

능동위상배열안테나의 부엽제거기 적용 시 모노펄스 왜곡 보정

Compensation Method of Monopulse Slope Distortion within Using Sidelobe Canceler

김 기 호 · 김 현 · 진 형 석

Ki-Ho Kim · Hyun Kim · Hyung-Suk Jin

요 약

안테나 패턴의 부엽으로 수신되는 불요신호(재머신호)의 제거를 위해서 주 안테나 이외에 보조 안테나를 통한 부엽제거기(sidelobe canceller, SLC)를 사용한다. 부엽제거기는 불요신호 제거를 위해서 보조 안테나의 수신 신호와 주 안테나의 수신 신호를 사용해 보조 안테나의 수신빔을 부엽제거 빔으로 형성하고, 주 안테나의 수신빔과 합성하여 불요신호가 제거된 수신 빔 패턴을 형성한다. 하지만 재머 신호의 위치가 주 안테나 빔 패턴의 주엽과 근거리에 위치할수록 부엽제거기 적용 시 주 안테나 빔 패턴에 왜곡이 발생하게 되며, 이로 인해 표적의 각도 추정을 위한 모노펄스 특성 또한 왜곡된다. 본 논문에서는 부엽제거기 적용 시 발생하는 모노펄스 왜곡을 개선하기 위해 근접전계와 같은 정적환경에서 측정된 안테나 특성을 사용한 효과적이고 간단한 보정 방법을 제안하였다. 제안 방법의 검증을 위해 시뮬레이션을 수행하였으며, 부엽제거기 적용으로 왜곡된 모노펄스 에러 신호가 개선됨을 확인하였다.

Abstract

The sidelobe canceler is used to remove the received sidelobe jamming signal on the receive antenna pattern. The sidelobe canceler does not use the main antenna but is constructed using an auxiliary antenna. The sidelobe canceler generates a sidelobe cancel beam of the auxiliary antenna using the received signal of the main and auxiliary antennas. The main beam pattern that cancels the jamming signal is generated by combining the main antenna beam and sidelobe cancel beam pattern. However, in the case of a jamming signal received near the main lobe of the main antenna, distortion occurs in the main antenna pattern by applying a sidelobe canceler. Owing to this distortion, the monopulse slope characteristic for the angle estimation of the target is also distorted. This paper proposes a simple and effective method using antenna measurement data (e.g., near-field chamber measured data) to compensate for the monopulse slope distortion that occurs when the sidelobe canceler is applied. The proposed method was verified using simulations wherein the improvement in the distorted monopulse slope characteristics was confirmed.

Key words: Sidelobe Canceller, Monopulse Distortion, Monopulse Radar, Active Array Radar, Adaptive Antenna System

I. 서 론

레이다(radar)는 전자기파를 자유공간 상으로 방사하고

표적에서 반사되어 수신되는 신호를 통해 표적의 탐지, 추적, 식별, 위치 확인을 하는 센서이다^[1]. 표적에서 반사되어 수신되는 신호는 상대적으로 작은 크기를 가지며,

LIG넥스원(주) (LIG NEX1 Co., Ltd.)

· Manuscript received January 21, 2021 ; Revised February 9, 2021 ; Accepted March 8, 2021. (ID No. 20210121-007)

· Corresponding Author: Ki-Ho Kim (e-mail: kiho.kim@lignex1.com)

클러터 또는 재밍 신호와 같은 원하지 않는 신호에 영향을 받아 정보의 왜곡이 발생하게 된다. 따라서 클러터와 같은 정적 신호의 제거를 위해서 MTI(moving target indication)기법을 사용하며, 외부에서 입력되는 재밍 신호의 제거를 위해서는 부엽제거기(sidelobe canceller, SLC)를 사용한다.^[1] 강한 재밍 신호의 제거에 효과적인 부엽제거기는 보조 안테나를 사용해서 구성한다. 레이더의 주 안테나(main antenna)와 보조 안테나(auxiliary antenna)로 입력되는 재밍 신호를 획득하고, 두 신호를 사용하여 재밍 신호 방향의 신호가 제거 또는 억압된 안테나 수신 신호를 생성한다. 재밍 신호가 제거된 수신 신호를 얻기 위해 보조 안테나의 수신 신호에 복소 가중치(complex weight)를 곱해 주 안테나 신호 대비 반대 위상의 신호를 생성한다. 주 안테나 신호와 복소 가중치가 반영된 보조 안테나 신호의 합성을 통해 새롭게 형성된 안테나 수신 빔 패턴은 재밍 신호의 방향으로 깊은 극소치(null)를 갖는다. 복소 가중치는 보조 안테나로 입력되는 재밍 신호의 공분산(covariance)행렬과 주 안테나와 보조 안테나로 입력되는 재밍 신호의 상관(correlation) 벡터의 곱으로 구해진다^{[2],[3]}. 부엽제거기를 사용하면 수신 빔 패턴의 부엽에 존재하는 재밍 신호를 효과적으로 제거할 수 있으나, 재밍 신호가 수신 빔 패턴의 주엽 근처에 존재할 경우, 극소치 생성을 위해 주 안테나 수신 패턴에 왜곡이 발생하게 되며, 이로 인해 표적의 각도 추정을 위한 모노펄스 특성 또한 왜곡이 발생한다. 이러한 문제를 해결하기 위해 적응형 빔 형성 기법을 사용하여 주엽 부근에 극소치를 생성한 SLC 패턴을 만들어 합성하는 기법들이 연구되었으나, 연산량이 많은 단점이 존재한다^{[4]~[6]}. 따라서 본 논문에서는 부엽제거기를 사용할 경우, 발생하는 모노펄스 왜곡을 개선하기 위해 복소 가중치를 곱해 생성된 보조채널의 수신 신호와 근접전개시험과 같은 정적 환경에서 측정된 안테나 수신 신호를 사용하여 모노펄스 왜곡 보정치(correction factor)를 계산하고, 보정치를 모노펄스 에러 신호에 적용하여 왜곡을 개선하는 간단하고 효과적인 방법을 제안한다.

본 논문의 II장에서는 재밍 대응을 위한 부엽제거기 알고리즘에 대해 설명하며, III장은 모노펄스 에러 신호 왜곡 보정을 위해 제안된 방법에 대해 기술하였다. IV 장에

서는 시뮬레이션을 통해 제안하는 보정 방법의 유효성을 확인하고, V장에서는 본 논문의 결론을 제시한다.

II. 부엽제거기 알고리즘

본 장에서는 재밍 신호 제거를 위한 부엽제거기 알고리즘의 동작 원리를 설명한다. 부엽제거기는 그림 1과 같이 주 안테나와 보조 안테나로 구성된다. 레이더는 내부 열 잡음신호 및 재밍 신호와 같은 외부의 간섭신호 확인을 위해 레이더 송수신 동작 전 수동수신구간(passive listening period, PLP)을 갖는다. PLP 구간에서 측정된 신호를 사용하여 재밍 신호를 탐지하고, 보조 안테나의 복소 가중치를 계산한다. PLP 구간에서는 표적으로부터 반사되어 입력되는 수신 신호는 없고, 잡음 및 재밍 신호만 존재한다. 따라서 PLP 구간에서 재밍 신호만 반영된 복소 가중치 ω 를 구할 수 있다. PLP 구간에서 획득한 복소 가중치는 레이더의 동작 구간에 주 안테나와 보조 안테나를 통해 입력되는 수신신호(x, Y)에 적용하여 부엽에 존재하는 재밍 신호가 제거된 신호 $z(t)$ 를 출력한다.

부엽제거기의 중요 파라미터인 복소 가중치 ω 의 계산은 PLP 구간에서 주/보조 안테나 신호로 계산한 $z(t)$ 값들의 전력을 최소화하는 값을 찾는 것이다. 주/보조 안테나 수신 신호에 대해 계산된 신호 $z(t)$ 의 전력값이 최소가 되는 복소 가중치를 찾기 위해 최소평균제곱오차(MMSE)를 사용하면 아래의 식과 같이 $z(t)$ 의 표현이 가능하다.

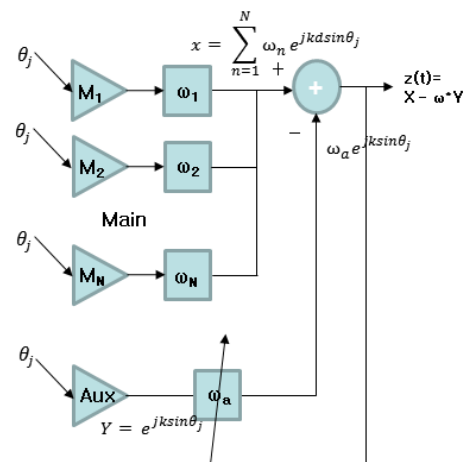


그림 1. 부엽제거기의 블록도

Fig. 1. Block diagram of sidelobe canceller.

$$\begin{aligned}
 \min E\{|x - \omega^H Y|^2\} &= \min E\{|x^H - \omega Y^H|^2\} \\
 &= \min E\{(x^H - \omega Y^H)^H (x^H - \omega Y^H)\} \\
 &\rightarrow \frac{\partial}{\partial \omega} E\{(x^H - \omega Y^H)^H (x^H - \omega Y^H)\} = 0
 \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 x 는 주 안테나로 입력되는 신호의 합, Y 는 보조 안테나로 입력되는 신호 복소 가중치이며, H 는 에르미트 전치(Hermitian transpose)이다. 식 (1)에서 복소 가중치의 해를 구하면 식 (2)와 같다.

$$\begin{aligned}
 E\left\{\frac{\partial}{\partial \omega} (x^H - \omega Y^H)^H (x^H - \omega Y^H)\right\} &= 0 \\
 \rightarrow E\{Y(x^H - \omega Y^H)\} &= 0 \\
 \rightarrow E\{YY^H\}\omega &= E\{xY^H\}^H \\
 \rightarrow R_{YY}\omega &= r_{xY}^H \\
 \therefore \omega &= R_{YY}^{-1}r_{xY}^H
 \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 R 은 보조채널 수신 신호의 공분산 행렬, r 은 주 안테나와 보조 안테나 수신 신호의 상관벡터이며, 구해진 가중치를 아래의 식 (3)과 같이 적용하면 재밍 방향으로 극소치를 갖는 수신 안테나 수신 패턴을 형성할 수 있다.

$$z(t) = x - \omega^* Y \quad (3)$$

적정 복소 가중치를 적용하여 그림 2와 같이 재밍 신호

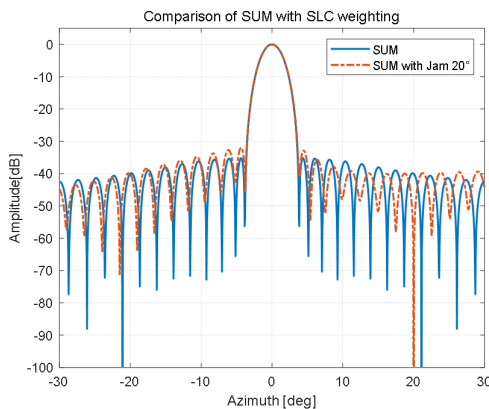


그림 2. 일반 수신 합패턴과 부엽제거기 적용 수신 합패턴 비교 (재밍 방향 20°)

Fig. 2. Normal sum pattern and sum pattern after SLC (jamming direction 20°).

의 방향으로 극소치를 갖는 수신 패턴을 형성할 수 있다. 그림 2는 방위각 20° 방향에서 재밍 신호인가 시 부엽 차단을 적용한 수신 합 패턴과 일반 합 패턴을 비교한 예시이다.

Ⅲ. 부엽제거기 적용 시 왜곡된 모노펄스 에러 신호 보정

레이다에서는 표적의 각도 위치 추정을 위해 모노펄스 방법을 사용한다. 모노펄스는 안테나 수신 신호의 합(sum)과 차(del) 신호를 사용하여 확인한다. 재밍 신호가 수신 패턴 주엽 가까이 존재할수록 재밍 신호 방향으로 극소치를 갖는 패턴을 만들게 되면 수신 합/차 패턴의 주엽 부근에 왜곡이 발생하고, 모노펄스 특성에도 오차가 발생한다. 본 장에서는 위상배열 레이다에 적용되는 위상비교 모노펄스에 대해 설명 후 부엽 제거기 적용 시 모노펄스 에러 신호 왜곡 보정 방법을 제안한다.

3-1 위상 비교 모노펄스

표적의 각도 위치 추정을 위한 모노펄스 방식에는 진폭비교와 위상비교 모노펄스 방식이 존재한다. 동일 위상으로 입력되는 서로 다른 크기의 신호를 비교하여 표적의 위치를 추정하는 진폭 비교 모노펄스와는 달리 위상비교 모노펄스는 각 안테나로 입력되는 신호의 위상 차이로 각도 위치를 추정한다⁷⁾. 따라서 위상배열 안테나에는 모노펄스를 위해 위상 비교 모노펄스를 사용한다. 그림 3과 같이 두 개의 안테나를 사용해 위상배열 모노펄스 안테나를 구현한다고 하면 표적으로부터 수신되는 신호

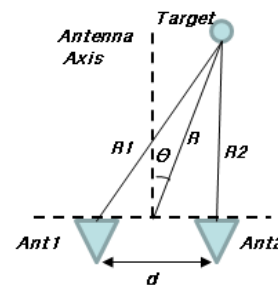


그림 3. 위상비교 모노펄스 안테나

Fig. 3. Phase comparison monopulse antenna.

의 위상 차이를 식 (4)와 같이 표적과 안테나와의 거리로 구할 수 있다.

$$R1 \approx R \left(1 + \frac{d}{2R} \sin \theta \right), R2 \approx R \left(1 - \frac{d}{2R} \sin \theta \right)$$

$$\Phi = \frac{2\pi}{\lambda} (R1 - R2) = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin \theta \quad (4)$$

여기서 λ 는 신호의 파장, Φ 는 두 신호의 위상차, θ 는 안테나 보어사이트와 표적 사이의 각, d 는 안테나 간 거리, $R1$ 과 $R2$ 는 안테나와 표적 간 거리, R 은 배열 안테나 중심과 표적간의 거리를 나타낸다. 모노펄스에서 최종적인 출력은 안테나의 합 신호와 차 신호의 비로 생성하는 모노펄스 에러 신호이다. 합 신호와 차 신호는 식 (5)와 같이 표현된다.

$$\Sigma = S_1 + S_2 + n_1 + n_2$$

$$\Delta = S_1 - S_2 + n_1 - n_2 \quad (5)$$

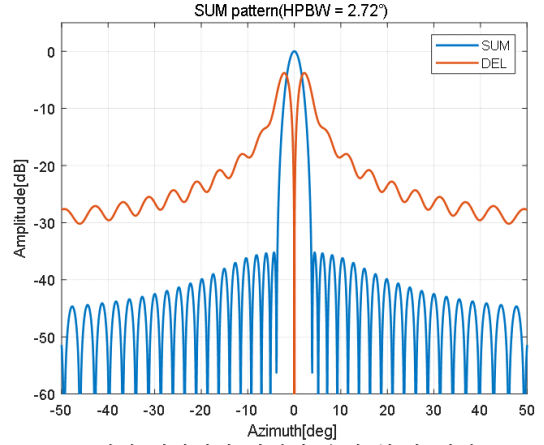
여기서 S_1 과 S_2 는 안테나로 입력되는 신호의 세기이며, n_1 과 n_2 는 안테나의 잡음 신호 크기이다. S_1 과 S_2 는 크기는 같고 위상의 차이만 존재하고, 신호의 크기가 잡음의 크기보다 커서 잡음 신호를 무시할 수 있다면 식 (6)과 같이 합과 차 신호의 비인 모노펄스 에러 신호를 나타낼 수 있다.

$$\epsilon = \frac{\Delta}{\Sigma} = \frac{(1 - e^{-j\Phi}) + n_1 - n_2}{(1 + e^{-j\Phi}) + n_1 + n_2} \approx -j \tan \left(\frac{\Phi}{2} \right) \quad (6)$$

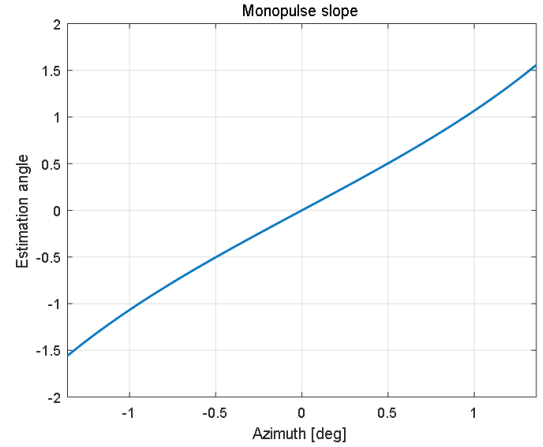
모노펄스 에러 신호는 안테나 수신 패턴의 주엽 내에서 기울기를 가진 직선의 형태로 나타나며, 에러 신호의 기울기가 1이 될 때 최적의 성능을 나타낸다. 선형 위상 배열 안테나를 모델링하여 수신 빔 패턴의 합/차 패턴을 사용해 모노펄스 에러 신호를 구하면 그림 4와 같으며, 안테나 수신 패턴 주엽(2.7°) 내에서 에러 신호의 기울기가 1과 근사함을 확인할 수 있다. 식 (6)을 통해 구해진 모노펄스 에러 신호를 사용해 두 신호의 위상차(Φ)를 구하고, 구해진 위상차를 식 (4)에 적용해 표적의 각도 위치를 식 (7)과 같이 추정할 수 있다.

$$\Phi = 2 \tan^{-1} \left(-\operatorname{Im} \left(\frac{\Delta}{\Sigma} \right) \right)$$

$$\rightarrow \theta = \sin^{-1} \left(\frac{\lambda}{\pi d} \tan^{-1} \left(-\operatorname{Im} \left(\frac{\Delta}{\Sigma} \right) \right) \right) \quad (7)$$



(a) 선형 위상배열 안테나 수신 합/차 패턴
(a) Sum and del pattern of linear array antenna



(b) 모노펄스 에러 신호
(b) Monopulse error signal

그림 4. 선형 위상배열 안테나의 합/차 패턴과 모노펄스 에러 신호

Fig. 4. Sum/del beam pattern and monopulse slope of linear array antenna.

3-2 왜곡된 모노펄스 에러 신호 보정 방법

본 절에서는 재밍 방향으로 극소치를 생성하는 수신 패턴을 만들어 재밍 신호를 제거 후 극소치 생성을 위해 변형된 합/차 패턴으로 인해 왜곡된 모노펄스 에러 신호를 근접전계와 같은 정적 환경에서 측정된 안테나 수신 신호를 사용하여 보정하는 방법을 제안한다. 부엽제거기를 적용한 모노펄스 에러 신호(ϵ_{SLC})를 구하면 식 (8)과 같다.

$$\begin{aligned}\epsilon_{SLC} &= \frac{\Delta_{SLC}}{\Sigma_{SLC}} = \frac{\Delta_M - \omega_d SLC}{\Sigma_M - \omega_s SLC} \\ &= \frac{(\Delta_o + \Delta_{err}) - \omega_d SLC}{(\Sigma_o + \Sigma_{err}) - \omega_s SLC}\end{aligned}\quad (8)$$

여기서 Σ_{SLC} 와 Δ_{SLC} 는 부엽 제거기가 적용된 안테나 합/차 수신신호, Σ_M 와 Δ_M 는 부엽제거기 적용 전 안테나 합/차 수신 신호, Σ_o 와 Δ_o 는 정적 환경에서 측정된 안테나 합/차 수신 신호, $\omega_s SLC$, $\omega_d SLC$ 는 복소 가중치가 적용된 SLC 안테나 수신 신호이다. Σ_M , Δ_M 은 정적 환경에서 측정된 안테나 수신 신호 Σ_o , Δ_o 와 비교 시 배열 소자의 크기/위상 오차에 의한 차이(Σ_{err} , Δ_{err})를 갖고 있으나, 무시할 수 있는 크기로 가정한다면 모노펄스 에러 신호는 식 (9)와 같이 표현 가능하다.

$$\epsilon_{SLC} \approx \frac{\Delta_o - \omega_d SLC}{\Sigma_o - \omega_s SLC}\quad (9)$$

식 (9)를 식 (10)과 같이 부엽제거기가 적용된 모노펄스 에러 신호를 정적 환경에서 측정된 모노펄스 에러 신호(ϵ_o)와 왜곡 보정치(ω_{cor})로 분리할 수 있으며, 왜곡 보정치는 식 (11)과 같이 정의가 가능하다.

$$\epsilon_{SLC} = \frac{\Delta_o}{\Sigma_o} \left(\frac{1 - \frac{\omega_d SLC}{\Delta_o}}{1 - \frac{\omega_s SLC}{\Sigma_o}} \right) = \epsilon_o \omega_{cor}\quad (10)$$

$$\omega_{cor} = \frac{(1 - \omega_d SLC / \Delta_o)}{(1 - \omega_s SLC / \Sigma_o)}\quad (11)$$

부엽 제거기 적용으로 왜곡된 모노펄스 에러 신호를 식 (11)을 통해 계산된 왜곡 보정치와 식 (12)를 사용하면 보정된 모노펄스 에러 신호(ϵ_{cor})를 얻을 수 있다.

$$\epsilon_{cor} = \epsilon_{SLC} \omega_{cor}^{-1}\quad (12)$$

그림 5와 같은 순서로 왜곡 보정치를 사용하는 에러 신

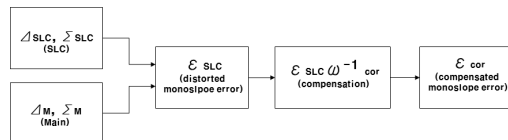


그림 5. 모노펄스 에러 신호 보정 방법

Fig. 5. Diagram for monopulse error signal compensation.

호 보정 방법을 적용하면 보정된 모노펄스 에러 신호를 구할 수 있다.

IV. 모노펄스 왜곡 보정 시뮬레이션

제안된 모노펄스 에러 신호 왜곡 보정 방법의 유효성 검증에 위해 50개의 복사 소자로 구성된 선형 위상 배열 안테나를 사용해 시뮬레이션하였다. 복사 소자 간 간격은 C-대역주파수의 $\lambda/2$ 인 2.68 cm로 설정하여 선형 배열로 복사소자를 배치하였으며, 모노펄스를 위해 25개 복사소자를 묶어 2개의 부배열을 구성하였다. SLC를 위한 보조 안테나는 50개 복사소자 중 1, 2번 복사소자를 사용하였다. 복사 소자의 배치 및 구조는 그림 6과 같다.

선형 위상배열 안테나는 테일러 35 dB 분포를 적용하였으며, 그림 4(a)와 같이 부엽 35 dBc 이상, 빔폭 2.7°의 특성을 갖는다. 부엽제거기 적용 시 재밍 신호 방향에 따른 모노펄스 에러 신호의 왜곡 특성 확인을 위해 JSR 10 dB, 재밍 신호는 방위각 4°, 8°, 15°, 20°, 25° 방향에 존재하며, 안테나 조향각은 방위각 0°로 설정해 시뮬레이션하였다. 부엽제거기를 적용하여 재밍 신호 방향에 극소치를 생성한 안테나의 합 패턴과 차 패턴은 그림 7과 같다. 그림 7(a)는 재밍 신호 방향으로 부엽에 극소치를 생성한 수신 합 패턴이며, 그림 7(b)는 재밍 신호 방향으로 극소치

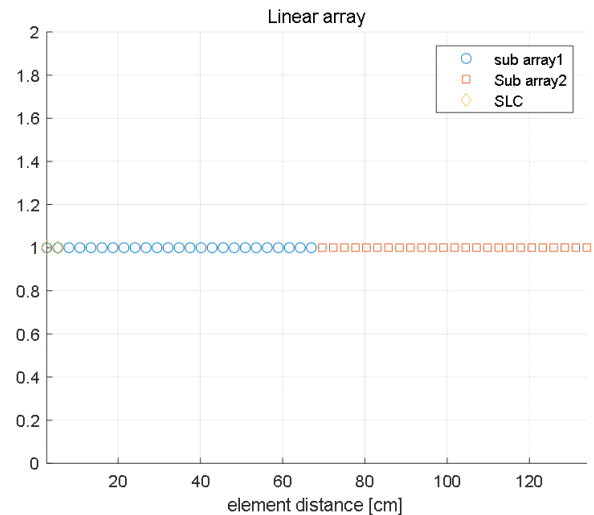
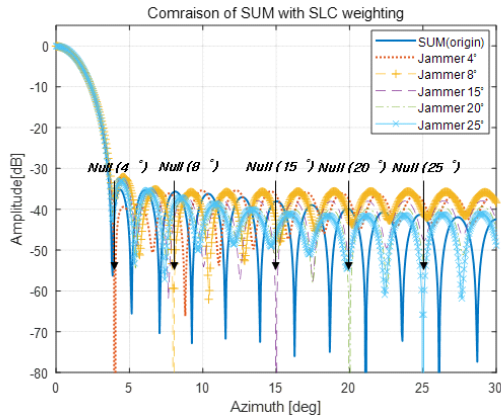
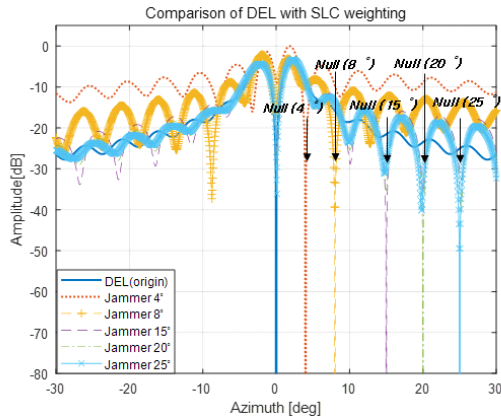


그림 6. 시뮬레이션을 위한 선형 위상배열 안테나 배치

Fig. 6. Linear array modelling for simulation.



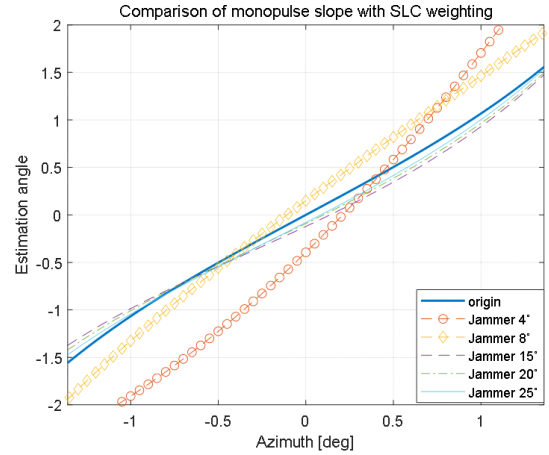
(a) 재밍 신호 방향으로 극소치가 생성된 합 패턴
(a) Sum pattern with null at jamming direction



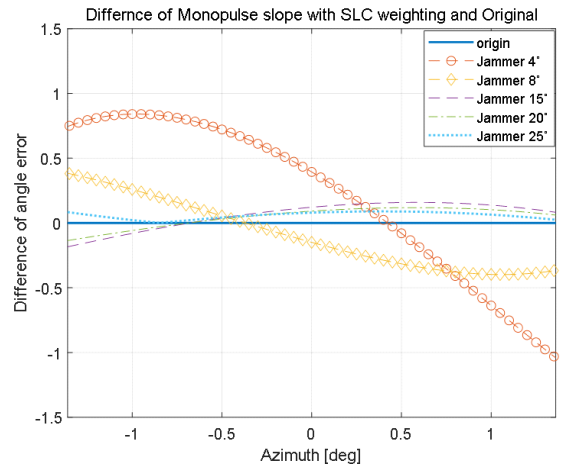
(b) 재밍 신호 방향으로 극소치가 생성된 차 패턴
(b) Del pattern with null at jamming direction

그림 7. 부엽제거기를 적용한 안테나 합/차 패턴
Fig. 7. Sum/del beam pattern using sidelobe canceller.

를 생성한 차 패턴이다. 정상(origin) 합/차 패턴 대비 재밍 신호가 주엽 인근에 가까이 존재할수록 재밍 방향으로 극소치 생성을 위해 주엽 인근 신호의 위상 변화가 발생함으로 인해 주엽 인근 패턴에 왜곡이 커지게 된다. 따라서 재밍 신호 방향으로 극소치가 생성된 합과 차 수신패턴으로 생성한 모노펄스 에러 신호는 정상 상태의 합, 차 패턴 대비 극소치가 생성된 패턴의 위상 왜곡으로 인해 모노펄스 에러 신호 또한 왜곡됨을 그림 8과 같이 확인하였다. 그림 8은 부엽제거기를 적용하여 구해진 모노펄스 에러 신호로 그림 8(a)는 재밍 신호 방향에 따른 배열 안테나의 주엽 빔폭 내에서 모노펄스 에러 신호, 그림



(a) 부엽제거기 적용 시 왜곡된 모노펄스 에러 신호
(a) Monopulse error signal with SLC



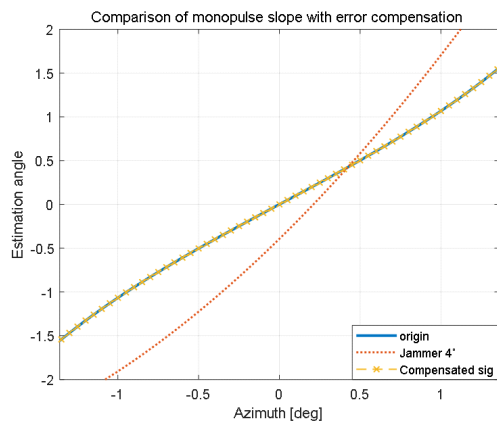
(b) 정상 에러 신호로 정규화 된 에러 신호 편차
(b) Normalized monopulse error signal according to jamming direction

그림 8. 부엽제거기를 적용한 모노펄스 에러 신호
Fig. 8. Monopulse error signal with SLC.

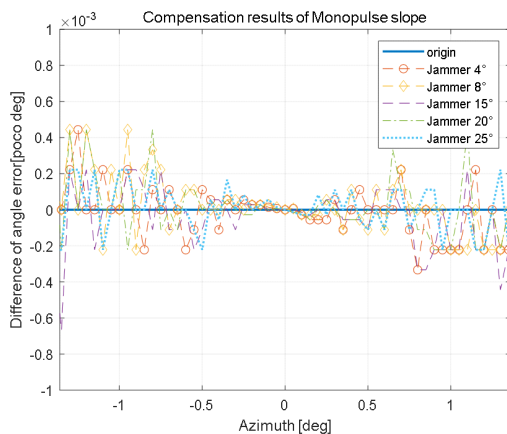
8(b)는 정상 에러 신호로 정규화시킨 재밍 신호 방향에 따른 주엽 빔폭 내의 에러 신호의 편차이다. 재밍 신호가 주엽과 가까워질수록 극소치 생성을 위해 주엽 인근의 위상 왜곡이 커짐으로 패턴의 왜곡이 크게 발생하며, 주엽 빔폭 내 모노펄스 에러 신호의 왜곡 또한 커짐을 확인할 수 있다. 재밍 신호가 주엽과 가까운 방위각 4° 방향에 존재할 경우, 주엽의 빔폭 내에서 정상 상태 대비 최대 1° 이상의 에러 신호 오차가 발생함을 확인하였다. 표 1에서는 재밍 신호의 방향에 따른 주엽 빔폭 내 에러 신호

표 1. 재밍 신호 방향에 따른 모노펄스 에러 신호 편차
Table 1. Difference of monopulse error signal according to jamming direction.

Jamming direction	Difference of monopulse error signal(@ Az 0°)	Maximum deviation of error signal within 3 dB beamwidth
4°	0.39°	-1.03°@ Az 1.35°
8°	-0.14°	-0.39°@ Az 1.05°
15°	0.12°	-0.18°@ Az -1.35°
20°	0.09°	-0.13°@ Az -1.35°
25°	0.07°	0.09°@ Az 0.4°



(a) 왜곡이 보상된 모노펄스 에러 신호(@ jamming 4°)
(a) Compensated monopulse error signal (@ jamming 4°)



(b) 재밍 신호 방향에 따른 보상된 모노펄스 에러 신호 편차
(b) Compensated monopulse error signal according to jamming direction

그림 9. 모노펄스 에러 신호 왜곡 보상

Fig. 9. Compensation of distorted monopulse error signal.

와 정상 에러 신호와의 편차를 정리하였다. 재밍 신호의 방향이 주엽과 가까워질수록 주엽 빔폭 내 에러 신호 편차가 증가함을 확인할 수 있다.

제안된 방법에 의한 모노펄스 에러 신호 왜곡 보정을 확인하기 위해 식 (11)을 사용하여 왜곡 보정치를 구하고, 식 (12)와 같이 왜곡 보정치를 부엽제거기를 적용한 모노펄스 에러 신호에 적용하였다. 왜곡 보정치를 구하기 위해 사용되는 Σ_0 , Δ_0 신호는 배열 안테나 특성 확인을 위해 시뮬레이션 된 이상적 합/차 패턴을 사용하였다.

시뮬레이션 결과, 왜곡 보정치를 적용하면 왜곡된 모노펄스 에러 신호가 정상 모노펄스 에러 신호와 같아짐을 확인하였다. 그림 9는 왜곡 보정치를 적용한 모노펄스 에러 신호 시뮬레이션 결과이다. 그림 9(a)는 시뮬레이션 중 가장 왜곡이 크게 발생하였던 방위각 4° 방향에 재밍 신호가 존재하는 경우로 왜곡 보정치를 적용한 에러 신호와 보정 전 에러 신호를 비교하였으며, 왜곡된 에러 신호가 보정되어 정상 에러 신호와 같아졌음을 확인할 수 있다. 그림 9(b)는 재밍 신호의 방향에 따라 왜곡된 모노펄스 에러 신호에 왜곡 보정치를 적용한 결과를 정상 에러 신호로 정규화한 결과로, 보정된 에러 신호는 정상 에러 신호와 동일함을 확인할 수 있다. 표 2에서는 보정된 에러 신호와 정상 에러 신호와의 주엽 빔폭 내 최대 편차를 정리하였다. 왜곡 보정치 적용 전 주엽 빔폭 내에서 최대 편차를 갖는 지점과 조향각(0°) 지점에서 보정치 적용 전/후 편차를 확인한 결과, 개선된 신호와 정상 에러

표 2. 재밍 신호 방향에 따른 보정된 모노펄스 에러 신호 편차

Table 2. Difference of compensated monopulse error signal according to jamming direction.

Jamming direction	Compensate error signal (@ Az 0°)	Compensate maximum deviation of error signal within 3 dB beamwidth
4°	0.39°→0°	-1.03°→-0.0002 p°@ Az 1.35°
8°	-0.14°→0°	-0.39°→-0.0002 p°@ Az 1.05°
15°	0.12°→0°	-0.18°→-0.0006 p°@ Az -1.35°
20°	0.09°→0°	-0.13°→-0.0002 p°@ Az -1.35°
25°	0.07°→0°	0.09°→0.0001p°@ Az 0.4°

신호의 최대 편차가 -0.0006 p°로 확인되어 두 신호가 동일해졌음을 확인하였다. 시뮬레이션 결과, 왜곡 보정치를 적용할 경우 부엽제거기 사용으로 발생하는 모노펄스 에러 신호의 왜곡을 효과적으로 보정할 수 있음을 확인하였다.

V. 결 론

본 논문에서는 재밍 신호 제거 또는 억제를 위한 부엽제거기를 사용할 때 수신 합/차 패턴의 변형으로 인해 발생하는 모노펄스 에러 신호 왜곡을 보정하기 위해 정적 환경에서 측정된 안테나 수신 신호를 사용하는 간단하며 효과적인 방법을 제시하였다. 제시된 방법의 검증을 위해 50개의 소자를 갖는 선형 위상배열 안테나와 5개 방향(4° , 8° , 15° , 20° , 25°)의 재밍 신호를 시뮬레이션하여 왜곡 보정치를 계산하고, 왜곡된 모노펄스 에러 신호에 적용하여 정상 상태의 모노펄스 에러 신호와 동일한 왜곡이 보정된 신호를 확인할 수 있었다. 재밍 신호가 존재하는 환경에서 제안된 방법을 적용할 경우, 부엽제거기를 통해 재밍 신호를 제거하고 복잡한 계산 과정 없이 정적 환경에서 측정된 안테나 특성을 사용한 왜곡 보정치를 적용해 왜곡된 모노펄스 에러 신호를 효과적으로 개선하여 표적의 각도 위치 추정이 정상적으로 이뤄질 수 있을 것으로 기대한다.

김 기 호 [LIG 넥스원(주)/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0001-9590-9310>



2005년 2월: 광운대학교 전파공학과 (공학사)

2007년 2월: 광운대학교 전파공학과 (공학석사)

2007년 4월~현재: LIG 넥스원(주) 수석연구원

[주 관심분야] 능동위상배열안테나 설계, 레이더 시스템 설계, 파형 발생기, 고출력 전력증폭기

References

- [1] M. I. Skolnik, *Introduction to Radar Systems*, 3rd ed. New York, NY, McGraw Hill, 2001.
- [2] R. Nitsberg, *Radar Signal Processing and Adaptive Systems*, Norwood, MA, Artech House, 1999.
- [3] P. Sedivy, "Radar sidelobe canceller performance evaluation," in *2013 Conference on Microwave Techniques (COMITE)*, Pardubice, Apr. 2013, pp. 186-189.
- [4] U. Nickel, "Monopulse estimation with subarray-adaptive array and arbitrary sum and difference beams," *IEEE Proceeding-Radar, Sonar and Navigation*, vol. 143, no. 4, pp. 232-238, Aug. 1996.
- [5] K. B. Yu, D. J. Murrow, "Adaptive digital beamforming for angle estimation in jamming," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 37, no. 2, pp. 508-522, Apr. 2001.
- [6] T. H. Kim, D. Y. Choi, "Sidelobe cancellation using difference channels for monopulse processing," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 26, no. 5, pp. 514-520, May. 2015.
- [7] B. R. Mahfaza, *Radar Systems Analysis and Design Using MATLAB*, 3rd ed. Boca Raton, FL, CRC Press, 2013.

김 현 [LIG 넥스원(주)/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0001-5130-5865>



2002년 2월: 연세대학교 전기전자공학부 (공학사)

2005년 2월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학석사)

2011년 2월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학박사)

2011년 02월~현재: LIG넥스원(주) 수석연구원

[주 관심분야] 능동위상배열안테나 시스템 설계, 레이더 시스템 설계, 마이크로파 수치해석

진 형 석 [LIG 넥스원(주)수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-0764-9596>



1998년 2월: 수원대학교 전자재료공학과
(공학사)

2000년 2월: 광운대학교 전파공학과 (공학
석사)

2000년 8월~현재: LIG 넥스원(주) 수석연
구원

[주 관심분야] 초고주파능동회로 및 송수
신기 설계, 능동위상배열 레이더 시스템 및 TRM