

# FM 라디오 기반 PCL 시스템의 빔 형성기-적용필터 구조에서의 표적 신호 이득 분석

박근호, 손소영, 김동규, 김호재 (부산대학교), 안준일 (국방과학연구소), 김형남<sup>©</sup> (부산대학교)

[hnkim@pusan.ac.kr](mailto:hnkim@pusan.ac.kr)<sup>©</sup>

## A gain analysis of target signal based on the beamformer and adaptive filter structure of the FM-radio-based PCL

Geun-Ho Park, So-Young Son, Dong-Gyu Kim, Ho Jae Kim (Pusan National Univ.), Jun-II Ahn (Agency for Defense Development), Hyoung-Nam Kim<sup>©</sup> (Pusan National Univ.)

### 요약

FM 라디오 기반 PCL 시스템은 상용 FM 라디오 신호를 활용하여 고속으로 이동하는 표적을 탐지하는 수동형 레이더 기술로서, FM 송신기로부터 수신기의 직접 경로로 전파되는 기준 신호와 표적으로부터 반사된 신호인 표적 신호를 획득하여 표적을 추적할 수 있다. PCL 수신기는 표적을 탐지하기 위해서 빔 형성기와 적응 필터 구조를 활용하여 표적 신호와 기준 신호를 분리하여 추출할 수 있다. 하지만, 빔 형성기와 적응 필터의 2단계 구조에서 표적 신호의 이득은 기준 채널과 감시 채널의 빔 가중치가 같거나 기준 신호와 표적 신호의 입사각이 같을 때 급격하게 감소할 수 있다. 본 논문에서는 수신 신호 모델로부터 이러한 조건이 발생하는 것을 수식적으로 보이고, 모의실험으로 그 결과를 확인한다.

### I. 서론

FM (frequency modulation) 라디오 기반 PCL (passive coherent location)은 상용 FM 방송 신호를 활용하여 고속으로 이동하는 표적의 위치와 속도를 추정하는 레이더 기술로서, 수신기가 FM 송신기의 위치에 이격하여 운용하고 수신기 플랫폼에서 직접 신호를 방사하지 않기 때문에 수동형 바이스테틱 레이더 (passive bistatic radar, PBR)이라고도 불린다 [1]. 표적으로부터 반사된 표적 신호는  $-35\sim-10$  dB의 낮은 SNR (signal-to-noise ratio)을 가지며 [1], 이러한 표적 신호를 탐지하기 위해서는 처리 이득을 높이는 정합 필터링이 필요하다. 또한 정합 필터링을 수행하기 위해서는 송신기-수신기의 직접 경로로 전파되는 기준 신호와 표적 신호를 분리하여 수신해야 한다.

PCL에서는 수신기를 기준으로 다른 각도로 입사하는 기준 신호와 표적 신호를 공간적으로 분리하기 위해 빔 형성기를 활용한다. 다양한 안테나 배치 구조와 빔 형성기 구조를 활용할 수 있지만, 표적의 전 방위 탐지를 위해 균일 원형 배열안테나 배치 구조의 위상 배열안테나를 사용하는 것이 일반적이다 [2]. 이러한 안테나 배치 구조에서는 FM 송신기 방향으로 조향한 빔을 기준 채널, 그 외 수 개의 방위각으로 조향한 복수의 빔을 감시 채널로 활용한다.

적용 필터는 감시 채널의 빔 형성기 출력에 포함된 기준 신호와 클러터 등의 간섭 신호를 제거하기 위한 신호처리 구조로서, 기준 채널에 포함된 표적 신호로 인해 감시 채널에 포함된 표적 신호의 이득을 변화시킬 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 이와 같은 빔 형성기 구조를 전제로 한 PCL 수신기 구조에서 적응 필터가 표적 신호의 이득에 미치는 영향을 분석하고, 적응 필터 출력에 포함된 표적 신호의 이득을 수식과 모의실험으로 유도하여 그 특징을 정리한다.

### II. 신호 모델

$M$  개의 안테나로 구성된 균일 원형 배열안테나의 수신 신호를  $\mathbf{x}(n)$ 이라 할 때, 기준 신호의 입사 방위각  $\phi$ 와 표적 신호의 입사 방위각  $\theta$ 에 대한 조향 벡터를 이용하여  $\mathbf{x}(n)$ 을 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{x}(n) = \mathbf{a}(\phi)s_d(n) + \mathbf{a}(\theta)s_t(n) + \mathbf{v}(n), \quad n = 1, \dots, N. \quad (1)$$

여기서  $s_d(n)$ 와  $s_t(n)$ 은 각각 기준 신호와 표적 신호를 나타내며,  $\mathbf{a}(\phi)$ 와  $\mathbf{a}(\theta)$ 는 각각 기준 신호와 표적 신호의 조향 벡터,  $\mathbf{v}(n)$ 은  $M \times M$  크기의 공분산 행렬  $\mathbf{C} = \sigma_n^2 \mathbf{I}_M$ 을 가지는 백색 가우시안 잡음을 의미한다.

식 (1)에서의 조향 벡터는 항상 고도각을  $\pi/2$ 에 지향하도록 설정하였다.

PCL 수신기는 기준 신호와 표적 신호의 배열 이득을 높이기 위해 다른 방향으로 지향하는 복수의 빔을 형성할 수 있다. FM 송신기의 방향으로 지향하는 빔 형성기의 출력 신호를 기준 채널 신호  $y_r(n)$ , 기준 채널을 제외한 나머지 빔 출력 신호를 감시 채널 신호  $y_s(n)$ 라 정의하면, 각 채널 신호를 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$y_r(n) = \mathbf{w}_r^H \mathbf{x}(n), \quad (2)$$

$$y_s(n) = \mathbf{w}_s^H \mathbf{x}(n). \quad (3)$$

여기서  $\mathbf{w}_r$ 은 기준 채널의 빔 가중치,  $\mathbf{w}_s$ 는 감시 채널의 빔 가중치를 의미한다.

감시 채널의 출력  $y_s(n)$ 에는  $\mathbf{w}_s^H \mathbf{a}(\phi)$ 의 빔 이득을 가지는 기준 신호가 수신된다. 적응 필터는 기준 채널의 신호  $y_r(n)$ 을 활용하여  $y_s(n)$ 에 포함된 기준 신호를 제거한다. 적응 필터의 첫 번째 탭 가중치를  $\alpha_0$ 라 하면, 표적 신호를 추출하기 위한 적응 필터의 출력 신호  $z(n)$ 은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$z(n) = y_s(n) - \alpha_0^* y_r(n). \quad (4)$$

여기서  $\alpha_0^*$ 는 기준 채널 신호를 이용하여 감시 채널에 포함된 기준 신호를 제거하기 때문에 다음 식이 성립한다.

$$\alpha_0^* = [\mathbf{w}_s^H \mathbf{a}(\phi)] / [\mathbf{w}_r^H \mathbf{a}(\phi)]. \quad (5)$$

### III. 빔 형성기-적용 필터 구조에 따른 표적 신호 이득 분석

식 (4)의 적응 필터 출력  $z(n)$ 에서 표적 신호에 대한 신호 성분을  $z_t(n)$ 이라 하면,  $z_t(n)$ 은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$z_t(n) = (\mathbf{w}_s^H \mathbf{a}(\theta) - \alpha_0^* \mathbf{w}_r^H \mathbf{a}(\theta)) s_t(n). \quad (5)$$

식 (5)에 식 (4)를 대입하여 정리하면 다음 식과 같다.

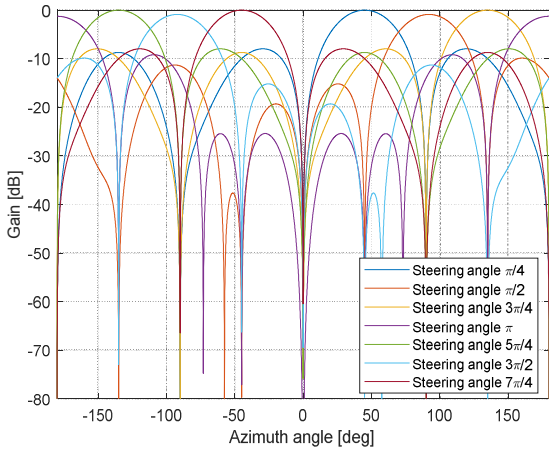


그림 1. 감시 채널 빔에 대한 표적 신호의 이득 (45°의 조향각 간격, 감시 채널 빔 개수 7개).

$$z_t(n) = \left( \mathbf{w}_s^H \mathbf{a}(\theta) - \frac{\mathbf{w}_s^H \mathbf{a}(\phi)}{\mathbf{w}_r^H \mathbf{a}(\phi)} \mathbf{w}_r^H \mathbf{a}(\theta) \right) s_t(n) \quad (6)$$

$$= g(\mathbf{w}_s, \mathbf{w}_r, \theta, \phi) s_t(n).$$

여기서  $g(\mathbf{w}_s, \mathbf{w}_r, \theta, \phi)$ 은 빔 형성기-적용 필터 구조를 통과한 표적 신호의 최종 이득을 나타낸다.

$g(\mathbf{w}_s, \mathbf{w}_r, \theta, \phi)$ 의 특징은 다음과 같이 두 가지 경우로 나누어 볼 수 있다.

- 1)  $\mathbf{w}_s = \mathbf{w}_r$ ,
- 2)  $\phi = \theta$ .

1)과 2)의 조건은 모두  $g(\mathbf{w}_s, \mathbf{w}_r, \theta, \phi) = 0$ 을 만족시키기 때문에, 1)과 2)는 적용 필터의 출력에서 표적 신호를 모두 제거하는 조건이 되며, 1)과 2) 모두를 만족해도  $g(\mathbf{w}_s, \mathbf{w}_r, \theta, \phi) = 0$ 을 만족시킨다.

먼저 1)은 감시 채널과 기준 채널의 빔 패턴이 동일한 것을 의미한다. 표적 신호의 입사각, 기준 신호의 입사각과 관계없이 각 채널의 빔 가중치가 일치할 경우에는 감시 채널 신호에서 표적 신호가 모두 제거될 수 있다. 하지만 1)의 조건은 기준 채널의 빔 가중치와 다른 빔 가중치를 사용함으로써 표적 신호 제거를 회피할 수 있다.

2)의 조건은 표적과 FM 송신기의 방향이 일치하는 경우를 나타내는 것으로, 임의의  $\mathbf{w}_s$ 와  $\mathbf{w}_r$ 에 대해  $g(\mathbf{w}_s, \mathbf{w}_r, \theta, \phi) = 0$ 을 만족시킨다. 따라서 표적과 FM 송신기의 방향이 일치하면 감시 채널에 포함된 기준 신호를 제거하기 위한 적용 필터가 표적 신호를 동시에 제거하게 된다. 이에 대한 결과는 모의실험에서도 확인할 수 있다.

#### IV. 모의실험

FM 송신기로부터 방사된 기준 신호가  $\theta = 0^\circ$ 의 방위각으로 입사하고, 8개의 안테나를 1.547 m의 반지름의 원에 일정한 간격으로 배치한 상황을 가정하였다. 또한, 반송파 주파수는 96.9 MHz로 설정하였다.

그림 1과 2는 표적 신호의 입사각에 따른 표적 신호의 이득  $g(\mathbf{w}_s, \mathbf{w}_r, \theta, \phi)$ 를 나타낸 것으로서, 그림 1은 45°부터 315°까지 45°의 간격으로 조향한 7개의 DAS (delay-and-sum) 빔 형성기의 빔을 감시 채널로 설정하여 표적 신호의 이득을 유도하였다. 또한, 그림 2는 40°부터 320°까지 40°의 간격으로 생성한 8개의 빔에 대한 표적 신호의 이득을 나타내었다. 그림 1과 2에서 모두 기준 채널의 빔은  $\theta = 0^\circ$ 로 지향한 빔을 사용하였다.

그림 1과 2에서 나타낸 것과 같이, FM 송신기의 방향인  $\theta = 0^\circ$ 의 방향

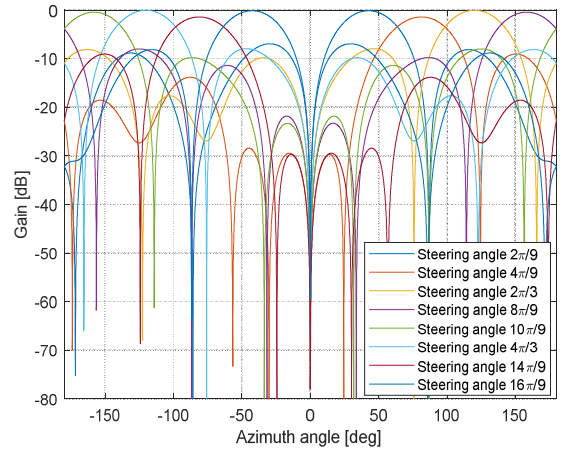


그림 2. 감시 채널 빔에 대한 표적 신호의 이득 (40°의 조향각 간격, 감시 채널 빔 개수 8개).

으로는 표적 신호의 이득이 급격히 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이와 같은 모의실험 결과는 III장에서 정리한 두 번째 조건이 성립하는 것을 나타내며, FM 송신기의 방향과 표적 신호 입사각이 일치할 경우에는 표적 신호의 이득이 급격하게 감소하기 때문에 FM 송신기 방향으로는 표적을 탐지할 수 없는 blind zone이 생성됨을 확인할 수 있다.

#### V. 결론

본 논문에서는 표적 신호를 추출하기 위해 사용한 빔 형성기와 적용 필터의 2-단계 구조에서 표적 신호의 이득이 두 가지 조건에서 급격히 감소하는 것을 수식 전개와 모의실험을 통해 확인하였다. 첫 번째 조건은 감시 채널과 기준 채널의 빔 가중치를 동일하게 사용하는 것이며, 두 번째 조건은 기준 신호와 표적 신호의 입사각이 동일한 상황을 나타낸다. 각 채널에 할당된 빔 가중치를 수신단에서 다르게 설정함으로써 첫 번째 조건이 발생하는 상황을 회피할 수 있다. 하지만, 고정 빔을 수 개로 형성한 후 하나의 빔을 기준 채널로 활용하여 나머지 빔을 감시 채널로 활용하는 시스템 하에서는 임의의 빔 가중치에 대해 송신기 방향으로 입사하는 표적 신호를 추출할 수 없다. 따라서, 송신기 방향으로 표적을 탐지할 수 없는 구간인 blind zone이 형성된다. 향후 연구에서는 빔 형성기-적용 필터 구조 기반의 표적 신호 추출 시스템에서 송신기 방향으로 발생하는 표적 신호의 이득 감소를 해결하거나 완화하기 위한 방안을 연구할 계획이다.

#### ACKNOWLEDGMENT

본 논문은 국방과학연구소의 연구비 지원으로 수행하였습니다. (과제명: 표적 신호 추출 기술 연구, 계약번호 UD180008ED)

#### 참고 문헌

- [1] Nicholas J. Wills and Hugh D. Griffiths, *Advances in Bistatic Radar*, SciTech Inc, 2007.
- [2] F. Belfiori, S. Monmi, W. van Rossum, and P. Hoogeboom, "Antenna array characterisation and signal processing for an FM radio-based passive coherent location radar system," *IET Radar, Sonar and Navig.*, vol. 6, no. 8, pp. 687-696, 2012.