

GSC 기반 모노펄스 레이더용 클러터 추정 알고리즘

A Clutter Estimation Algorithm Applicable to GSC Based Monopulse Radar

김나용 · 전현무 · 배창식 · 박규철* · 정용식 · 양훈기

Na-Yong Kim · Hyeon-Mu Jeon · Chang-Sik Bae · Gyu-Churl Park* · Young-Seek Chung · Hoon-Gee Yang

요 약

레이더의 레이돔 형상으로 인한 플래쉬 부엽(flash lobe)으로 인해 수신신호에는 표적 성분 외에 클러터(clutter) 성분이 포함된다. 클러터는 제머와 달리 표적성분과 동일한 시간에 입력될 수 있으므로 이 경우 조향방향과 표적방향의 방향오차를 추정하는 모노펄스(monopulse) 레이더의 성능 열화를 일으킨다. 본 논문에서는 클러터 환경에서 GSC(Generalized Sidelobe Canceller) 기반 모노펄스 레이더 시스템의 성능을 개선할 수 있는 클러터 추정 알고리즘을 제시한다. 직교투영(orthogonal projection) 과정을 반복하는 알고리즘에 의해 클러터 추정 성능이 개선될 수 있는 근거를 제시하며 시뮬레이션에 의해 클러터 추정 과정이 포함된 GSC 기반 시스템이 기존 모노펄스 시스템보다 방향 추정 성능을 개선할 수 있음을 보인다.

Abstract

Due to the existence of flash lobe caused by the radome structure, a radar return in general contains clutter component added to target echo. Unlike jammer, clutter is apt to simultaneously coexist with target echo, which hinders a monopulse radar from estimating the angle difference between target echo direction and radar steering direction. In this paper, we propose a clutter estimation algorithm applicable to generalized sidelobe canceller(GSC) based monopulse radar. We show that clutter estimation can be achieved via iterative process of the orthogonal projections. Through simulations, the proposed GSC-based system combined with the clutter estimation can outperform the conventional monopulse system in terms of target angle estimation.

Key words: Radar, Monopulse, Generalized Sidelobe Canceller

I. 서 론

항공용 레이더의 레이돔 형상에 의해 조향방향과 다른 방향에서 플래쉬 부엽이 발생하며, 플래쉬 부엽 방향으로 입력되는 클러터 성분은 표적신호와 동시에 입력될 수 있다^{[1][2]}. 이 경우 간섭신호만을 포함한 공분산 행렬(cova-

riance matrix)을 얻을 수 없으므로 기본적으로 최대우도 기반 모노펄스 기법^{[3][4]}을 적용할 수 없다. 간섭 성분이 표적신호와 동시에 존재하는 환경에서 평면(planar) 배열 구조 안테나를 사용하는 경우, 합빔(sum beam)과 차빔(difference beam)이 방위각, 고각 방향으로 분리될 수 있는 성질을 이용해서 주엽 제머를 억제하면서 모노펄스 성능

「본 연구는 국방과학연구소의 연구비 지원에 의한 연구 결과임.」

광운대학교 전자공학과(Department of Electronics Convergence Engineering, Kwangwoon University)

*국방과학연구소(Agency for Defense Development)

· Manuscript received April 24, 2017 ; Revised May 31, 2017 ; Accepted July 3, 2017. (ID No. 20170424-039)

· Corresponding Author: Hoon-Gee Yang (e-mail: hgyang@kw.ac.kr)

을 개선하는 방법이 제시되었다^[5]. 조향방향과 표적방향의 방위각 오차가 적을수록 간섭환경에서 방향 추정 성능이 우수한 GSC(Generalized Sidelobe Canceller) 구조로 모노펄스 시스템을 구현하는 방법도 제시되었다^[6]. 제시된 방법에서는 조향 방향과 표적 방향이 유사한 경우, GSC 구조의 차단 행렬(blocking matrix) 설계 등 구체적인 구현 방법이 제시되어 있지 않다. 또한 GSC 구조의 블로킹 매트릭스 설계를 다룬 연구는 있으나, 모노펄스 시스템과는 별개의 간섭 억제 관련 연구다^[7].

본 논문에서는 표적 방향과 조향 방향이 유사한 경우에도 GSC 기반 모노펄스의 성능 열화를 막을 수 있도록 클러터 추정부가 추가된 GSC 기반 모노펄스 시스템을 제안한다. II장에서 시스템 구조를 제시하고, III장에서 클러터 추정 알고리즘을 제시하며, IV장에서 시뮬레이션 결과를 보인다.

II. 시스템 구조

선형 배열 안테나를 가진 항공용 모노펄스 레이더가 고도각/방위각 θ_T 의 표적에 펄스를 송신하는 2차원 환경을 고려하자. 레이더의 조향 방향은 표적 근처 θ_S 방향을 조향하고 있고, 송신 펄스에 대한 레이더 수신 신호에는 표적신호 외에도 레이더에 의한 플래쉬 부엽 방향으로 복소 진폭을 갖는 클러터가 입력되고 있다. 본 논문에서는 편이상 고도/방위 방향으로의 표적방향을 추정하는 2차원 환경으로 한정하였으며, 제시된 결과는 3차원 환경에 동일하게 적용이 가능하다.

그림 1은 GSC 기반의 모노펄스 시스템 구조이다. \mathbf{a}_Σ 와 \mathbf{a}_Δ 는 각각 조향방향을 위한 합빔 및 차빔 가중치 벡터이며, B_Σ , B_Δ 는 조향방향 성분을 억제하는 차단 행렬로서 $B_\Sigma^H \mathbf{a}_\Sigma = 0$, $B_\Delta^H \mathbf{a}_\Delta = 0$ 을 만족한다. n 번째 송신 펄스에 대한 수신 신호를 $\mathbf{z}(n)$ 이라 하자. 이 때 $\mathbf{z}(n)$ 에 대해서 계산된 GSC 구조의 합채널 및 차채널의 출력 값 e_Σ , e_Δ 은 다음 식으로 계산된다.

$$e_\Sigma = \mathbf{a}_\Sigma^H \mathbf{z}(n) - \mathbf{w}_\Sigma^H B_\Sigma^H \mathbf{z}(n). \quad (1)$$

$$e_\Delta = \mathbf{a}_\Delta^H \mathbf{z}(n) - \mathbf{w}_\Delta^H B_\Delta^H \mathbf{z}(n). \quad (2)$$

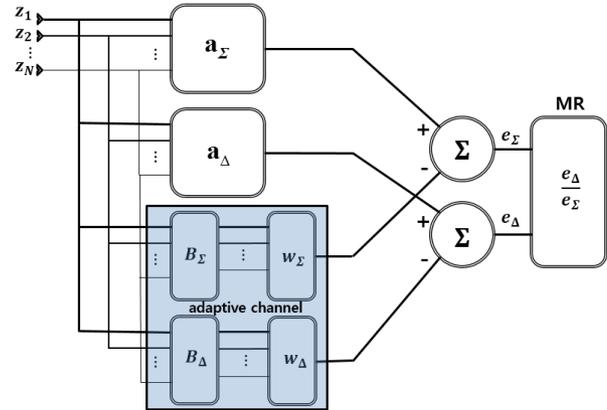


그림 1. GSC 기반의 모노펄스 시스템 블록도
Fig. 1. GSC based monopulse system block diagram.

여기서 \mathbf{w}_Σ , \mathbf{w}_Δ 는 적응형 가중치를 나타내며, 차단행렬이 표적 성분을 완벽히 차단하여 클러터 성분만으로 트레이닝시킨 후, 표적신호와 클러터신호가 포함된 수신신호를 입력할 때 우수한 간섭 억제 성능을 가질 수 있다.

실제 환경에서 θ_S 와 θ_T 는 유사한 값을 가지나 두 값의 차이가 존재하며 이에 따라 차단행렬을 통과하는 표적 성분에 의해 최적의 가중치 값을 찾을 수 없다. 그러므로 III장에서는 수신신호로부터 표적 성분이 억제된 클러터 성분을 추정하는 전처리 과정을 제시하며, 여기서 얻어진 결과가 가중치 계산에 적용될 것이다.

III. 클러터신호 추정

N 개 소자의 선형배열 안테나에서 θ_a 와 θ_b 의 방향에서 입사되는 신호 $\mathbf{a}(\theta_a)$ 와 $\mathbf{a}(\theta_b)$ 는 안테나의 소자간격이 $\lambda/2$ 인 경우 $\sin(\theta_a) - \sin(\theta_b) = 2/N$ 를 만족하면 서로 직교(orthogonal)한다. 그러므로 $(-\pi, \pi)$ 구간을 스패(span)하는 직교조건을 만족하는 K 개의 기저벡터(basis vector)를 구성할 수 있다.

$$\{\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \dots, \mathbf{a}_i, \dots, \mathbf{a}_j, \dots, \mathbf{a}_k\}. \quad (3)$$

여기서 $\mathbf{a}_i = \mathbf{a}(\theta_i)$ 는 다음과 같이 N 개의 배열소자로 구성되는 스티어링(steering) 벡터다.

$$\mathbf{a}(\theta_i) = [\exp(j\pi \sin \theta_i) \dots \exp(j\pi N \sin \theta_i)]^T. \quad (4)$$

또한 \mathbf{a}_i 와 \mathbf{a}_j 에 대해서 $\sin(\theta_i) - \sin(\theta_j) = \frac{2}{N}(i-j)$ 가 성립하여 \mathbf{a}_i 와 \mathbf{a}_j 의 내적, 즉 $\mathbf{a}_i^H \mathbf{a}_j = 0$ 이다. 이하 기술에서는 편의상 시간 변수 n 은 생략하였다. \mathbf{z} 는 식 (5)와 같이 표적신호 \mathbf{z}_T 와 클러터신호 \mathbf{z}_C 의 합으로 표현할 수 있다.

$$\mathbf{z} = \mathbf{z}_T + \mathbf{z}_C = \gamma_T \mathbf{a}(\theta_T) + \gamma_C \mathbf{a}(\theta_C). \quad (5)$$

여기서 상수 γ_T 와 γ_C 는 각각 표적신호와 클러터신호의 복소 진폭 값이고, θ_T 와 θ_C 는 표적신호와 클러터신호의 입사방향이다. I장에서 언급했듯이 플래쉬 부엽에 의한 클러터 입사각도 θ_C 는 조향방향과 상당히 떨어져 있다고 가정한다. 표적이 입사하는 방향 θ_T 에 대한 조향벡터 $\mathbf{a}(\theta_T)$ 는 다음과 같은 K개의 직교기저벡터들의 선형조합으로 표현될 수 있다.

$$\mathbf{a}(\theta_T) = \beta_1 \mathbf{a}_1 + \dots + \beta_k + \dots + \beta_{i-1} \mathbf{a}_{i-1} + \beta_i \mathbf{a}_i + \beta_{i+1} \mathbf{a}_{i+1} + \dots + \beta_K \mathbf{a}_K \quad (6)$$

여기서 β_k 는 상수 값이며, 표적신호 방향과 조향방향은 일반적으로 유사하므로 $\mathbf{a}(\theta_T)$ 는 $\mathbf{a}(\theta_S)$ 와 가장 근사하다고 할 수 있다. 만약 기저벡터 중 \mathbf{a}_i 가 $\mathbf{a}(\theta_S)$ 와 가장 유사하다면 \mathbf{a}_i 의 계수값 β_i 는 $\max_{\forall j} |\beta_j| = |\beta_i|$, $j = 1, \dots, K$ 를 만족한다.

식 (7)은 직교투영(orthogonal projection)을 이용해서 \mathbf{z} 로부터 \mathbf{a}_i 성분을 제거하는 과정을 나타낸다.

$$\hat{\mathbf{z}}_C = \mathbf{z} - [\mathbf{z}^H \mathbf{a}_i] \mathbf{a}_i / N. \quad (7)$$

\mathbf{a}_i 성분을 제거해서 얻어진 $\hat{\mathbf{z}}_C$ 는 표적신호 성분 일부가 제거되었으므로 실제 클러터 벡터 \mathbf{z}_C 와의 유클리드(Euclidean) 거리를 비교해 보면 $|\hat{\mathbf{z}}_C - \mathbf{z}_C| \leq |\mathbf{z} - \mathbf{z}_C|$ 가 성립한다. 즉, 수신신호 벡터로부터 표적 성분을 제거함으로써 클러터 성분 추정 가능성이 가능하다. θ_S 와 θ_T 의 오차가 증가하면 $\mathbf{a}(\theta_T)$ 에는 \mathbf{a}_i 외에 주변 다른 성분, 즉 \mathbf{a}_{i-1} , \mathbf{a}_{i+1} 등을 포함할 수 있으므로 다음과 같은 과정을 반복할 수 있다.

$$\hat{\mathbf{z}}_{C1} = \hat{\mathbf{z}}_C - [\hat{\mathbf{z}}_C^H \mathbf{a}_{i+1}] \mathbf{a}_{i+1} / N. \quad (8)$$

$$\hat{\mathbf{z}}_{C2} = \hat{\mathbf{z}}_{C1} - [\hat{\mathbf{z}}_{C1}^H \mathbf{a}_{i-1}] \mathbf{a}_{i-1} / N. \quad (9)$$

θ_S 와 θ_T 의 오차가 $2/N$ 보다 크지 않다면 클러터 성분 추정 과정은 추가적인 \mathbf{a}_{i-1} , \mathbf{a}_{i+1} 두 신호 성분 제거로 충분하다.

IV. 시뮬레이션

시뮬레이션은 중심주파수가 10 GHz에서 64개의 배열 소자를 갖는 선형배열 안테나 모노펄스 시스템을 가정하였다. 그림 2는 클러터 추정 성능을 보여주는 시뮬레이션 결과로서 조향방향은 23° 이고 -50° 에서 클러터신호가 SCR(Signal Clutter Ratio) -10 dB의 전력으로 표적신호와 함께 입사되고 있다. 그림 2(a)와 그림 2(b)는 표적신호가 각각 23.2° , 23.7° 에서 입사하는 상황에서 추정된 클러터 $\hat{\mathbf{z}}_C$ 와 $\hat{\mathbf{z}}_{C2}$ 의 스펙트럼을 비교한 것이다. 그림 2(a)와 그림 2(b) 두 경우 모두 정사영에 의한 표적 성분 억제가 충분히 되었으며, 특히 조향방향의 오차가 0.7° 인 그림 2(b)의 경우, 추가적인 정사영에 의해 표적 성분이 충분히 억제되어 성공적인 클러터 추정이 가능하였다.

그림 3은 기존 모노펄스와 제안한 기법을 MR 커브(monopulse ratio curve) 측면에서 비교한 결과이다. MR 커브는 클러터가 없는 경우와 클러터가 존재하는 환경에서 각각 얻었으며 클러터가 없는 경우의 MR 커브를 룩-업 테이블(look-up table)로 저장하고 이를 기준으로 방향오차를 추정하는 시스템이므로 두 커브의 차이가 작을수록 성능이 우수하다고 할 수 있다. 조향방향 및 클러터 입사 방향은 동일하게 23° , -50° 로 고정시키고 표적 방향을

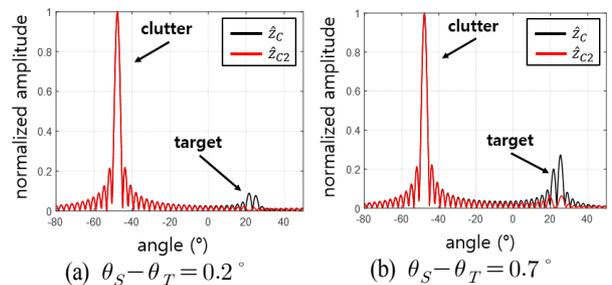
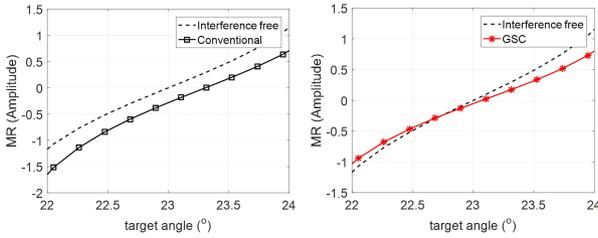


그림 2. 방향오차에 따른 $\hat{\mathbf{z}}_C$ 와 $\hat{\mathbf{z}}_{C2}$ 의 스펙트럼
Fig. 2. Spectra of $\hat{\mathbf{z}}_C$ and $\hat{\mathbf{z}}_{C2}$ with directional error.



(a) 기존 모노펄스 기법
(a) Conventional monopulse technique
(b) 제안한 GSC기반의 모노펄스 기법
(b) Proposed GSC based monopulse technique

그림 3. MR 커브
Fig. 3. Monopulse ratio curve.

22°에서 24°까지 변화시키면서 모노펄스 출력을 얻었다. 제시된 방법은 기존 방법에 비해 클러터가 있는 경우와 없는 경우 두 커브의 차이가 작으므로 조향방향과 표적 방향의 오차를 보다 잘 추정할 수 있음을 알 수 있다.

그림 4는 클러터 입사방향을 -10°부터 -70°까지 바꾸어가며 SCR에 따른 조향방향과 표적방향의 오차에 대한 Mean Absolute Error(MAE)를 나타낸다. 여기서 MAE는 3 dB 빔폭안에 존재하는 표적의 실제 방향과 추정 방향의 오차에 대한 절대 값의 평균치이다. 제안한 방법이 클러터 입사방향과 무관하게 더 작은 MAE 값을 가짐을 확인할 수 있었으며 특히 클러터가 강한 경우(SCR=-15 dB)에서 더 효과적이었다.

V. 결 론

본 논문에서는 효과적인 클러터 억제로 기존 방식에 비해 방향 추정 성능이 우수한 GSC 기반 모노펄스 레이더 시스템을 제안하였다. 시뮬레이션 결과 제시된 방법은 플래쉬 부엽으로 인해 입사되는 클러터신호의 전력이 증가하는 환경에서도 0.3° 이하의 추정오차를 가지나, 시간적으로는 하나의 펄스 응답만을 이용한 방식이다. 클러터 신호의 입사방향이 표적방향과 가까운 경우에도 우수한 성능을 보이기 위해서는 다수의 펄스를 사용하는 시공간

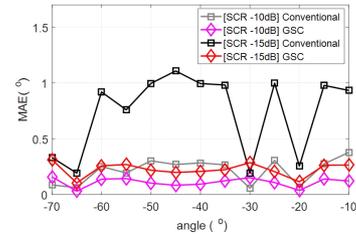


그림 4. 클러터입사 각도에 따른 MAE
Fig. 4. MAE vs clutter incidence angle.

(space-time) 신호 처리 기법에 대한 추가 연구가 필요할 것으로 사료된다.

References

- [1] Samuel M. Sherman, *Monopulse Principle and Techniques*, Artech House edition. 1984.
- [2] 서승희, 조지현, "원뿔형 비구면 레이돔에 대한 전자파 해석 기법 개발", 한국전자과학회논문지, 20(7), pp. 617-624, 2009년.
- [3] U. Nickel, "Monopulse estimation with adaptive arrays", *IEE Proc F, Sonar&Navig*, pp. 303-308, 1993.
- [4] U. Nickel "Overview of generalized monopulse estimation", *IEEE A&E Syst. Magazine*, vol. 21, no. 6, Part 2: Tutorials, pp. 27-56, 2006.
- [5] K. B. Yu, D. J. Murrow, "Adaptive digital beamforming radar for monopulse angle estimation in jamming", *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 37, no. 2, pp. 508-523, 2001.
- [6] S.-H. Moon, D.-S. Han, M.-J. Cho, and Y.-K. Kwag, "A new GSC using monopulse angle estimation technique for fast tracking", *IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology (ISPAST)*, pp. 158-163, 2003.
- [7] Y. Lee, W.-R. Wu, "A robust adaptive generalized sidelobe canceller with decision feedback", *IEEE Trans. Antennas Propag*, vol. 53, no. 11, pp. 3822-3832, 2005.