] Microwave and Millimeterwave Passive Components, Antennas, EMI/EMC