

논문 2004-41TC-1-6

표적 입사각 추적을 위한 모노펄스 빔형성 네트워크

(Monopulse Beamforming Network for Target Angle Tracking)

문성훈*, 한동석**, 조명제***

(Sung-Hoon Moon, Dong-Seog Han, and Myeong-Je Cho)

요약

본 논문에서는 재밍 신호가 존재할 경우에 모노펄스 기법을 이용하여 표적신호의 입사각을 추정하기 위한 모노펄스 빔형성기를 제안한다. 제안한 모노펄스 빔형성기는 평면 어레이 안테나를 이용하여 방위각과 고도각으로 별도의 빔형성을 수행한다. 즉, 방위각 방향으로의 빔형성을 통하여 표적 고도각을 추정하고, 고도각 방향으로의 빔형성을 통하여 표적 방위각을 추정한다. 기존의 모노펄스 빔형성기에 비하여 적용된 가중치의 값에 상관없이 모노펄스 비를 얻으므로 구현이 간단하고 빔형성에 의한 편향이 발생하지 않는다. 또한 주엽 제한조건을 사용하지 않으므로 다수의 주엽재밍이 존재할 경우에도 표적의 입사각을 정확하게 추정할 수 있다.

Abstract

This paper proposes a monopulse beamforming network to estimate a target angle in interference conditions. The proposed system estimates the target direction of arrival (DOA) with two separate beamformings for azimuth and elevation with a planar array. The elevation is extracted from adaptive beamforming in the azimuth direction and the azimuth from adaptive beamforming in the elevation direction. Unlike conventional monopulse beamforming techniques using complex correction formulas or a cascaded architecture of an adaptive array and a mainlobe canceller, the proposed system is very efficient from the computational complexity. The advantage is from fact that the monopulse ratio of the proposed system does not depend on the adapted weights. Moreover, the proposed system can estimate the DOA of the target even for multiple mainlobe interferences since it does not need any kinds of mainlobe maintenance technique.

Keywords : Adaptive Array, Monopulse Angle Tracking, Adaptive Beamforming

I. 서론

표적 추적은 표적을 확인한 후 표적의 거리, 방위각 및 고도각, 속도 등을 계속해서 추정하여 표적의 정보를 추출하고 대응하기 위한 레이더의 기능이다^[1]. 일반적으로 추정 입사각의 정확도는 레이더 빔 패턴 상에

서 주엽(mainlobe)의 폭에 의하여 결정된다. 대부분의 현대 군사 레이더는 모노펄스 추적 기술을 이용하여 매우 정확한 입사각 추정을 수행한다. 그러나 표적의 입사각 추정에 일반적으로 사용되는 모노펄스(monopulse) 기법은 재밍신호가 존재할 경우 표적의 입사각도를 정확하게 추적할 수 없다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 재밍신호의 영향을 없애기 위한 빔형성 기술이 필수적이다^[2-4]. 그러나 주엽재밍(mainlobe jamming)이 존재할 경우 빔형성을 수행하면 주엽의 형태가 왜곡되므로 정확한 모노펄스 비를 얻을 수 없다. 이러한 모노펄스 빔형성기의 문제점을 해결하기 위하여 적응 빔형성 기법과 결합된 모노펄스 표적 입

* 학생회원 ** 정회원, 경북대학교 전자전기공학부
(School of electronic & Electrical Engineering, Kyungpook National University)

*** 정회원, 국방과학연구소

(Agency for Defense Developme)

※ 본연구는 한국과학 재단목적 기초연구(R05-2003-000-11108-0) 지원으로 수행 되었음.

접수일자 : 2003년9월5일, 수정완료일 : 2003년12월26일 .

사각 추정 기법이 다양히 연구되고 있다^[5-8].

모노펄스 빔형성기의 주엽 왜곡 문제를 해결하기 위하여 Davies, Brennan, Reed^[5]는 최우 추정기법(maximum likelihood estimation)을 기반으로 주엽왜곡을 보상하는 세가지 수정 모노펄스 공식을 제안하였다. Nickel^[6]은 일차 Taylor 전개를 이용한 적응 모노펄스 특성공식을 유도하였다. Paine^[7]은 LMS(least mean square) 방식의 최적화 방식을 이용하여 차폐탄의 가중치를 얻어서 주엽왜곡을 보상하는 방법을 제안하였다. Yu와 Murrow^[8]는 적응 어레이와 주엽제거기(mainlobe canceller)를 연결하여 앞단에 존재하는 적응 어레이를 통하여 부엽재밍을 제거하고 이어지는 주엽제거기를 이용하여 잔존하는 주엽재밍을 제거하기 위한 모노펄스 빔형성기의 구조를 제안하였다. 이때 적응 어레이에서는 주엽재밍으로 인한 주엽 왜곡을 방지하기 위하여 주엽의 형태를 유지시키기 위한 주엽제한조건(mainlobe constraint)을 사용한다. 그러나 이러한 기존의 모노펄스 기법은 주엽의 왜곡을 보상하기 위한 복잡한 계산과정이 필요하며 적응된 가중치에 따라서 모노펄스 비의 선형성이 특정 방향으로 치우치는 편향이 발생한다. 또한 다수의 주엽재밍이 존재할 경우에는 성능이 크게 열화되는 문제점을 가지고 있다.

본 논문에서는 이러한 주엽재밍의 영향으로 인한 모노펄스 빔형성기의 성능열화 문제를 해결하기 위한 새로운 모노펄스 빔형성기를 제안한다. 제안한 모노펄스 빔형성기는 평면 어레이를 이용하여 방위각과 고도각 방향으로 별도의 빔형성을 수행한다. 방위각 방향으로의 빔형성 후 표적 고도각을 추정하고, 고도각 방향으로의 빔형성 표적 방위각을 추정한다. 제안한 모노펄스 빔형성기는 기존의 모노펄스 빔형성기와 달리 적응된 가중치의 값에 상관없이 모노펄스 비를 얻으므로 구현이 간단하며 입사각 추정시 편향이 발생하지 않는 장점을 가진다. 또한 특별한 주엽 제한조건을 가지지 않으므로 다수의 주엽재밍이 존재할 경우에도 우수한 성능을 가진다.

본 논문의 구성은 서론에 이어진 II장에서 표적신호의 입사각을 추정하기 위한 모노펄스 기법과 재밍신호의 제거를 위한 빔형성 기법을 소개한다. III장에서 방위각, 고도각 방향에서의 별도 모노펄스 빔형성을 이용한 표적 입사각 추정기법을 제안하고 IV장에서 모의 실험을 통하여 성능을 분석한다. 그리고 V장 결론을 끝으로 본 논문을 마무리한다.

II. 재밍 신호 존재시 표적 입사각 추적을 위한 모노펄스 빔형성

A. 모노펄스 빔형성 기법

모노펄스 기법은 두개 이상의 안테나 빔 패턴을 사용하여 표적신호의 입사각을 추정한다. 고전적인 입사각 추적 기법인 순차적 로빙(sequential lobing)이나 원뿔형 빔 탐지(conical scan) 기법은 연속된 다수의 펄스를 각각 서로 다른 방향으로 지향된 안테나 빔을 통하여 수신한 후 각 방향에서 수신신호를 분석하여 표적의 입사각을 추정한다. 그러나 모노펄스 기법은 고전적 입사각 추정기법과는 달리 동시에 다수의 안테나 빔을 통하여 표적으로부터의 반사파를 수신한다. 모노펄스라는 이름에서 알 수 있듯이 모노펄스 기법은 매 펄스 주기(PRI, pulse repetition interval)마다 표적의 방향을 추정할 수 있다. 따라서 빠르게 변화하는 표적의 방향을 우수하게 추적할 수 있다.

그림 1은 간략하게 나타낸 모노펄스 빔형성 레이다의 구조이다. 안테나 소자의 배열과 합, 차 채널, 입사각 추정을 위한 계산기로 구성된다. 합 채널은 안테나 배열의 지향 방향으로 주빔을 형성하고, 차 채널은 지향방향의 이득이 영이 되도록 가중치 벡터를 설정한다. 합 채널과 차 채널 출력의 비를 이용하여 표적 입사각을 추정한다. 합 채널 출력은 표적의 검파를 위해서도 사용된다.

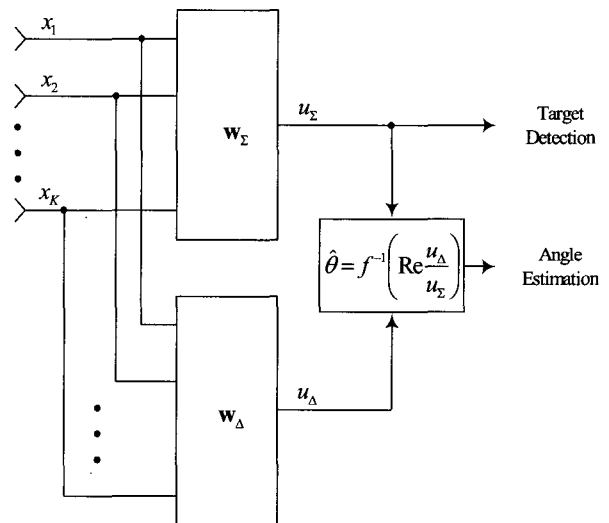


그림 1. 모노펄스 빔형성 레이다
Fig. 1. Monopulse beamforming radar.

안테나 소자의 수가 K 일 경우 안테나 어레이의 입사신호 벡터는

$$\mathbf{x} = [x_1 \quad x_2 \quad \Lambda \quad x_K]^T \quad (1)$$

이다. 여기서 위첨자 T 는 행렬의 전치를 나타낸다. 입사신호 벡터를 이용하여 다음과 같이 합 채널과 차 채널의 출력을 얻는다.

$$\mathbf{u}_\Sigma = \mathbf{w}_\Sigma^H \mathbf{x} \quad (2)$$

$$\mathbf{u}_\Delta = \mathbf{w}_\Delta^H \mathbf{x} \quad (3)$$

여기서 \mathbf{w}_Σ 와 \mathbf{w}_Δ 는 각각 합, 차 채널의 가중치 벡터이고, 위첨자 H 는 복소 전치(complex transpose)이다. 합 채널과 차 채널의 빔 패턴은

$$\Sigma(\theta) = \mathbf{w}_\Sigma^H \mathbf{a}(\theta) \quad (4)$$

$$\Delta(\theta) = \mathbf{w}_\Delta^H \mathbf{a}(\theta) \quad (5)$$

와 같이 주어진다. 여기서 $\mathbf{a}(\theta)$ 는 θ 방향으로의 어레이 지향벡터로서 등간격 선형 어레이일 경우 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{a}(\theta) = [1 \quad \exp(j\beta) \quad \Lambda \quad \exp\{j(K-1)\beta\}]^T \quad (6)$$

식 (6)에서 β 는 소자간 위상차로서 안테나 소자간의 간격이 D 이고 입사신호의 파장이 λ 일 경우 다음과 같이 주어진다.

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} D \sin \theta \quad (7)$$

관심방향 θ_0 로 안테나 빔을 지향할 경우 합, 차 채널의 빔 패턴은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\begin{aligned} g_\Sigma(\theta - \theta_0) &= \mathbf{w}_\Sigma^H \mathbf{a}(\theta) \\ &= \sum_{k=0}^{K-1} w_\Sigma^*(k) \exp\{jk\beta\} \\ &= \sum_{k=0}^{K-1} \exp\{jk(\beta - \beta_0)\} \\ &= \frac{\sin\left\{\frac{K(\beta - \beta_0)}{2}\right\}}{\sin\left\{\frac{(\beta - \beta_0)}{2}\right\}} \exp\left\{j\frac{M(\beta - \beta_0)}{2}\right\} \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} g_\Delta(\theta - \theta_0) &= \sum_{k=0}^{K-1} w_\Delta^*(k) \exp(jk\beta) \\ &= \sum_{k=0}^{K/2-1} j \exp\{jk(\beta - \beta_0)\} + \sum_{k=K/2}^{K-1} (-j) \exp\{jk(\beta - \beta_0)\} \\ &= \frac{2 \sin^2\left\{\frac{K(\beta - \beta_0)}{4}\right\}}{\sin\left\{\frac{(\beta - \beta_0)}{2}\right\}} \exp\left\{j\frac{K(\beta - \beta_0)}{2}\right\} \end{aligned} \quad (9)$$

여기서 \mathbf{w}_Σ 와 \mathbf{w}_Δ 는 관심방향 θ_0 로 합, 차 패턴을 지향하기 위해 사용되는 가중치 벡터이고, β_0 는 관심방향 θ_0 로 입사하는 신호의 소자간 위상차

$$\beta_0 = \frac{2\pi}{\lambda} D \sin \theta_0 \quad (10)$$

이다. 식 (8)과 (9)를 이용하여 다음과 같은 모노펄스 비를 얻는다.

$$f(\theta - \theta_0) = \frac{g_\Sigma(\theta - \theta_0)}{g_\Delta(\theta - \theta_0)} = \tan\left\{\frac{K(\beta - \beta_0)}{4}\right\} = \tan\left\{\frac{\pi KD}{2\lambda}(\sin \theta - \sin \theta_0)\right\} \quad (11)$$

식 (11)과 같은 모노펄스 비를 이용하여 다음과 같이 표적신호의 방향을 얻을 수 있다.

$$\hat{\theta} = f^{-1}\left\{\text{Re}\left(\frac{u_\Delta}{u_\Sigma}\right)\right\} \quad (12)$$

B. 적응 모노펄스 빔형성 기법

모노펄스 기법을 이용한 입사각 추정은 간섭신호에 의하여 성능이 크게 열화될 수 있다. 간섭 신호의 영향을 제거하고 정확한 표적의 입사각을 추정하기 위해서는 적응 빔형성이 필수적이다. 그러나 적응 빔형성을 수행할 경우 주엽으로 재밍신호가 입사하면 적응 패턴에서 주엽의 형태가 크게 왜곡된다. 따라서 주엽 재밍에 대한 특별한 대책이 필요하다.

Yu와 Murrow^[8]는 적응 어레이와 주엽제거기를 연속적으로 연결한 모노펄스 빔형성기의 구조를 제안하였다. 그림 2는 Yu와 Murrow가 제안한 모노펄스 빔형성기의 블록도이다. 이것은 앞단의 적응 어레이를 통하여 부엽으로 입사하는 재밍신호를 제거하고 뒷단의 주엽제거기가 잔존하는 주엽재밍을 제거한다. 이때 적응 어레이에서 빔형성시 주엽재밍의 영향으로 패턴

왜곡이 발생하는 것을 방지하기 위한 주엽보존방법 (MLM, mainlobe maintenance)이 필요하다.

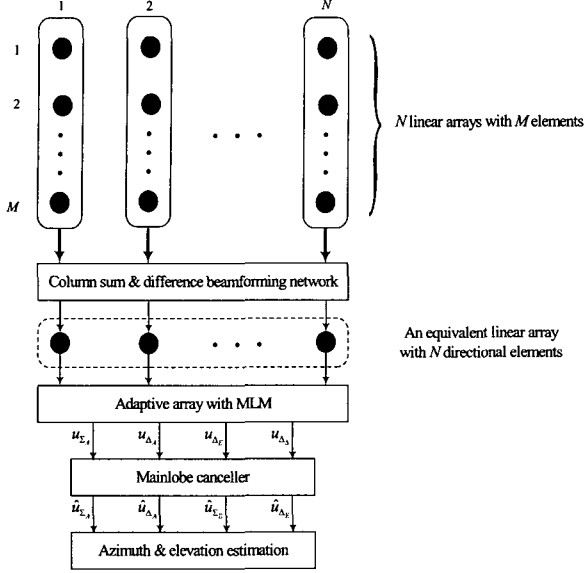


그림 2. Yu와 Murrow의 모노펄스 빔형성기
Fig. 2. Monopulse beamforming architecture proposed by Yu and Murrow.

방위각과 고도각 방향으로 각각 N 개와 M 개의 안테나 소자를 가지는 $M \times N$ 차원의 평면 어레이에서 Yu와 Murrow의 모노펄스 빔형성기의 동작은 다음과 같다. 먼저 각각 M 개의 안테나 소자를 가지는 N 개의 선형 어레이에 대해서 추적 방향으로 안테나 빔을 지향하여 다음과 같이 방위각 방향으로의 등가 선형 어레이의 합, 차 입력벡터를 생성시킨다.

$$\mathbf{u}_{\Sigma} = [u_{\Sigma}(1) \ u_{\Sigma}(2) \ \Lambda \ u_{\Sigma}(N)]^T \quad (13)$$

$$\mathbf{u}_{\Delta_e} = [u_{\Delta_e}(1) \ u_{\Delta_e}(2) \ \Lambda \ u_{\Delta_e}(N)]^T \quad (14)$$

합, 차 입력벡터는 부엽에 존재하는 재밍신호를 제거하기 위하여 빔형성 과정을 거쳐서 합 채널 출력 u_{Σ} , 방위각 차채널 출력 u_{Δ_s} , 고도각 차채널 출력 u_{Δ_e} , 차채널 출력 \hat{u}_{Δ_s} 을 얻는다. 각 채널 출력은 다음과 같이 주어진다.

$$\mathbf{u}_{\Sigma} = \hat{\mathbf{w}}_{\Sigma\Sigma}^H \mathbf{u}_{\Sigma_e} \quad (15)$$

$$\mathbf{u}_{\Delta_s} = \hat{\mathbf{w}}_{\Delta\Sigma}^H \mathbf{u}_{\Sigma_e} \quad (16)$$

$$\mathbf{u}_{\Delta_e} = \hat{\mathbf{w}}_{\Sigma\Delta}^H \mathbf{u}_{\Sigma_e} \quad (17)$$

$$\mathbf{u}_{\Delta_s} = \hat{\mathbf{w}}_{\Delta\Delta}^H \mathbf{u}_{\Sigma_e} \quad (18)$$

(18)식 (15)~(18)에서 사용된 각 채널의 가중치 벡터는 각각

$$\hat{\mathbf{w}}_{\Sigma\Sigma} = \mathbf{R}_{\Sigma_e}^{-1} \mathbf{w}_{\Sigma} \quad (19)$$

$$\hat{\mathbf{w}}_{\Delta\Sigma} = \mathbf{R}_{\Sigma_e}^{-1} \mathbf{w}_{\Delta} \quad (20)$$

$$\hat{\mathbf{w}}_{\Sigma\Delta} = \mathbf{R}_{\Delta_e}^{-1} \mathbf{w}_{\Sigma} \quad (21)$$

$$\hat{\mathbf{w}}_{\Delta\Delta} = \mathbf{R}_{\Delta_e}^{-1} \mathbf{w}_{\Delta} \quad (22)$$

이다. 여기에서 \mathbf{R}_{Σ_e} 와 \mathbf{R}_{Δ_e} 는 각각 합 입력벡터 \mathbf{u}_{Σ} 와 차 입력벡터 \mathbf{u}_{Δ_e} 의 공분산 행렬로서 다음과 같다.

$$\mathbf{R}_{\Sigma_e} = E[\mathbf{u}_{\Sigma_e}^H \mathbf{u}_{\Sigma_e}] \quad (23)$$

$$\mathbf{R}_{\Delta_e} = E[\mathbf{u}_{\Delta_e}^H \mathbf{u}_{\Delta_e}] \quad (24)$$

그리고 \mathbf{w}_{Σ} 와 \mathbf{w}_{Δ} 는 각각 원하는 고도각 방향으로의 합, 차 패턴을 지향하기 위해 사용되는 가중치 벡터이다.

적용 빔형성으로 인하여 주엽이 왜곡되는 것을 방지하기 위하여 빔형성시에 적절한 주엽보존방법을 사용하여야 한다. 주엽제한방법은 부공간 제한조건을 이용한 공분산행렬 생성(structured covariance matrix), 인위적잡음첨가(diagonal loading), 지배적인 모드 제거를 이용한 수정(modified dominant mode rejection), 주엽재밍 여파(mainlobe jammer filtering), 차단행렬(blocking matrix), 제일 순위 주엽재밍 감소(rank-1 mainlobe jammer down-dating) 기법 등이 있다[8]. 대표적인 주엽제한방법인 제일 순위 주엽재밍 감소기법은 입사신호로부터 얻은 실제 공분산 행렬에서 주엽재밍 성분을 제거한 공분산 행렬을 다음과 같이 얻는다.

$$\hat{\mathbf{R}} = \mathbf{R} - P_1 \mathbf{j}_1 \mathbf{j}_1^H \quad (25)$$

여기에서 \mathbf{R} 은 실제 입력신호를 통해서 추정된 공분산 행렬이며 P_1 과 \mathbf{j}_1 은 각각 주엽재밍에 해당하는 전력과 고유벡터를 나타낸다. 그리고 주엽재밍 성분이 제거된 추정 공분산 행렬을 이용하여 적용 빔형성에 사용되는 가중치 벡터를 얻는다.

적용 어레이의 빔형성시에 주엽제한조건을 만족시킬 경우 각 채널의 출력신호는 여전히 주엽재밍 신호를

포함한다. 잔존하는 주엽재밍 신호를 제거하기 위하여 주엽제거기가 사용된다. Applebaum은 모노펄스 비를 유지하면서 주엽재밍을 제거할 수 있는 주엽제거기를 제안하였다. 이는 주엽의 부근에서 높은 이득을 가지는 차 채널 신호를 사용하여 합 채널의 주엽재밍 신호를 제거한다. 그림 3에 모노펄스 주엽제거기의 구조를 나타내었다.

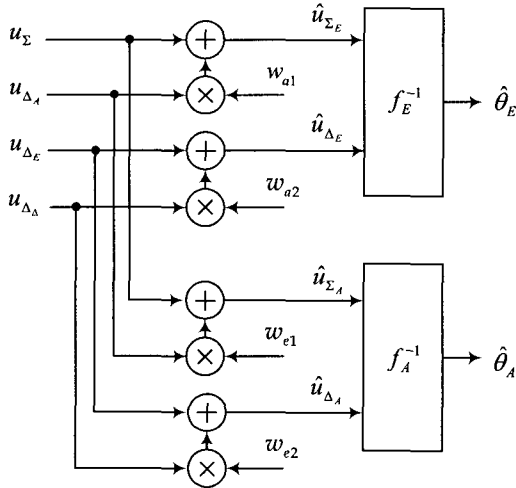


그림 3. 모노펄스 주엽제거기
Fig. 3. Monopulse mainlobe canceller.

모노펄스주엽제거기는 안테나 빔 패턴이 방위각과 고도각에 대한 패턴으로 구분될 수 있다는 원리를 이용한다. 따라서 각 채널의 빔 패턴은 다음과 같이 각각 방위각과 고도각 패턴의 결합으로 표현된다.

$$g_{\Sigma}(\theta_a, \theta_e) = g_{\Sigma}(\theta_a)g_{\Sigma}(\theta_e) \quad (26)$$

$$g_{\Delta_a}(\theta_a, \theta_e) = g_{\Sigma}(\theta_a)g_{\Delta}(\theta_e) \quad (27)$$

$$g_{\Delta_e}(\theta_a, \theta_e) = g_{\Delta}(\theta_a)g_{\Sigma}(\theta_e) \quad (28)$$

$$g_{\Delta_a}(\theta_a, \theta_e) = g_{\Delta}(\theta_a)g_{\Delta}(\theta_e) \quad (29)$$

여기서 $g_{\Sigma}(\theta_a, \theta_e)$, $g_{\Delta_a}(\theta_a, \theta_e)$, $g_{\Delta_e}(\theta_a, \theta_e)$, $g_{\Delta_a}(\theta_a, \theta_e)$ 는 각각 합 채널, 방위각 차 채널, 고도각 차 채널, 차 채널의 빔 패턴을 나타낸다. 그리고 $g_{\Sigma}(\theta_a)$ 와 $g_{\Delta}(\theta_a)$ 는 각각 방위각의 합, 차 패턴이며, $g_{\Sigma}(\theta_e)$ 와 $g_{\Delta}(\theta_e)$ 는 고도각의 합, 차 패턴이다.

주엽제거기의 고도각 방향의 합, 차 채널 출력은 각각 다음과 같이 얻는다.

$$\hat{u}_{\Sigma_e} = u_{\Sigma} - w_{a1}u_{\Delta_a} \quad (30)$$

$$\hat{u}_{\Delta_e} = u_{\Delta} - w_{a2}u_{\Delta_a} \quad (31)$$

여기서 w_{a1} 과 w_{a2} 는 각각 합, 차 채널의 출력 \hat{u}_{Σ_e} 와 \hat{u}_{Δ_e} 를 최소화시키기 위한 가중치이다. 즉, w_{a1} 과 w_{a2} 를 적응시켜서 잔존하는 주엽재밍 신호를 제거한다. 주엽재밍의 전력이 클 경우 w_{a1} 과 w_{a2} 는 거의 동일한 값을 가지므로 다음과 같이 근사화 시킬 수 있다.

$$w_a = w_{a1} \cong w_{a2} \quad (32)$$

식 (26)~(29)와 식 (32)를 이용하여 고도각 방향의 모노펄스 비를 다음과 같이 얻는다.

$$\begin{aligned} \hat{f}_E &= \frac{\hat{g}_{\Delta}(\theta_a, \theta_e)}{\hat{g}_{\Sigma}(\theta_a, \theta_e)} \\ &= \frac{g_{\Delta_e}(\theta_a, \theta_e) - w_a g_{\Delta_a}(\theta_a, \theta_e)}{g_{\Sigma}(\theta_a, \theta_e) - w_a g_{\Delta_a}(\theta_a, \theta_e)} \\ &= \frac{g_{\Delta}(\theta_e) \{g_{\Sigma}(\theta_a) - w_a g_{\Delta}(\theta_a)\}}{g_{\Sigma}(\theta_e) \{g_{\Sigma}(\theta_a) - w_a g_{\Delta}(\theta_a)\}} \\ &= \frac{g_{\Delta}(\theta_e)}{g_{\Sigma}(\theta_e)} \end{aligned} \quad (33)$$

여기서 고도각 방향으로의 모노펄스 비는 그대로 유지하면서 방위각 방향으로의 빔형성을 통하여 주엽재밍을 제거할 수 있음을 확인할 수 있다. 유사하게 방위각 방향의 모노펄스 비는 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} \hat{f}_A &= \frac{\hat{g}_{\Delta}(\theta_a, \theta_e)}{\hat{g}_{\Sigma}(\theta_a, \theta_e)} \\ &= \frac{g_{\Delta_a}(\theta_a, \theta_e) - w_e g_{\Delta_e}(\theta_a, \theta_e)}{g_{\Sigma}(\theta_a, \theta_e) - w_e g_{\Delta_e}(\theta_a, \theta_e)} \\ &= \frac{g_{\Delta}(\theta_a) \{g_{\Sigma}(\theta_e) - w_e g_{\Delta}(\theta_e)\}}{g_{\Sigma}(\theta_a) \{g_{\Sigma}(\theta_e) - w_e g_{\Delta}(\theta_e)\}} \\ &= \frac{g_{\Delta}(\theta_a)}{g_{\Sigma}(\theta_a)} \end{aligned} \quad (34)$$

식 (34)에서 w_e 는 방위각 방향의 합, 차 채널의 출력 \hat{u}_{Σ_a} 와 \hat{u}_{Δ_a} 를 최소화시키기 위해 사용되는 가중치이다. 식 (34)에서도 방위각 방향의 모노펄스 비를 유지하면서 고도각 방향의 빔형성을 통하여 주엽재밍을 제거함을 알 수 있다.

III. 방위각 및 고도각에서의 별도 모노펄스 빔형성을 이용한 모노펄스 입사각 추정

Yu와 Murrow가 제안한 적응 어레이와 주엽제거기를 결합한 모노펄스 빔형성기는 빔형성에 의한 주엽의 왜곡으로 인한 영향을 제거하면서 표적의 입사방향을 추정할 수 있다. 그러나 주엽제한방법을 빔형성 기법과 결합할 경우 고유치 분해와 같은 복잡한 신호처리 과정이 필요하다. 또한 다수의 주엽재밍이 존재할 경우 정확하게 주엽재밍의 입사각과 전력을 추정하기 어려우므로 성능이 크게 열화되는 문제점을 가진다.

본 논문에서는 이러한 문제를 해결하기 위하여 복잡한 주엽제한방법과 주엽제거기를 사용하지 않는 모노펄스 빔형성기를 제안한다. 제안한 모노펄스 빔형성기는 모노펄스 비를 가중치 적응과 무관하게 얻을 수 있어 빔형성으로 인한 편향이 발생하지 않는 장점을 가진다. 그림 4에 제안한 모노펄스 빔형성기의 구조를 나타내었다. 표적의 고도각 추정을 위하여 방위각 방향의 고정된 합, 차 패턴이 사용되고, 방위각 추정을 위하여 고도각 방향의 고정된 합, 차 패턴이 사용된다.

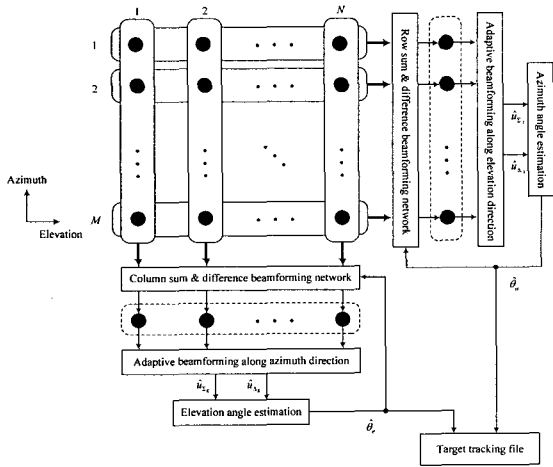


그림 4. 제안 모노펄스 빔형성기

Fig. 4. Proposed monopulse beamforming network.

방위각과 고도각 방향으로 각각 N 개와 M 개의 안테나 소자를 가지는 $M \times N$ 차원의 평면 어레이에서 제안 모노펄스 빔형성기의 동작은 다음과 같다. Yu와 Murrow의 모노펄스 빔형성기와 마찬가지로 먼저 각각 M 개의 안테나 소자를 가지는 N 개의 선형 어레이에 대해서 추적 고도각 방향으로 안테나 빔을 지향하여 방위각 방향으로의 등가 선형 어레이의 합, 차 입력벡터인 \mathbf{u}_Σ 와 \mathbf{u}_Δ 를 생성시킨다. 따라서, N 개 선형 어레이는 모두 고도각 방향으로 다음과 같은 동

일한 합, 차 패턴을 가진다.

$$\begin{aligned} g_{\Sigma_e}^{\text{fix}}(\theta_e) &= \mathbf{w}_{\Sigma_e}^H \mathbf{a}(\theta_e) \\ &= \sum_{m=0}^{M-1} w_{\Sigma_e}^*(m) \exp\{jm\beta\} \\ &= \sum_{m=0}^{M-1} \exp\{jm(\beta - \beta_e)\} \\ &= \frac{\sin\left\{\frac{M(\beta - \beta_e)}{2}\right\}}{\sin\left\{\frac{(\beta - \beta_e)}{2}\right\}} \exp\left\{j\frac{M(\beta - \beta_e)}{2}\right\} \end{aligned} \quad (35)$$

$$\begin{aligned} g_{\Delta_e}^{\text{fix}}(\theta_e) &= \mathbf{w}_{\Delta_e}^H \mathbf{a}(\theta_e) \\ &= \sum_{m=0}^{M-1} w_{\Delta_e}^*(m) \exp\{jm(\beta - \beta_e)\} \\ &= \sum_{m=0}^{M/2-1} j \exp\{jm(\beta - \beta_e)\} + \sum_{m=M/2}^{M-1} (-j) \exp\{jm(\beta - \beta_e)\} \\ &= \frac{2 \sin^2\left\{\frac{M(\beta - \beta_e)}{4}\right\}}{\sin\left\{\frac{(\beta - \beta_e)}{2}\right\}} \exp\left\{j\frac{M(\beta - \beta_e)}{2}\right\} \end{aligned} \quad (36)$$

여기서 \mathbf{w}_{Σ_e} 와 \mathbf{w}_{Δ_e} 는 고도각 θ_e 방향으로 합, 차 패턴을 지향하기 위해 사용되는 가중치 벡터이고, β_e 는 고도각 θ_e 방향으로 입사하는 신호의 소자간 위상차

$$\beta_e = \frac{2\pi}{\lambda} D \sin \theta_e \quad (37)$$

이다. 식 (35)과 (36)의 방위각 방향으로의 합, 차 패턴은 가중치 갱신에 의하여 얻어지는 적응 빔 패턴이 아니므로 입사신호와는 상관없이 단순히 지향 방향에 따라서 결정된다. 방위각 방향 배열된 등가 선형 어레이의 합, 차 입력 벡터인 \mathbf{u}_Σ 와 \mathbf{u}_Δ 에 존재하는 재밍 신호를 제거하기 위하여 방위각 방향으로 적응 빔형성을 수행한다. 방위각 방향의 지향각이 θ_a 일 경우 적응 빔형성에 사용되는 최적 가중치[2]는 다음과 같다.

$$\mathbf{w}_a = \frac{\mathbf{R}_a^{-1} \mathbf{a}(\theta_a)}{\mathbf{a}^H(\theta_a) \mathbf{R}_a^{-1} \mathbf{a}(\theta_a)} \quad (38)$$

여기서 \mathbf{R}_a 는 합 벡터 \mathbf{u}_Σ 의 공분산 행렬

$$\mathbf{R}_a = \mathbf{E}[\mathbf{u}_\Sigma^H \mathbf{u}_\Sigma] \quad (39)$$

이고 $\mathbf{a}(\theta_a)$ 는 방위각 θ_a 에 대한 어레이 응답벡터

$$\mathbf{a}(\theta_a) = [1 \quad \exp(j\beta_a) \quad \Lambda \quad \exp\{j(N-1)\beta_a\}]^T \quad (40)$$

이다. 여기서 β_a 는 방위각 θ_a 방향으로 입사하는 신호의 소자간 위상차

$$\beta_a = \frac{2\pi}{\lambda} D \sin \theta_a \quad (41)$$

이다. 최적 가중치를 이용하여 다음과 같은 합, 차 출력을 얻는다.

$$y_{\Sigma} = \mathbf{w}_a^H \mathbf{u}_{\Sigma} \quad (42)$$

$$y_{\Delta} = \mathbf{w}_a^H \mathbf{u}_{\Delta} \quad (43)$$

이때 방위각 방향으로의 빔 패턴은 다음과 같이 주어진다.

$$g_{\Sigma}(\theta_a) = \mathbf{w}_a^H \mathbf{a}(\theta_a) = \sum_{n=0}^{N-1} w_n^* \exp\{jn\beta\} \quad (44)$$

방위각 방향의 빔 패턴은 식 (35)와 (36)의 고정된 빔 패턴과는 달리 적응 빔형성에 의하여 생성되므로 패턴의 모양이 일정하지 않고 입사신호에 의하여 달라진다. 특히, 주엽재밍이 존재할 경우에는 주엽부근의 패턴이 크게 왜곡될 수 있다.

식 (35), (36)과 (44)를 결합하여 고도각 방향으로의 합, 차 출력의 빔 패턴을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$G_{\Sigma}(\theta_a, \theta_e) = g_{\Sigma_e}^{\text{fix}}(\theta_e) g_{\Sigma_a}(\theta_a) \quad (45)$$

$$G_{\Delta}(\theta_a, \theta_e) = g_{\Delta_e}^{\text{fix}}(\theta_e) g_{\Sigma_a}(\theta_a) \quad (46)$$

식 (45)와 (46)의 비를 구할 경우 다음과 같은 편향이 없는 고도각 방향의 모노펄스 비를 구할 수 있다.

$$f_e(\theta_e) = \frac{G_{\Delta}(\theta_a, \theta_e)}{G_{\Sigma}(\theta_a, \theta_e)} = \frac{g_{\Delta_e}^{\text{fix}}(\theta_e) g_{\Sigma_a}(\theta_a)}{g_{\Sigma_e}^{\text{fix}}(\theta_e) g_{\Sigma_a}(\theta_a)} = \frac{g_{\Delta_e}^{\text{fix}}(\theta_e)}{g_{\Sigma_e}^{\text{fix}}(\theta_e)} \quad (47)$$

즉 방위각에 대한 적응 빔형성을 수행하여 방위각으로의 패턴을 변화시켜서 주엽재밍을 비롯한 원치 않는 신호를 제거하고 고도각에 대해서는 고정된 빔형성을 수행함으로써 패턴 왜곡을 방지한다. 따라서 표적의

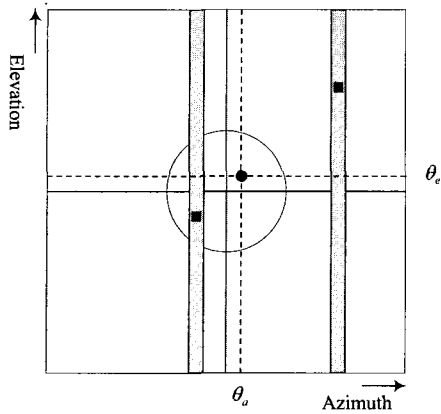
방위각은 패턴의 왜곡으로 인하여 정확히 추정할 수 없으나 고도각은 빔 형성으로 인한 편향이 전혀 발생하지 않으므로 정확한 각도를 추정할 수 있다.

표적의 방위각은 방위각 방향의 합, 차 채널을 이용하여 동일한 방법으로 얻을 수 있다. 즉, 방위각 방향의 합, 차 채널에서는 고도각 방향으로 적응 빔형성을 수행하여 재밍 신호를 제거하고 방위각에 대해서는 고정된 빔형성을 수행하므로 표적의 방위각을 편향 없이 정확히 추정할 수 있다. 표적 방위각 방향의 모노펄스 비는 다음과 같다.

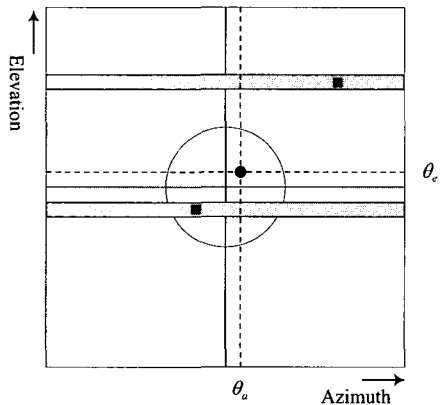
$$f_a(\theta_a) = \frac{G_{\Delta_e}(\theta_a, \theta_e)}{G_{\Sigma}(\theta_a, \theta_e)} = \frac{g_{\Delta_e}^{\text{fix}}(\theta_a) g_{\Sigma_e}(\theta_e)}{g_{\Sigma_e}^{\text{fix}}(\theta_a) g_{\Sigma_e}(\theta_e)} = \frac{g_{\Delta_e}^{\text{fix}}(\theta_a)}{g_{\Sigma_e}^{\text{fix}}(\theta_a)} \quad (48)$$

그림 5에 제안한 방위각과 고도각에서의 별도 모노펄스 빔형성에 의한 표적 입사각 추정 방법을 사용할 경우의 적응 패턴의 형태를 나타내었다. 그림 5(a)와 같이 방위각 방향으로 적응 모노펄스 빔형성을 수행할 경우 방위각으로 재밍 신호에 대하여 패턴 널이 형성된다. 이때 표적 입사각의 고도각으로는 패턴의 형태가 일정하게 유지된다. 그림 5(b)의 고도각 방향의 모노펄스 빔형성에서는 고도각 방향으로 패턴 널이 형성되고 방위각으로의 패턴 형태는 변하지 않는다. 이처럼, 각기 별도의 빔형성과 입사각 추정을 통해서 표적 추정시 편향을 방지하면서 정확하게 입사각을 알 수 있다.

제안한모노펄스 빔 형성기법은 식 (47)과 (48)을 이용하여 표적의 방위각과 고도각을 별도의 방위각과 고도각으로의 모노펄스 빔형성을 통하여 정확히 얻을 수 있다. 기존의 모노펄스 입사각 추정기법과 달리 적응 빔형성에 의한 가중치와는 상관없이 입사각을 추정할 수 있으므로 모노펄스 비를 매번 계산할 필요 없이 미리 설정 시켜 놓은 값을 룩업 테이블(look-up table)에 저장하여 사용할 수 있으므로 계산량을 크게 감소시킬 수 있다. 또한 다수의 주엽재밍이 존재할 경우에도 우수한 성능을 보장하며 적응 빔형성으로 인한 입사각 추정시의 편향이 발생하지 않으므로 보다 정확하게 빠르게 이동하는 표적을 추적할 수 있다.



(a) 방위각 방향 적응 빔 형성



(b) 고도각 방향 적응 빔 형성

그림 5. 제안한 모노펄스 빔형성 알고리즘 적용시 안테나 빔 패턴의 형태 ('동그라미': 표적 입사각, '네모': 재밍 입사각)
(a) 방위각 방향 적응 빔형성, (b) 고도각 방향 적응 빔형성

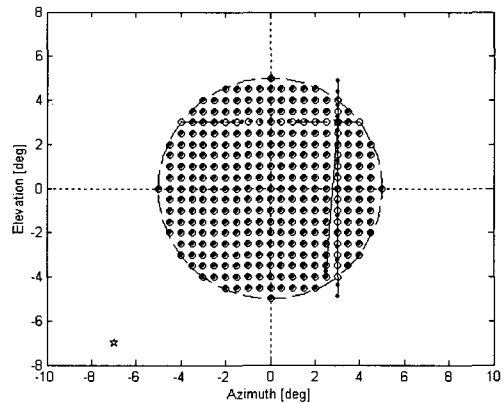
Fig. 5. Conceptual adapted beam patterns of the proposed monopulse beamforming network. ('동그라미': Target, '네모': Jamming)
(a) Adaptive beamforming along the azimuth, (b) Adaptive beamforming along the elevation
(●: 표적 입사각, ■: 재밍 입사각)

IV. 성능 분석

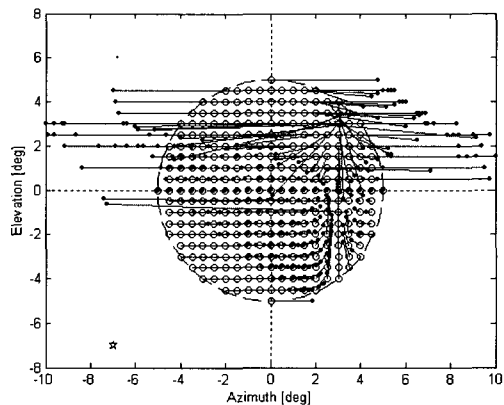
모의실험을 통하여 제안한 모노펄스 빔형성기법의 성능을 분석하였다. 안테나 소자의 간격이 가로, 세로 방향으로 동일하게 입사신호의 반파장 간격으로 배치된 평면 어레이를 사용하였다. 평면 어레이의 구조는 모두 100개의 안테나 소자를 사용한 10×10 배열이다. 표적의 신호 대 잡음비(signal to noise ratio)는 5dB로 설정하였으며 주엽내에서 1° 간격으로 방위각과 입사각을 이

동시켰다. 두개의 주엽재밍과 하나의 부엽재밍을 입사시켰다. 주엽재밍의 간섭 대 잡음비(interference to noise ratio)는 모두 30dB로 설정하였으며 입사각은 각각 방위각 3°, 고도각 3°와 방위각 -7°, 고도각 -7°이다. 그리고 간섭 대 잡음비 40dB의 부엽재밍이 방위각 50°, 고도각 -35°로부터 입사한다. 입사신호의 전력은 각 안테나 소자에서 발생하는 잡음 전력을 기준으로 표준화시킨 값이다. 안테나 빔 패턴의 지향 방향(tracking axis)은 방위각, 고도각 모두 0°이다.

그림 6은 기존의 Yu와 Murrow의 모노펄스 빔형성기와 제안한 모노펄스 빔형성기를 이용할 경우에 추정된 표적의 편향을 나타낸다. 실제 표적 입사각은 작은 원이며 추정된 표적 입사각은 각각의 작은 원과 직선으로



(a) 제안 모노펄스 빔형성



(b) 기존 모노펄스 빔형성

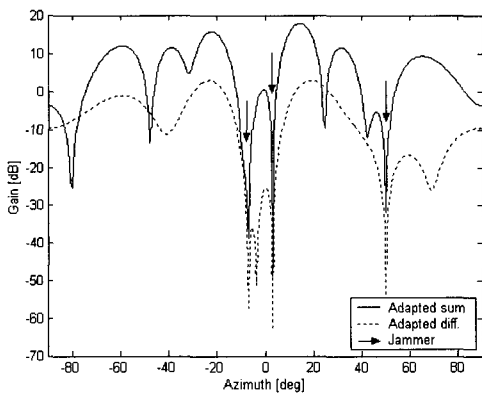
그림 6. 입사각 추정 (a) 제안 모노펄스 빔형성, (b) 기존 모노펄스 빔형성

Fig. 6. Angle estimation (a) Proposed monopulse beamforming network, (b) Conventional monopulse beamforming network.

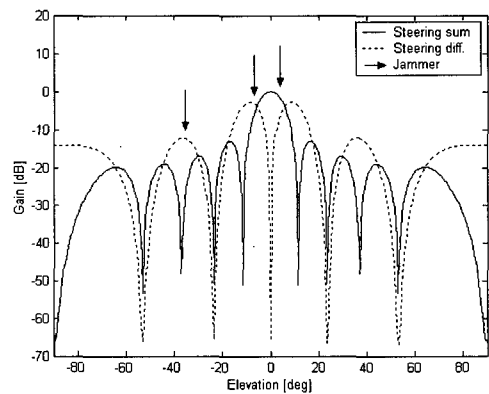
연결되어 있는 점이다. 점선으로 나타낸 큰 둥근 원은 안테나 패턴 상에서의 주빔의 폭(-3 dB beamwidth)을 나타낸다. 주엽재밍의 입사각은 별표로 나타내었다. 그림 6(a)에서 기존의 모노펄스 빔형성기를 사용할 경우 부엽재밍의 영향으로 추정된 표적 입사각에 많은 편향이 존재함을 알 수 있다. 반면에 제안한 모노펄스 빔형성기를 사용할 경우 주빔 내에 존재하는 주엽재밍 근처에서만 약간의 편향이 발생할 뿐 거의 모든 입사각에서 편향이 발생하지 않았다. 즉, 비록 2개의 주엽재밍이 존재하지만 제안 모노펄스 빔형성 기법은 입사각 추정시 적용된 가중치와는 상관없이 입사각을 추정하므로 편향이 발생하지 않음을 확인할 수 있다.

그림 7은 방위각 방향에서의 적응 빔형성을 통한 표적의 고도각 추정 결과이다. 그림 7(a)의 방위각·방향의 적응 합, 차 패턴에서 주엽재밍과 부엽재밍의 방향으로 패턴 널이 형성되었다. 주엽재밍을 제거하기

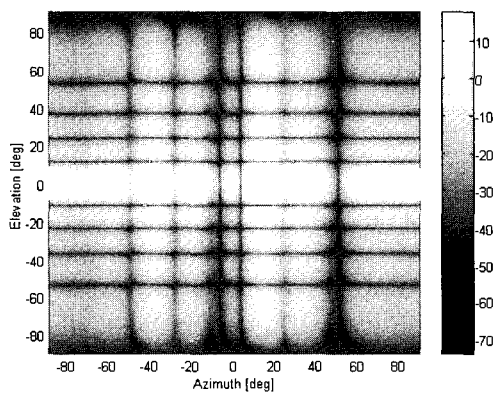
위하여 주엽의 형태가 크게 변형되므로 표적의 방위각 추정이 곤란하다. 그러나 그림 7(b)의 고도각 방향의 지향 합, 차 패턴에서는 고도각 방향으로 적응 빔형성을 하지 않으므로 주엽의 형태가 일정하게 유지됨을 확인할 수 있다. 지향 방향 주위에 표적과 주엽재밍이 입사하고 부엽재밍이 입사하지만 방위각 방향의 적응 빔형성을 통하여 원치 않는 간섭을 제거시킴으로 표적의 고도각은 그림 7(b)의 합, 차 패턴과 합, 차 채널의 출력을 이용하여 추정할 수 있다. 그림 7(c)에 합 채널 출력 적응 패턴을 나타내었다. 주엽재밍의 방위각인 -7° , 3° 와 부엽재밍의 방위각인 50° 방향으로 모든 고도각에 걸쳐서 패턴 널이 형성되었다. 그림 7(d)는 표적이 방위각 -2° , 고도각 0° 에서 입사할 경우의 고도각 추정을 위한 모노펄스 비 곡선과 출력 합, 차 채널의 비 값이다. 표적의 고도각 0° 에서 두 값이 정확히 일치한다.



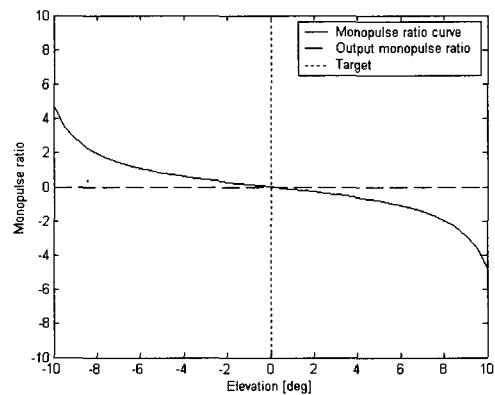
(a) 방위각 적응 패턴



(b) 고도각 지향 패턴



(c) 합 채널 출력 패턴



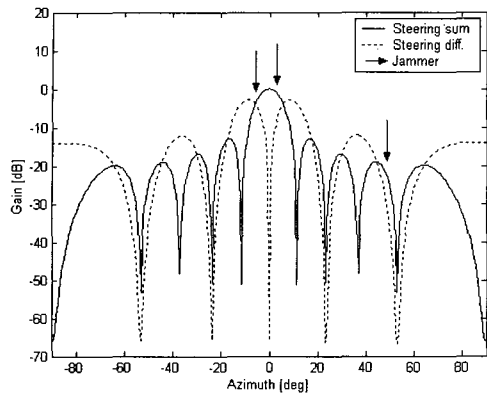
(d) 고도각 추정

그림 7. 방위각 방향 적응 빔형성을 통한 표적 고도각 추정

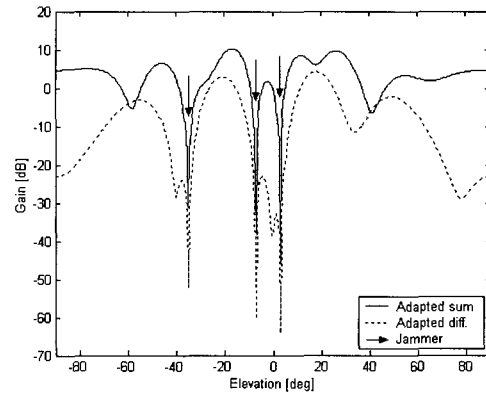
(a) 방위각 적응 패턴, (b) 고도각 지향 패턴, (c) 합 채널 출력 패턴, (d) 고도각 추정

Fig. 7. Elevation estimation using adaptive beamforming along the azimuth

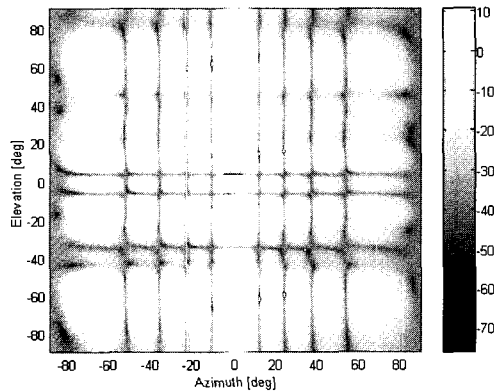
(a) Adapted beam pattern along the azimuth, (b) Steering beam pattern along the elevation, (c) Sum channel beam pattern, (d) Elevation estimation



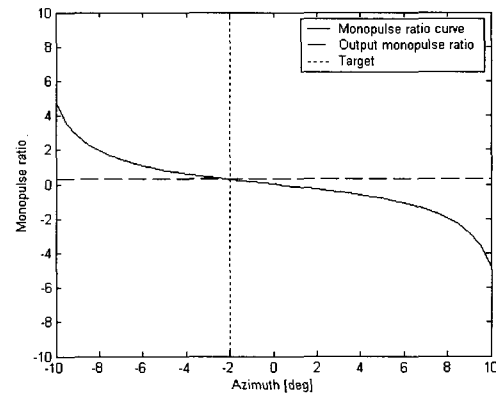
(a) 방위각 지향 패



(b) 고도각 적응 패



(c) 합 채널 출력 패턴



(d) 방위각 추정

그림 8. 고도각 방향 적응 빔형성을 통한 표적 방위각 추정결과

Fig. 8. Azimuth estimation using adaptive beamforming along the elevation (a) Steering beam pattern along the azimuth, (b) Adapted beam pattern along the elevation, (c) sum channel beam pattern, (d) Azimuth estimation

그림 8은 고도각 방향에서의 적응 모노펄스 빔형성 결과이다. 그림 8(a)는 방위각 방향의 지향 패턴이고, 그림 8(b)는 고도각 방향의 적응 패턴이다. 방위각 방향의 적응 빔형성과 반대로 방위각 방향으로 패턴이 일정하게 유지되고 고도각 방향으로 패턴의 형태가 크게 변형된다. 그림 8(c)에서 주엽재밍의 고도각인 3° , -7° 와 부엽재밍의 고도각 -35° 방향으로 모든 방위각에 걸쳐서 패턴 널이 형성됨으로써 원치 않는 간섭신호가 모두 제거됨을 보여준다. 그림 8(d)는 표적이 방위각 -2° , 고도각 0° 에서 입사할 경우의 표적 방위각 추정 결과이다. 표적의 방위각 -2° 로 정확히 추정하였다.

V. 결론

본 논문에서는 재밍신호가 존재할 경우에 표적의 추출과 입사각 추정을 위한 모노펄스 빔형성 알고리즘을 제안하였다. 제안한 모노펄스 빔형성 알고리즘은 다수의 주엽재밍이 존재할 경우에도 표적의 입사각 추적이 가능하다. 또한 주엽제거기나 복잡한 주엽제한 조건을 사용하지 않고 적응된 빔 패턴에 관계없이 모노펄스 비 곡선을 얻으므로 계산량이 적고 구현이 간단하다. 제안한 알고리즘은 군사용 레이다 뿐만 아니라 상용 이동통신 환경에서도 원하는 신호만을 수신하고 입사각을 추정하기 위한 수신기에 사용될 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] B. R. Mahafza, *Radar Systems Analysis and Design Using MATLAB*, Boca Raton, FL: Chapman & Hall/CRC, 2000.
- [2] R. T. Compton, *Adaptive Antennas, Concepts and Performance*, Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1988.
- [3] R. A. Monzingo and T. W. Miller, *Introduction to Adaptive Arrays*, NY: Wiley-Interscience Publication, 1980.
- [4] B. Widrow and S. D. Stearns, *Adaptive Signal Processing*, Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1985.
- [5] R. C. Davies, et al, "Angle estimation with adaptive arrays in external noise field," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 12, no. 2, pp. 179-186, Mar. 1976.
- [6] U. Nickel, "Monopulse estimation with adaptive arrays," *IEE Proc. Radar, Sonar Navig.*, vol. 140, no. 5, pp. 303-308, Oct. 1993.
- [7] A. S. Paine, "Minimum variance monopulse technique for an adaptive phased array radar," *IEE Proc. Radar, Sonar Navig.*, vol. 145, no. 6, pp. 374-380, Dec. 1998.
- [8] K. B. Yu and D. J. Murrow, "Adaptive digital beamforming for angle estimation in jamming," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 37, no. 2, pp. 508-523, Apr. 2001.

저 자 소 개

문 성 훈(학생회원) 제36권 S편 제2호 참조
현재 : 경북대학교 대학원 전자공학과 박사과정

조 명 제(정회원) 제35권 S편 제10호 참조
현재 : 국방과학연구소 선임연구원

한 동 석(정회원) 제35권 S편 제 10호 참조
현재 : 경북대학교 전자전기공학부 부교수