

## FM 기반 PCL 시스템에서 레퍼런스 채널의 수신 환경에 따른 상호상관 함수 분석

손소영, 박근호, 김형남  
부산대학교 전자공학과

hnkim@pusan.ac.kr

## An Analysis of the Cross-correlation Function According to the Receiving Environment of a Reference Channel in an FM-based PCL System

So-Young Son, Geun-Ho Park, Hyoung-Nam Kim  
Pusan National Univ.

## 요약

FM (frequency-modulation) 기반 PCL (passive coherent location) 시스템은 FM 상용 방송 신호를 이용하여 표적을 탐지하는 기술로서, 수신기와 FM 송신기의 직선 거리로 전파되는 직접경로 신호와 표적 반사 신호의 상호상관 함수 (cross-correlation function)를 유도하여 표적을 탐지한다. 표적 반사 신호 획득을 위한 감시 채널은 클러터와 같은 간섭 신호가 측정될 수 있기 때문에, 간섭 신호 제거 알고리즘을 활용하여 이러한 문제를 해결할 수 있다. 하지만, 레퍼런스 채널에 클러터가 수신되면 감시 채널에 대한 간섭 신호 제거 알고리즘의 성능 열화가 발생할 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 PCL 시스템의 수신 환경이 간섭 신호 제거 알고리즘과 표적 반사 신호의 탐지 성능에 미치는 영향을 분석한다. 또한, 표적 반사 신호의 탐지 과정에서 발생할 수 있는 문제점을 상호상관 함수를 통해 확인한다.

## I. 서론

FM 기반 PCL 시스템은 상용 FM 방송 신호를 이용하여 표적의 위치 및 속도를 추적할 수 있는 수동형 레이더 시스템으로서, FM 송신기와 수신기의 최단 경로로 전파되는 직접경로 신호 획득을 위해 레퍼런스 채널을 운용하며, 표적으로부터 반사된 신호를 수신하기 위한 감시 채널을 동시에 활용한다. PCL 시스템은 레퍼런스 채널과 감시 채널로부터 각각 획득한 직접경로 신호와 표적 반사 신호의 시간 및 도플러 주파수 차이 정보를 이용하여 표적의 속도 및 위치를 추적할 수 있으며, 이와 같은 정보는 레퍼런스 및 감시 채널 출력의 상호상관 함수를 유도하여 추정할 수 있다.

하지만, 감시 채널에는 표적 반사 신호뿐만 아니라 직접경로 신호와 클러터 등의 간섭 신호가 수신된다[1]. 이와 같은 간섭 신호는 오 경보율 (false alarm rate)을 증가시키거나, 상호상관 함수에서 표적이 간섭 신호에 의해 탐지되지 않도록 하는 masking effect 를 발생시킬 수 있다[2]. 이에 대한 해결책으로서, LMS (least mean square), RLS (recursive least squares) 등의 적응 필터 기법[3]이나 ECA(extensive cancellation algorithm)가 간섭 신호 제거 기법으로 활용된 바 있다[1].

레퍼런스 채널에는 감시 채널과 마찬가지로 직접경로 신호뿐만 아니라 클러터와 같은 간섭 신호가 수신될 수 있다. 레퍼런스 채널에 수신되는 간섭 신호는 상호상관 함수의 결과에서 의도치 않은 극댓값을 생성하기 때문에, 가짜 표적이 탐지되는 문제가 발생할 수 있다.

따라서, 본 논문에서는 레퍼런스 채널에서 수신되는 간섭 신호가 감시 채널에서 사용되는 간섭 신호 제거 알고리즘에 미치는 영향을 분석한다. 이러한 영향을 분석하기 위해, 간섭 신호 제거 알고리즘으로 인해 발생하는 새로운 극댓값의 존재를 수식적으로 보인다. 또한, 모의실험을 통해 상호상관 함수 결과에서 새로운 가짜 표적이 탐지될 수 있음을 확인한다.

## II. 레퍼런스 채널 수신 환경에 따른 간섭 신호 제거 알고리즘의 출력 신호 분석

본 장에서는 레퍼런스 채널에 클러터가 수신되지 않는 환경과 클러터가 수신되는 환경이 상호상관 함수에 미치는 영향을 신호 모델링을 기반으로 비교 및 분석한다. 두 가지 환경에서 감시 채널은 직접경로 신호, 클러터, 표적 반사 신호가 수신되는 채널로 다음 식과 같이 모델링할 수 있다.

$$s_{surv}(t) = A_d s(t) + A_c s(t - t_c) + A_s s(t - t_d) e^{j2\pi f_d t} + n_s(t). \quad (1)$$

여기서  $A_d$  는 직접경로 신호의 진폭,  $A_c$  는 클러터의 진폭,  $A_s$  는 표적 반사 신호의 진폭,  $n_s(t)$  는 가우시안 잡음, 그리고  $s(t)$  는 직접경로로 수신되는 FM 송신 신호를 나타내며,  $\int |s(t)|^2 dt = 1$  이 성립한다. 또한,  $t_c$ ,  $t_d$  는 각각 클러터와 표적 반사 신호의 지연시간,  $f_d$  는 표적의 속도에 따라 결정되는 도플러 주파수를 의미한다. 간섭 신호를 제거하기 위한 기법으로 ECA 를 사용하면, 간섭 신호가 제거된 감시 채널의 출력 신호는 아래의 식으로부터 유도할 수 있다[1].

$$\mathbf{s}_{ECA} = \mathbf{s}_{surv} - \mathbf{X}\mathbf{a}. \quad (2)$$

$\mathbf{X}$  는 시간 지연된 레퍼런스 채널 신호를 열 벡터로 가지는 행렬로 정의되며,  $\mathbf{a}$  는 간섭 신호 제거를 위한 가중치 벡터를 의미한다. 간섭 신호 제거 알고리즘을 통해 유도한  $\mathbf{a}$  는 그림 1 과 같은 형태로 나타나며, 식 (1)의 신호 모델링에 대한 이상적인  $\mathbf{a}$  는 아래의 벡터로 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{a} = [\alpha_1 \ 0 \ \dots \ 0 \ \alpha_2 \ 0 \ \dots \ 0]^T. \quad (3)$$

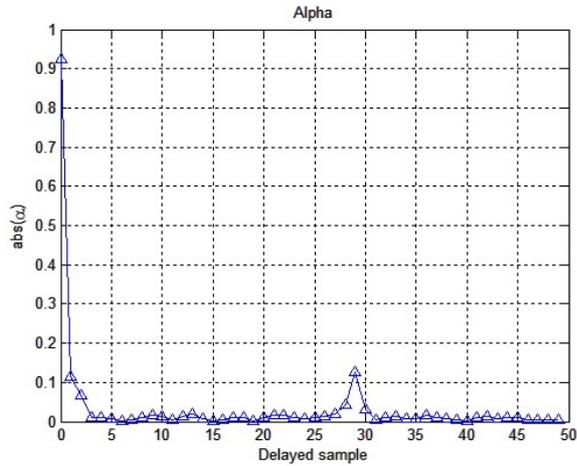


그림 1. 시뮬레이션 환경에서의  $\alpha$  값.

여기서  $\alpha_1$  과  $\alpha_2$  는 각각 직접경로 신호와 클러터 제거에 활용되며, 그 값은 직접경로 신호와 클러터의 신호 파워에 비례하여 결정된다.

### 1. 레퍼런스 채널에 클러터가 수신되지 않는 환경

클러터가 수신되지 않는 레퍼런스 채널은 직접경로 신호와 가우시안 잡음만이 존재하는 신호로 다음 식 (4)와 같이 모델링할 수 있다.

$$s_{ref}(t) = A_d s(t) + n_r(t). \quad (4)$$

식 (1)부터 식 (4)를 이용하면, 간섭 신호가 제거된 출력 신호  $s_{ECA}$  는 아래의 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$s_{ECA}(t) = (1 - \alpha_1)A_d s(t) + (A_c - \alpha_2 A_d)s(t - t_c) + A_d s(t - t_d)e^{j2\pi f_d t} + n_s(t) - \alpha_1 n_r(t) - \alpha_2 n_r(t - t_c). \quad (5)$$

ECA 알고리즘은  $1 - \alpha_1$  과  $A_c - \alpha_2 A_d$  가 0 에 가까운 값이 되도록  $\alpha_1$  과  $\alpha_2$  를 유도하기 때문에, 감시 채널에 존재하던 간섭 신호가 출력 신호에서 제거되는 것을 확인할 수 있다.

### 2. 레퍼런스 채널에 클러터가 수신되는 환경

클러터가 수신되는 레퍼런스 채널은 식 (4)에 클러터에 대한 식을 추가한 것으로서, 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$s_{ref}(t) = A_d s(t) + A_c s(t - t_c) + n_r(t). \quad (6)$$

식 (1)~(3), 식 (6)을 이용하여 ECA 알고리즘의 출력 신호를 아래의 식으로 표현할 수 있다.

$$s_{ECA}(t) = (1 - \alpha_1)A_d s(t) + (A_c - \alpha_1 A_c - \alpha_2 A_d)s(t - t_c) - \alpha_2 A_c s(t - 2t_c) + A_d s(t - t_d)e^{j2\pi f_d t} + n_s(t) - \alpha_1 n_r(t) - \alpha_2 n_r(t - t_c). \quad (7)$$

식 (7)에서  $A_c - \alpha_1 A_c - \alpha_2 A_d$  가 0 에 가까운 값이 되기 때문에, 감시 채널에 존재하던 간섭 신호가 제거되는 것을 확인할 수 있다. 그러나 레퍼런스 채널의 클러터에 의해 출력 신호에  $2t_c$  의 시간 지연을 가지는 새로운 신호  $-\alpha_2 A_c s(t - 2t_c)$  가 생기는 것을 확인할 수 있다. 따라서,

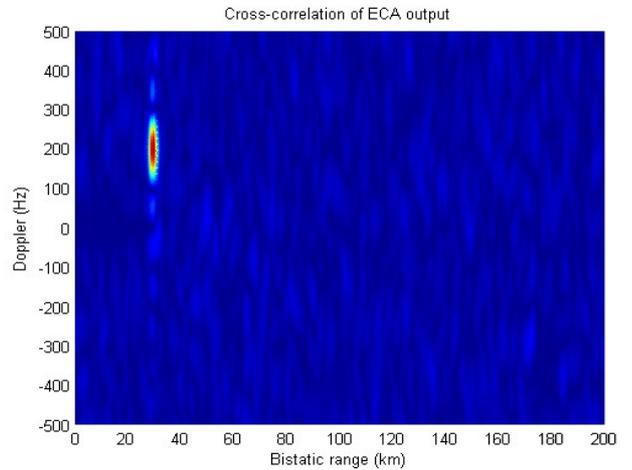


그림 2. 레퍼런스 채널에 클러터가 수신 되지 않는 환경에서의 상호상관 함수.

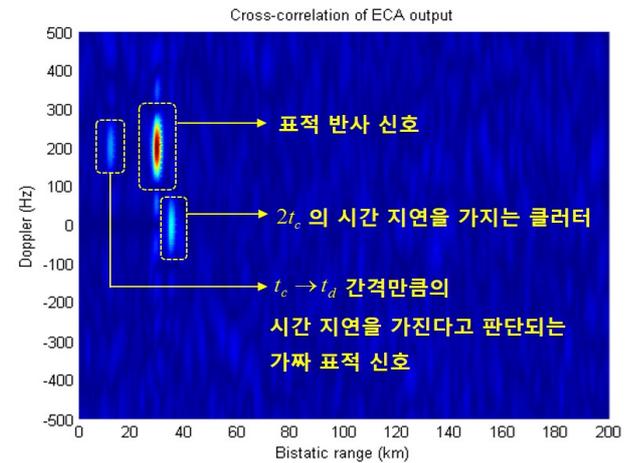


그림 3. 레퍼런스 채널에 클러터가 수신 되는 환경에서의 상호상관 함수.

상호상관 함수에서는  $2t_c$  의 위치에서 새로운 극댓값이 생길 것으로 예상할 수 있다.

### III. 모의실험

신호의 SNR (signal-to-noise ratio)은 각각 레퍼런스 채널의 직접경로 신호를 20 dB, 클러터를 10 dB 로 설정하였다. 또한, 감시 채널의 직접경로 신호를 20 dB, 클러터를 5 dB, 표적 반사 신호를 0 dB 로 설정하여 모의실험을 진행하였다.

그림 2 는 레퍼런스 채널에 직접경로 신호만 수신되는 경우에 대한 상호상관 함수를 나타낸 것으로서, 간섭 신호가 효과적으로 제거되는 것을 확인할 수 있다. 반면에, 도플러 주파수 값을 가지는 표적 반사 신호는 제거되지 않은 것을 알 수 있다.

그림 3 은 레퍼런스 채널에 직접경로 신호와 클러터가 수신되는 경우에 대한 상호상관 함수를 나타낸 것으로서, 식 (7)에서 유도된 새로운 간섭 신호 항인  $-\alpha_2 A_c s(t - 2t_c)$  가 나타난 것을 확인할 수 있다. 또한, 표적 반사 신호 외에 도플러 주파수를 가지는 신호가 탐지되는 것을 확인할 수 있다. 이는 레퍼런스 채널에 직접경로 신호와 클러터가 상호상관 과정에서 감시 채널의 표적 반사 신호와 각각  $|t_d|$  와  $|t_d - t_c|$  의 시간 지연 후에 정합되기 때문에 발생한다. 따라서 실제 존재하는 표적은 하나뿐이지만 레퍼런스 채널의 클러터로 인해 상호상관 함수 결과에서 가짜 표적이

생기게 된다. 이와 같은 가짜 표적은 바이스태틱 거리 및 도플러 주파수 추정 오차를 증가시키고, 표적 추적의 정확성을 감소시키는 문제를 발생시킬 수 있다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 레퍼런스 채널에 포함된 클러스터가 간섭 신호 제거 기법에 미치는 영향을 수식적으로 정리하고, 이를 모의실험을 통해 확인하였다. 그 결과, 레퍼런스 채널에 포함된 클러스터는 상호상관 함수의 새로운 극댓값을 형성하는 원인이 될 수 있음을 확인하였다. 이와 같이, 레퍼런스 채널에 포함된 클러스터는 표적으로 판단될 수 있는 극댓값을 형성하기 때문에, 레퍼런스 채널에서 클러스터를 제거하는 과정이 중요할 것으로 판단된다. 따라서, 향후 연구에서는 레퍼런스 채널에서의 클러스터 제거 방법을 연구할 예정이다.

#### ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2017 년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2017R1D1A1B04035230)

#### 참 고 문 헌

- [1] F. Colone, D. W. O'Hagan, P. Lombardo, C. J. Baker, "A Multistage Processing Algorithm for Disturbance Removal and Target Detection in Passive Radar," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 45, no. 2, pp. 698-722, Apr. 2009.
- [2] K. S. Kulpa, Z. Czekala, "Masking effect and its removal in PCL radar," *IEE Proceeding-Radar, Sonar and Navigation*, vol. 152, no. 3, pp. 174-178, Jun. 2005.
- [3] R. Cardinali, F. Colone, C. Ferretti, P. Lombardo, "Comparison of Clutter and Multipath Cancellation Techniques for Passive Radar," *IEEE Radar Conference*, Boston, MA, USA, pp. 469-474, Apr. 2007.