

## 완전 디지털 능동배열 레이다의 적응형 부엽제거 알고리즘에 관한 연구

### Analysis of Adaptive Side-Lobe Canceller Algorithm for Fully Digital Active Array Radar

양우용 · 박민규 · 홍성원\* · 김찬홍\*

Woo-Yong Yang · Min-Kyu Park · Sung-Won Hong\* · Chan-Hong Kim\*

#### 요 약

레이다는 강한 재밍신호를 제거하기 위해 부엽제거 알고리즘을 이용하여 상대적으로 약한 표적신호를 획득한다. 본 논문에서는 완전 디지털 능동배열 레이다에서 적용 가능한 새로운 적응형 부엽제거 알고리즘을 제안한다. 먼저 부엽제거 빔 신호를 이용하여 공분산 행렬을 구한다. 그리고 부엽제거 빔 신호와 주빔 신호와의 상관행렬을 산출한 후, 적응형 부엽제거 빔 형성 계수를 획득한다. 그 후 수신되는 주빔 신호와의 연산을 통해 최종적으로 재밍신호가 제거된 표적신호를 구한다. 시뮬레이션 신호로의 적용 결과를 통해 제안된 알고리즘이 부엽제거에 효과적임을 확인하였고, 실제 레이다에 적용하기 위한 여러 고려사항들을 분석하여 체계 적용성을 높였다.

#### Abstract

To eliminate strong jamming signals, a radar acquires a relatively weak target signal by using a side-lobe canceller (SLC) algorithm. This paper presents a novel adaptive SLC algorithm that is applicable to a fully digital active array radar. First, a covariance matrix is obtained from the SLC beam. Then, an adaptive SLC coefficient is extracted after calculating the correlation matrix between the main beam signal and the SLC beam signal. Finally, the target signal is estimated and the jamming signal is removed through the operation with the main beam signal. The application results from simulated radar signals demonstrated that the proposed algorithm is effective in an SLC system. Moreover, we analyzed various considerations and improved systematic usability.

Key words: Adaptive SLC Coefficient, Correlation Matrix, Covariance Matrix, Fully Digital Active Array Radar, Jamming Signal, Side-Lobe Canceller(SLC)

#### I. 서 론

레이다(radar)는 무선탐지와 거리 측정(radio detecting and ranging)의 약어로, 클러터 및 재밍신호와 같은 원하

지 않는 신호를 제거하고, 상대적으로 크기가 작은 표적에서 산란되는 전자파를 수신하여 정보를 획득하는 센서이다. 레이다는 원활한 표적 정보 획득을 위해 능동위상배열 안테나의 지향성 특성 및 시공간 처리 개념을 이용

한화시스템(Hanwha Systems Co., Ltd.)

\*국방과학연구소(Agency for Defense Development, ADD)

· Manuscript received February 28, 2018 ; Revised April 27, 2018 ; Accepted May 11, 2018. (ID No. 20180228-028)

· Corresponding Author: Woo-Yong Yang (e-mail: w.y.yang@hanwha.com)

하여 부엽차단 및 부엽제거, 적응형 배열 기술을 개발하고 있다. 특히 강한 재밍신호 제거에 효과적인 부엽제거 알고리즘은 레이더의 주안테나와 보조안테나를 이용하여 주안테나의 부엽으로 인가되는 재밍신호와 똑같은 신호를 보조안테나를 통하여 획득하고, 이를 이용하여 재밍 방향에 빔 패턴의 영점이 형성될 수 있도록 안테나의 수신 패턴을 변경한다. 초기의 부엽제거 알고리즘은 가중치의 합이 가능한 부엽제거장치의 출력에서 평균전력을 최소화시킬 수 있도록 하는 **Gradient** 알고리즘을 적용하여 구현하기 쉽다는 장점이 있지만, 제거하기 위한 재밍신호의 개수에 따라 부엽제거 안테나가 추가로 제작이 필요하다는 단점을 가지고 있다<sup>[1][2]</sup>. 적응형 배열기술을 이용한 부엽제거 방식은 **LCMV(Linear Constrained Minimum Variance)**같은 알고리즘을 이용하여 선형의 제한조건을 만족시키면서 출력의 분산 또는 파워를 최소화하는 빔 형성계수를 계산하여 주파수 축에서 영점을 형성하는 방식을 적용한다. 이 방식은 간섭환경에서 적응빔 형성을 통해 재밍의 개수를 많이 제거할 수 있지만, 배열소자의 개수가 늘어날수록 빔조향 계수의 계산시간 및 연산량이 커져 실시간 적용이 어렵다<sup>[3]~[5]</sup>.

이에 본 논문에서는 이러한 단점들을 극복하기 위해서 완전 디지털 능동위상배열 레이더<sup>[6]</sup>에서 적용 가능한 적응형 부엽제거 알고리즘 방식을 제안한다. 완전 디지털 능동위상배열 레이더는 탐색자원 절약을 위한 디지털 다중빔 형성이 가능하며, 소자 단위의 빔 형성으로 별도의 부엽제거 안테나 소자가 필요 없이 부엽제거 빔 형성이 가능하다. 디지털 신호단에서 형성된 부엽제거 신호만을 이용하여 공분산 행렬과, 표적으로부터 생성되는 주빔과 부엽제거 빔과의 상관행렬로부터, 적응형 부엽제거 빔 형성 계수를 구한다. 구한 적응형 부엽제거 빔 형성 계수는 수신되는 재밍신호와 곱연산 후, 최종적으로 수신되는 다중빔 신호와의 차를 통해 최종 재밍신호가 제거된 최종 빔 신호가 추출된다. 그리고 제안한 적응형 부엽제거 알고리즘을 이용하여 성능을 검증하고, 갖가지 경우에 따른 부엽제거 성능을 확인한다. II절에서는 완전 디지털 능동위상배열 레이더 개요, III절에서는 적응형 부엽제거 알고리즘을 다룬다. IV절에서는 시뮬레이션 신호를 이용하여 제안된 알고리즘의 유효성을 검증하고, 여러 경우에 따른

부엽제거 알고리즘 성능을 분석한다. V절에서는 본 논문의 결론을 맺는다.

## II. 완전 디지털 능동배열 레이더 개요

### 2-1 완전 디지털 능동배열 레이더 구성

위상배열 레이더는 여러 개의 소자를 배열하고 서로 다른 위상을 갖는 전파를 송수신하여 전파의 방향을 집중시켜 표적의 정보를 획득한다. 완전 디지털 능동배열 레이더는 완전 디지털 빔 형성 방식을 이용하여 기존의 아날로그 방식의 변위기를 이용한 아날로그 빔 형성 방식, 디지털 변위기를 이용하고 부배열 개념을 적용한 디지털 빔 형성 방식보다 많은 장점을 가지고 있다. 첫째, 완전 디지털 능동배열 레이더는 부배열 개념의 능동배열 레이더보다 감도가 크게 개선된다. 둘째, 여러 개의 아날로그 소자 신호를 합쳐서 디지털 변환하는 부배열 방식이 아닌, 소자 단위로 디지털 다중빔 빔 형성이 가능하기 때문에 다중빔 성능의 열화 없이 다수의 다중빔을 만들 수 있다. 이러한 완전 디지털 능동배열 레이더는 각 소자마다 병렬적으로 동시에 디지털 신호로 변환되기 때문에 더 많은 시간이 소요되지 않으며, 최근 직접변환 칩의 발전으로 인해 실시간으로 구현이 가능하다는 것도 큰 장점이다. 완전 디지털 능동배열 레이더의 빔 형성 구조는 그림 1과 같다.

### 2-2 디지털 다중빔 형성

일반적인 능동배열 레이더의 각 배열소자로 들어오는 신호는 다음과 같이 표현할 수 있다<sup>[7]</sup>.

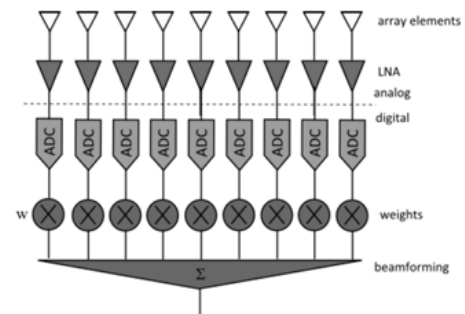


그림 1. 완전 디지털 능동배열 레이더 구조

Fig. 1. Structure of fully digital active array radar.

$$x(m) = s(m)a(u, v) + n(m) \quad (1)$$

$m$ 은 전체 거리셀 샘플 수이며,  $s(m)$ 은  $m$ 번째 거리 샘플에서 조향한 각도로부터 수신되는 신호의 복소포락(complex envelope) 값이다.  $n(m)$ 은 각 수신채널의 복소 백색잡음이며,  $a(u, v)$ 는 조향 각도로 산출되는 빔조향 벡터(steering vector)이다.

이와 달리 완전 디지털 능동배열 레이더는 그림 2와 같이 하나의 디지털송수신 블록의 빔 형성 모듈에서  $k$ 개의 다중빔 개수에 따른 빔조향 매트릭스 연산을 통해, 각 블록마다 다중빔을 형성할 수 있으며, 하나의 디지털 송수신 블록의 빔 형성 출력 신호는  $y_k$ 로 표현할 수 있다.  $N$ 개의 디지털 송수신블록으로부터 수신된 최종 다중빔 신호  $z_k$ 는 다음과 같다.

$$z_k = \sum_{n=1}^N y_k^n = \sum_{n=1}^N a^H(u_k, v_k) X^n \quad (2)$$

$M$ 은 디지털 송수신 모듈 수이며,  $a^H(u_k, v_k)$ 는 수신다중빔 빔 형성 허미션(hermition) 행렬 신호이며,  $X^n$ 은  $n$ 번째 디지털 송수신블록으로 수신되는 신호이다. 이와 같이 완전 디지털 능동배열 레이더는 디지털 송수신 블록의 빔 형성 모듈에서 디지털 단에서의 다중빔 형성이 가능하기 때문에, 부배열에서 이용하는 다중빔의 성능보다 이득 및 부엽(side lobe) 레벨의 열화 없이 이용할 수 있다는 큰 장점이 있다.

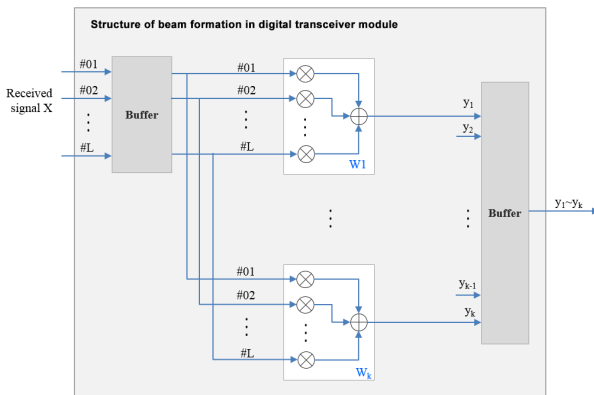


그림 2. 디지털송수신 모듈의 빔 형성 구조  
Fig. 2. Structure of beam formation in digital transceiver module.

### III. 적응형 부엽제거 알고리즘

본 절에서는 완전 디지털 능동위상배열 레이더에 적용 가능한 적응형 부엽제거 알고리즘을 소개한다. 각 디지털 송수신 블록은 다수의 다중빔 형성이 가능하며, 그 중 일부를 부엽제거 수신빔으로 할당하여, 빔 형성 과정에서 단순 행렬 연산만으로도 재밍신호를 제거할 수 있다. 완전 디지털 능동위상배열 레이더의 적응형 부엽제거 알고리즘 구조는 그림 3과 같고, 크게 4단계로 구성되어 있다.

적응형 부엽제거 알고리즘의 핵심은 최종 출력 신호인  $s_k$  신호의 평균값을 최소로 만들도록 적응형 부엽제거 빔 형성 계수를 결정하는 것이다.

$$\min E\{s_k\} = \min E\{|z_k - W_k^H X|\} \quad (3)$$

여기서  $z_k$ 는 다중빔 출력 신호이며,  $E\{\cdot\}$ 는 평균 연산자이다. 이 식의 최적화된 해는 다음과 같다.

$$W_k = E\{XX^H\}^{-1} \times E\{Xy\} = Q_{xx}^{-1} q_{xy} \quad (4)$$

즉, 최종 적응형 부엽제거 빔 형성 계수는 부엽제거 수신빔으로 획득한 신호들의 공분산 행렬과, 주빔과 부엽제거 수신빔의 상관행렬의 곱으로 구할 수 있다.

#### 3-1 부엽제거 수신빔을 이용한 공분산 행렬 계산(1단계)

1단계에서는 완전 디지털 능동배열 레이더는 리스닝 구간에서 획득한 부엽제거 수신빔을 이용하여 재밍신호

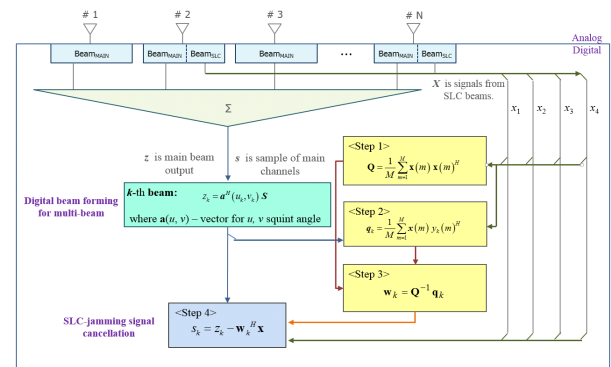


그림 3. 적응형 부엽제거 알고리즘 구조 및 단계  
Fig. 3. Structure and step of adaptive SLC algorithm.

의 공분산 행렬을 획득한다. 공분산 행렬의 MLE(Maximum Likelihood Estimation) 값은 다음 식과 같다<sup>[8],[9]</sup>.

$$Q_{xx} = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M X(m)X(m)^H \quad (5)$$

여기서  $M$ 은 부엽제거 수신빔으로 들어온 트레이닝(training) 데이터의 샘플 개수이며,  $M$ 개의 데이터 행렬 연산을 통해 재밍신호의 공분산 행렬을 획득할 수 있다.  $X(m)$ 은 행렬로서, 부엽제거 수신빔을 형성할 수 있는 디지털송수신 블록의 개수에 따라 결정된다. 예를 들어 4개의 재머 신호에 의한 영향을 제거하기 위해서는 4개의 디지털 송수신 블록의 부엽제거 수신빔을 이용한다<sup>[10]</sup>. 기존의 부배열 방식의 방법에서 부엽제거 알고리즘을 적용하는 방법은 모든 부배열의 개수에 따라 공분산을 계산해야 하며 연산량이 매우 크다는 단점이 있지만, 제안 방법은 재밍신호, 즉 부엽제거 수신빔에 대한 공분산 행렬을 계산하면 되므로 훨씬 효과적이다.

### 3-2 주빔과 부엽제거 수신빔을 이용한 상관행렬 계산(2단계)

2단계에서는 리스닝 구간에서 획득한 부엽제거 수신빔 신호와 레이더 송수신 과정을 통해 획득한 수신빔 신호를 이용하여 주 신호의 상관 행렬을 계산한다.

$$q_{xy} = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M X(m)y(m)^H \quad (6)$$

여기서  $M$ 은 트레이닝 데이터의 샘플개수이며, 주빔과 부엽제거 수신빔으로 들어온 신호를 비교하여 상관행렬을 계산한다. 완전 디지털 능동배열 레이더는 제거하고자 하는 재밍신호의 개수에 따라 부엽제거 빔을 무한정 조정할 수 있고, 수신빔 또한 운용개념에 따라 다수의 다중빔을 운용할 수 있다. 결국 상관행렬은 각각 독립적인 행렬연산을 통해 계산되므로 손쉽게 상관행렬을 구할 수 있다.

### 3-3 공분산 행렬과 상관행렬을 이용한 적응형 부엽제거 빔 형성 계수 계산(3단계)

1단계와 2단계 과정을 통해 부엽제거 수신빔의 공분산

행렬과 주빔과 부엽제거 수신빔의 상관행렬이 구해졌으면 다음의 식을 통해 최종적인 적응형 부엽제거 빔 형성 계수  $W_k$ 가 계산된다.

$$W_k = Q_{xx}^{-1} \cdot q_{xy} = Q^{-1} \cdot q_k \quad (7)$$

적응형 부엽제거 빔 형성 계수는 형성된 수신빔에 개수에 따라 그 개수가 결정된다. 그리고  $k$ 번째 적응형 부엽제거 빔 형성 계수는 부엽제거 수신빔으로 인해 산출된 공분산 행렬과  $k$ 번째 다중빔과 부엽제거 수신빔으로 산출된 상관행렬의 곱으로 최종 산출된다.

### 3-4 최종 다중 수신빔 계산(4단계)

4단계에서는 다음식과 같이 최종 다중 수신빔이 계산된다.

$$s_k = z_k - W_k^H X \quad (8)$$

2-2에서 계산된 다중수신빔 신호  $z_k$ 에 3단계에서 계산된 적응형 부엽제거 빔 형성 계수와 입력된 부엽제거 수신빔과의 곱 결과와의 차 연산을 통해 최종 다중 수신빔 신호를 산출한다.

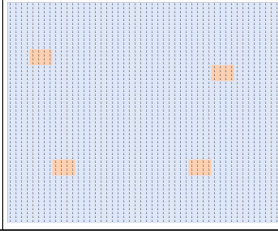
## IV. 알고리즘 적용 및 분석

### 4-1 시뮬레이션 및 최종 수신빔 정보추출

본 절에서는 제안된 적응형 부엽제거 알고리즘을 검증하기 위해 재밍 및 표적신호를 모사하여, 최종 수신빔으로부터 표적신호가 추출 가능한지 여부를 확인하였다. 표 1에는 표적 및 재머의 시뮬레이션 변수를 정리하였다.

완전 디지털 능동배열 레이더의 배열구조는 세로 56개, 가로 48개의 소자개수를 가지며, 이 중 16개 소자로 이루어진 디지털 송수신 블록 4부분을 통해 부엽제거 수신빔을 생성하였다. 레이더는 먼저 트레이닝(training) 구간에서 레이더 방사 없이 재밍신호를 수신하여 부엽제거 수신빔 데이터를 저장하여 공분산 행렬을 구하게 되고, 그 후 #51~#1000 샘플로 들어온 표적 신호와 재밍신호와의 상관행렬을 구한다. 그리고 최종적으로 들어온 수신신호에 적응형 부엽제거 빔 형성 계수와 연산된 재밍신호와의 차를 통해 최종 수신빔 신호를 구할 수 있다. 그림 4는 표

표 1. 표적, 재머 및 레이더 시뮬레이션 변수  
Table 1. Simulation parameters of the target, jammer and radar.

Section of target signal	#801~#805 sample
Incidence angle of target signal (theta, phi)	(15°, 0°)
Number of jammer	4
Section of jammer signal	#1~#1000 sample
Training section	#1~#50 sample
Incidence angle of jammer signal (theta, phi)	(15°, 20°), (-20°, 30°), (30°, 30°), (-25°, -30°)
JSR	23 dB
Structure of radar array	

1의 변수를 적용하여 적응형 부엽제거 알고리즘 적용 전/후의 시간축 신호 결과이다. 알고리즘 적용 전에는 재머 신호의 영향으로 보이지 않던 표적신호가, 적용 후에는

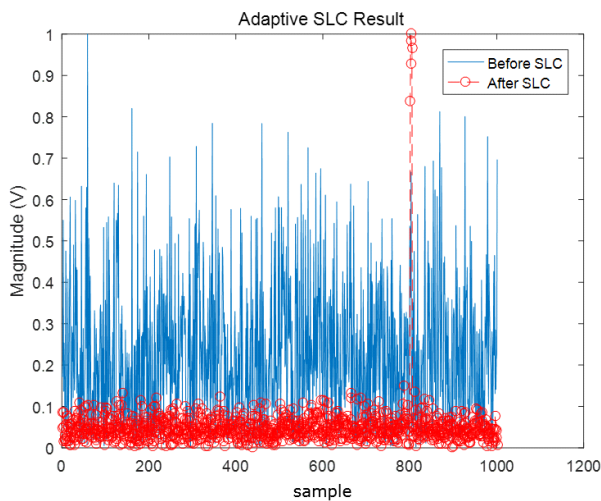


그림 4. 알고리즘 적용 전/후의 시간축 신호 결과(표 1 변수 적용)

Fig. 4. Result before/after processing with the proposed algorithm(when the variable in Table 1 are applied).

정확히 #801~#805 샘플에서 표적신호가 추출됨을 확인할 수 있다. 즉, 알고리즘 적용 전에는 표적신호와 표적신호보다 20배 큰 재머신호가 동시에 들어와 원하는 표적신호를 추출할 수 없지만, 알고리즘 적용 후에는 큰 재머신호가 들어오더라도, 적응형 SLC 계수 획득 및 재머신호 제거를 통해 표적이 효과적으로 추출됨을 알 수 있다.

#### 4-2 레이더 체계에 적용하기 위한 고려사항 분석

제안 알고리즘은 제거하고자하는 재머의 개수를 고려하여 부엽제거 수신빔의 개수를 결정한다. 즉, 부엽제거 수신빔의 개수를 결정한다는 것은, 부엽제거 수신빔을 만들 디지털 송수신 블록의 개수를 결정한다는 것이다. 4-1 알고리즘 검증단계에서는 4개의 디지털송수신 블록을 가정하였고, 4개의 재머신호를 모사하여 알고리즘이 효과적으로 동작함을 확인하였다. 4-2절에서는 추가적으로 표 1의 표적 및 재머 시뮬레이션 변수에 7.5402° 각도로 입사하는 재머신호를 모사하여 시뮬레이션을 수행해 보았다. 7.5402° 각도는 그림 5와 같이 재머신호가 2개의 디지털 송수신 블록에 동시에 입사하는 조건이다. 이때 알고리즘 적용 전 후 시간축 신호 결과(그림 6)를 보면 알 수 있듯이 제안 알고리즘 적용하여도 재머 신호를 정확히 제거하지 못해 표적의 신호가 정확히 탐지되지 않는 것을 알 수 있다. 즉, 디지털 송수신블록이 동일선상으로 겹쳐지는 방향으로 재머가 들어오는 경우, 4개의 부엽제거 수신빔으로는 4개의 재머를 제거할 수 없는 것이다. 이를 해

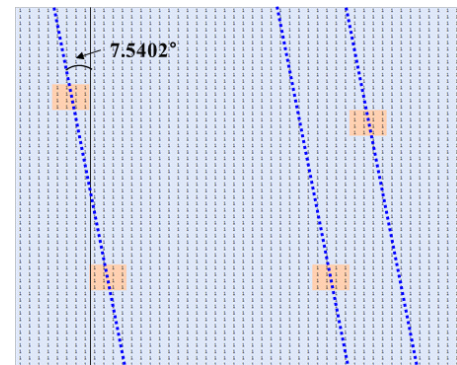


그림 5. 디지털송수신 블록에 동시 입사하는 재머 방향의 조건(예)

Fig. 5. Concurrent incident condition of jammer direction.

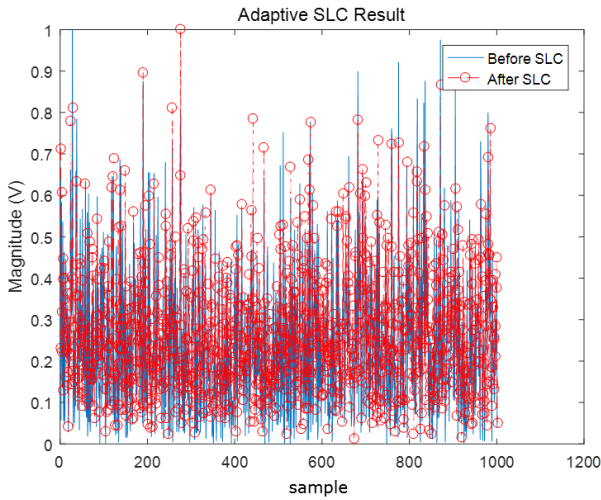


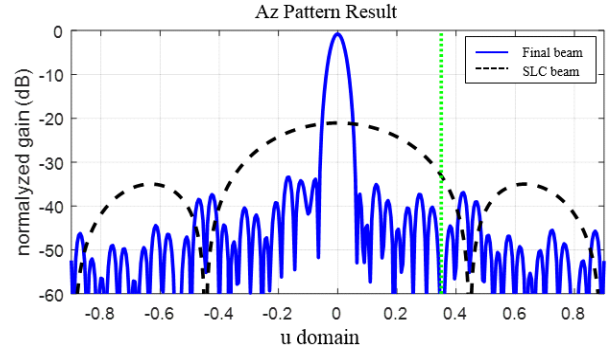
그림 6. 알고리즘 적용 전/후의 시간축 신호 결과(재머 입사각 7.5402°일 때)

Fig. 6. Result before/after processing with the proposed algorithm(when incident angle of jammer is 7.5402°).

결하기 위해서는 부엽제거 수신빔을 생성하는 디지털송수신 블록의 위치를 랜덤하게 변화하거나, 트레이닝 구간에서 부엽제거 수신빔으로부터 재머의 위치를 확인하여 재머 방향과 일치하지 않도록 디지털 송수신 블록의 위치를 재설정해야 한다.

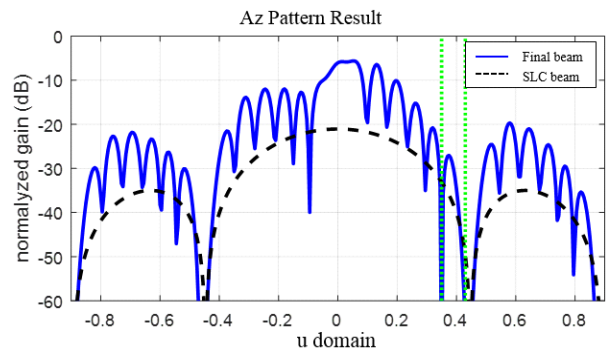
제안 알고리즘은 재머 신호가 수신방향에 따라 성능이 달라지는 특성이 있다. 그림 7은 임의의 디지털송수신 블록의 경우, 재머가 null 방향으로 들어오는 유무에 따라 형성된 최종 수신빔 패턴이다. 그림 7(a)는 재머가 부엽제거 수신빔의 null 방향이 아닌 곳으로 들어오는 경우로, 재머신호 방향으로 약 -140 dB 정도 영점을 형성하여 정확히 표적신호를 추출함을 확인하였다. 하지만 그림 7(b)는 재머 중 1개가 SLC 수신빔의 null 방향으로 들어오는 경우로, 이때에는 최종 수신빔의 주빔 방향 패턴이 일그러지면서, 표적신호를 추출하지 못하는 것을 확인하였다. 이 이유는 재머신호가 부엽제거 수신빔을 통해 들어온 재밍신호로 공분산 행렬을 구하는 과정에서, 재밍신호가 null 방향으로 들어오면서 정확히 재밍신호의 방향을 예측하지 못했기 때문이다.

이 문제는 부엽제거 수신빔 형성에 기여하는 디지털송수신블록의 크기를 줄이면서 빔폭을 늘려서 해결할 수



(a) 재머가 null 방향으로 안들어오는 경우

(a) Case when jammer does not enter in the null direction



(b) 재머가 null 방향으로 들어오는 경우

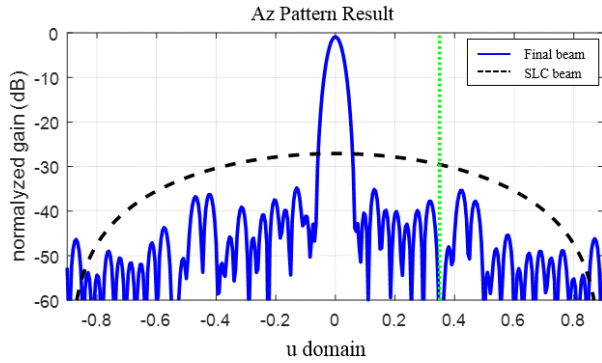
(b) Case when jammer enter in the null direction

그림 7. 기존 SLC 패턴과 최종 수신빔 패턴

Fig. 7. Original SLC pattern and final receive pattern.

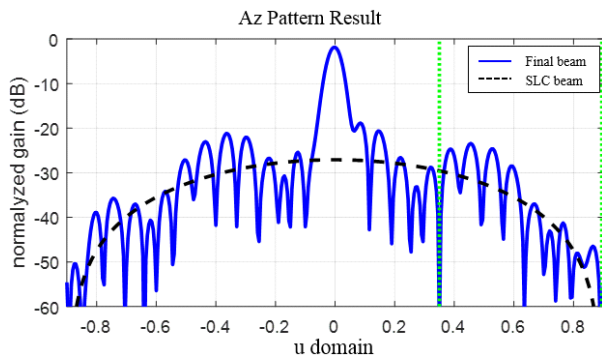
있다. 일반적으로 안테나의 빔폭은 안테나의 물리적 크기와 반비례하기 때문이다. 그림 8은 그림 7의 경우보다 적은 4개의 디지털 송수신 블록을 통해 부엽제거 수신빔을 형성한 경우로, 부엽제거 수신빔의 빔폭이 넓어져 null되는 포인트( $u=0.895$ )가 빔운용범위보다 멀리 형성됨을 알 수 있다. 즉 이 경우 부엽제거 수신빔 null에 재머 신호가 들어옴에도 불구하고, 그림 8(b)와 같이 최종 수신빔의 주빔모양은 비교적 깨끗이 형성되어 표적신호가 정확히 추출됨을 확인하였다. 또한 null되는 포인트가 운용 범위 밖에 있기 때문에, 재밍신호가 수신빔의 null 방향으로 들어올 가능성이 없다. 따라서 수신빔 null 방향을 운용범위 밖으로 보내는 과정에서 디지털 송수신블록의 크기를 무한정 줄일 수는 없으며, 부엽제거 수신빔의 이득을 고려하여 trade off 과정이 필요하다.





(a) 재머가 null 방향으로 안들어오는 경우

(a) Case when jammer does not enter in the null direction



(b) 재머가 null 방향으로 들어오는 경우

(b) Case when jammer enter in the null direction

그림 8. 변경된 SLC 패턴과 최종 수신빔 패턴

Fig. 8. Modified SLC pattern and final receive pattern.

## V. 결 론

본 논문에서는 완전 디지털 능동배열 레이더에 적용 가능한 부엽제거 알고리즘을 제시하였다. 기존의 다른 부엽제거 알고리즘과는 달리 본 논문에서 제시된 기법은 디지털 신호단에서 형성된 부엽제거 수신빔만을 이용하여 적응빔 계수를 구하고, 수신 빔 신호와 형성된 부엽제거 빔의 차 연산을 통해 최종 빔 신호를 형성하였다. 제안된 알고리즘은 부배열기술을 이용한 부엽제거 방식보다 공분산 행렬의 개수가 훨씬 적어 계산시간과 연산량이 적다는 큰 장점이 있다. 또한 실제 레이더에 적용하기 위한 여러 고려사항을 분석하여 레이더 체계에 적용할 수 있을 것으로 기대된다.

## References

- [1] 김선주, 안창수, 이종현, 홍윤석, "디지털 케환회로를 갖는 하이브리드 방식의 부엽제거장치 설계," 한국군사과학기술학회 2009년 종합학술대회, pp. 731-734, 2009년.
- [2] D. P. Bertsekas, *Nonlinear Programming*, Belmont, Massachusetts, Athena Scientific, 1995.
- [3] 김동환, 김은희, 박종현, 김선주, "능동위상배열 레이더 적용을 위한 FPGA 기반 실시간 적응 빔 형성기 설계 및 구현," 한국전자과학회논문지, 26(4), pp. 424-434, 2015년 4월.
- [4] L. Griffiths, C. Jim, "An alternative approach to linearly constrained adaptive beamforming," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 30, no. 1, pp. 27-34, Jan. 1982.
- [5] 양은정, 한일탁, 송준호, 이희영, 염동진, "간섭환경에 강인한 적응형 부엽차단기," 한국전자과학회논문지, 26(3), pp. 317-325, 2015년 3월.
- [6] S. H. Talisa, K. W. O'haver, T. M. Comberiate, M. D. Sharp, and O. F. Somerlock, "Benefits of digital phased array radar," in *Proceedings of the IEEE*, Mar. 2016, vol. 104, no. 3, pp. 530-543.
- [7] A. Farina, *Antenna-Based Signal Processing Techniques for Radar System*, Boston, Artech House, 1992.
- [8] L. S. Reed, J. D., Mallett, and L. E. Brennan, "Rapid convergence rate in adaptive arrays," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 10, no. 6, pp. 853-863, Nov. 1974.
- [9] C. H. Gierull, "Fast and effective method for low-rank interference suppression in presence of channel error," *Electronic Letters*, vol. 34, no. 6, pp. 518-520, Mar. 1998.
- [10] 김은정, 문성빈, 이병섭, 김진호, 홍동희, "적응 side-lobe canceller에서의 Spatio-temporal 처리 구조에 관한 연구," 한국전자과학회논문지, 11(3), pp. 329-336, 2000년 4월.

## 양 우 용



2005년 2월: 서강대학교 전자공학과 (공학사)  
 2007년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)  
 2015년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)  
 2007년 1월~현재: 한화시스템 레이다·

PGM 연구소 전문연구원

[주 관심분야] 레이다 시스템 설계/성능분석, 안테나 및 레이다 신호처리, 표적인식 알고리즘 설계/분석

## 홍 성 원



2010년 2월: 경북대학교 전자전기컴퓨터학부 (공학사)  
 2012년 2월: 경북대학교 모바일통신공학과 (공학석사)  
 2017년 2월: 경북대학교 전자공학부 (공학박사)  
 2017년 12월~현재: 국방과학연구소 선임

연구원

[주 관심분야] 레이다 시스템, 레이다 신호/데이터 처리 등

## 박 민 규



2016년 8월: 고려대학교 전기전자전파공학부 (공학사)  
 2016년 7월~현재: 한화시스템 레이다·PGM 연구소 연구원  
 [주 관심분야] 레이다 시스템 설계, 레이다 빔 신호처리

## 김 찬 홍



1991년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학사)  
 1993년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학석사)  
 2008년 8월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학 (공학박사)  
 1993년~현재: 국방과학연구소 책임연구원

[주 관심분야] 레이다 및 SAR 시스템 설계/분석, 위상배열 안테나 설계/분석, 안테나 측정, 전자장 수치해석, 안테나 신호처리 등