

# Basis Pursuit Denoising이 적용된 수동형 레이더의 탐지 성능 분석

\*박도현, 김형남

부산대학교 전자공학과

e-mail : *dohpark@pusan.ac.kr*, *hnkim@pusan.ac.kr*

## Analysis of Detection Performance of a Passive Radar with Basis Pursuit Denoising

\*Do-Hyun Park, Hyoung-Nam Kim  
Department of Electronics Engineering  
Pusan National University

### Abstract

Passive radar is a radar system that exploits commercial broadcasting signals to detect a target. Unlike active radar that detects a target by emitting radio waves, passive radar has advantages of low system complexity and target detection without exposing a location, so many studies have been conducted. However, since the target signal received by the passive radar has a low signal-to-noise ratio, the false detection results due to noise significantly affect the detection performance of the passive radar. We apply basis pursuit denoising, a noise cancellation technique using compressed sensing, to passive radar to improve this. The detection performance of passive radar with and without basis pursuit denoising is compared using the receiver operating characteristic curve through simulation. By the comparison results, we propose the conditions under which the noise reduction technique can improve the detection performance.

### I. 서론

수동형 레이더는 상용 방송·통신 신호를 이용하여 표적을 탐지하는 레이더 시스템이다. 이러한 수동형 레이더는 직접적으로 전파를 방출하여 표적을 탐지하는 능동형 레이더 시스템과는 달리, 송신기를 배치할 필요가 없으므로 시스템 복잡도가 낮다는 장점을 지닌다. 또한, 위치를 노출하지 않고 표적에 대한 탐지를 수행할 수 있다는 장점이 있다. 수동형 레이더는 표적 탐지를 위해 기준 채널 및 감시 채널, 두 채널을 운용한다. 기준 채널에는 송신기로부터 직접 경로로 수신되는 기준 신호가 수신되고, 감시 채널에는 표적으로부터 반사되어 수신되는 표적 신호와 기준 신호가 포함된 감시 신호가 수신된다. 감시 신호 내의 기준 신호는 표적 신호 대비 높은 신호 전력을 지니므로, 수동형 레이더는 정확한 표적 탐지를 위해 간섭 신호 제거 알고리즘을 적용하여 감시 신호 내의 기준 신호들을 제거한다. 수동형 레이더는 기준 신호와 감시 신호를 이용하여 교차 모호함수를 유도하고, 이에 표적 탐지 알고리즘을 적용함으로써 최종적으로 표적 탐지 결과를 획득할 수 있다[1].

그러나 교차 모호함수를 유도하기 전, 감시 신호 내에는 표적 신호뿐만 아니라 잡음 또한 존재하고, 이러

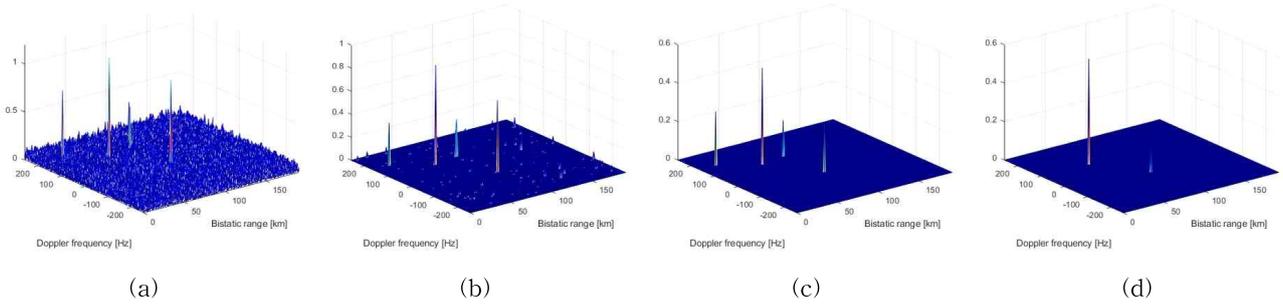


그림 1. 교차 모호함수에 BPDN 기법 적용 결과 (a) BPDN 적용 전, (b) BPDN 적용 후,  $\lambda=0.5$ , (c) BPDN 적용 후,  $\lambda=1.0$ , (d) BPDN 적용 후,  $\lambda=1.5$

한 감시 신호 내의 잡음은 교차 모호함수 내에서 잡음에 의한 유도 결과로 나타나게 되어 수동형 레이더의 표적 탐지 성능을 저하시키는 오탐지 결과의 원인이 될 수 있다. 따라서 표적 탐지 알고리즘을 적용하기 전, 교차 모호함수 내의 잡음에 의한 유도 결과를 제거하여 수동형 레이더의 표적 탐지 성능을 향상시킬 수 있다.

교차 모호함수 내의 잡음은 다양한 잡음 제거 기법을 이용하여 제거할 수 있다. 본 논문에서는 압축센싱의 복원 알고리즘을 이용하는 basis pursuit denoising(BPDN) 기법을 이용하여 교차 모호함수 내의 잡음을 제거한 결과를 보인다. 또한 모의실험을 통해 다양한 표적 신호가 수신되는 환경에서 BPDN 기법 적용 전과 후의 탐지 성능 비교를 확인한다.

## II. BPDN 기법

2006년에 소개된 압축센싱 이론은 신호를 Nyquist rate 이상으로 샘플링하지 않아도 거의 완벽히 신호를 재생할 수 있는 경우를 다루고 있어 많은 관심을 받고 있다. 대부분의 값이 0인 희소 신호(sparse signal)는 압축센싱 기법을 이용하여 적은 수의 선형 측정만으로도 원래의 신호로 복원시킬 수 있다[2, 3]. 이러한 압축센싱의 복원 알고리즘을 이용하는 BPDN 기법은 아래 식과 같은 unconstrained quadratic programming 문제의 해  $x$ 를 구함으로써 잡음 제거를 수행한다[4].

$$\min_x \frac{1}{2} \|y - Ax\|_2^2 + \lambda \|x\|_1. \quad (1)$$

위의 식에서  $y$ 는 측정 벡터,  $A$ 는 변형 행렬, 그리고  $\lambda$ 는 희소성과 복원 정확도 사이의 트레이드-오프(trade-off)를 조절하는 파라미터이다. BPDN 기법은  $x$ 에 대한 L1-norm을 정규화 항으로 사용하는 최적화 문제이므로, 적절한 값의 정규화 파라미터  $\lambda$ 를 선택하

는 것이 중요하다.

이러한 BPDN 기법을 수동형 레이더의 교차 모호함수에 적용할 경우 그림 1과 같은 결과를 얻을 수 있다. 그림 1의 (a)는 감시 신호에 4개의 표적 신호와 잡음이 존재하는 경우에서의 교차 모호함수이다. 그림 1의 (b), (c), 그리고 (d)는 다양한 정규화 파라미터  $\lambda$ 를 설정한 BPDN 기법을 (a)의 교차 모호함수에 적용한 결과이다. 정규화 파라미터  $\lambda$ 를 1으로 설정한 후 잡음 제거를 수행하였을 때, 그림 1의 (c)와 같이 잡음에 의한 유도 결과들이 모두 제거되고 표적에 의한 결과만 나타나는 것을 확인할 수 있다. 그러나  $\lambda$ 를 이보다 작게 설정할 경우 그림 1의 (b)와 같이 잡음이 모두 제거되지 않고, 이보다 크게 설정할 경우 그림 1의 (d)와 같이 잡음뿐만 아니라 표적에 의한 유도 결과 또한 제거된 것을 볼 수 있다.

## III. 모의실험

본 장에서는 BPDN 기법이 적용된 수동형 레이더의 표적 탐지 성능을 모의실험을 통해 분석한다. 모의실험은 반송파 주파수가 95.9 MHz인 FM 스테레오 신호를 수동형 레이더의 수신 신호로 사용하였으며, 모의 표적 3개가 존재하는 환경에서 진행하였다. BPDN 기법 적용 시 신호 압축률은 0.1로 설정하였고, 표적 탐지 알고리즘으로는 교차 모호함수 내에서 잡음 전력을 측정하고 이에 근거하여 탐지를 위한 임계값을 설정하는 CA-CFAR(cell averaging - constant false alarm rate)을 이용하였다[1]. 잡음 제거 후 교차 모호함수의 대부분의 값이 0이 될 경우 CFAR 탐지 알고리즘이 정확히 표적을 탐지하지 못하므로 0과 교차 모호함수 최댓값의 1% 사이에서 균등 분포를 따르는 균질한 모의 잡음을 교차 모호함수에 추가한 후 탐지 알고리즘을 적용하였다.

그림 2는 모의 표적 신호의 신호 대 잡음비가 모두 -30 dB로 수신되는 환경에서 BPDN 기법이 적용된

수동형 레이더와 적용되지 않은 수동형 레이더의 수신자 조작 특성(receiver operating characteristic) 곡선이며, 이 때 모의실험은 1000 번 수행하여 결과를 도출하였다. 수신자 조작 특성 곡선의 아래 영역 넓이를 의미하는 AUC(area under the curve) 값이 클수록 표적 탐지 성능이 우수하다는 것을 의미하므로, BPDN 기법을 적용할 시 수동형 레이더의 표적 탐지 성능이 향상된 것을 볼 수 있다. 특히, BPDN 기법의 정규화 파라미터  $\lambda$ 가 1의 값을 가질 경우 가장 큰 AUC 값을 지님을 확인할 수 있다.

그림 3은 -35와 -25 사이에서 균등 분포를 따르는 세 개의 확률 변수를 생성하여 이를 모의 표적 신호의 dB 단위 신호 대 잡음비로 설정 후, -30 dB로 진행한 모의실험과 동일하게 수신자 조작 특성 곡선을 계산한 결과이다. 모의 표적 신호가 일정하지 않은 신호 대 잡음비를 가질 경우, BPDN 기법 적용 시 표적 탐지 성능이 열화 된 것을 확인할 수 있다. 모든 표적 신호의 신호 대 잡음비가 일정한 경우 고정된 값의  $\lambda$ 를 사용하여도 우수한 잡음 제거 성능을 지니는 반면, 표적 신호의 신호 대 잡음비가 일정하지 않은 경우에 고정된  $\lambda$ 값을 사용할 시 각각의 표적 신호에 대한 잡음 제거가 정확히 수행되지 않아 성능 열화가 발생한 것이다.

#### IV. 결론

본 논문에서는 BPDN 기법을 수동형 레이더에 적용한 예시와 수신자 조작 특성 곡선을 이용한 성능 분석 결과를 제시하였다. BPDN 기법은 신호의 복원과 단순화 사이의 정규화에 대한 최적화 문제의 해를 구함으로써 잡음 제거를 수행하므로, 정규화 파라미터  $\lambda$ 를 적절한 값으로 선택해야 우수한 잡음 제거 성능을 얻을 수 있다. 이에 대하여 본 논문은 다수의 모의 표적 신호의 신호 대 잡음비가 일정할 때와 일정하지 않을 때의 모의 환경을 이용하여 고정된  $\lambda$ 값을 가지는 BPDN 기법 적용 전과 후의 성능 비교를 수행하였다. 성능 비교 결과, 신호 대 잡음비가 일정할 경우 BPDN 기법을 적용하였을 때 탐지 성능이 더 우수하였고, 신호 대 잡음비가 일정하지 않을 경우 BPDN 기법 적용 후 수동형 레이더의 표적 탐지 성능이 열화됨을 확인하였다. 향후에는 우수한 표적 탐지 성능을 지니기 위해 수동형 레이더에 수신되는 표적 신호의 세기에 따라 적응적으로 정규화 파라미터를 변경하는 강건한 BPDN 기법에 대한 연구를 진행할 예정이다.

#### ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2019 년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2019-0-00706, 주요 보안시설 및 항만 인프라 보안성 강화용 3S(Security,Safety,Safeguard) 보안허브플랫폼 개발).

#### 참고문헌

- [1] 박도현, 박근호, 김형남, "FM 라디오 기반 수동형 레이더에서 FDOA 측 부엽에 의한 오탐지 결과 제거 방법," 한국통신학회논문지, vol. 45, no. 10, pp. 1739-1748, 2020년 10월.
- [2] D. Donoho, "Compressed sensing," IEEE Trans. on Information Theory, vol. 52, no. 4, pp. 1289-1306, April, 2006.
- [3] 이홍노, 박상준, 박순철, "압축센싱 소개," 전자공학회지, vol. 38, no. 1, pp. 19-30, 2011년 1월.
- [4] S. Chen, D. Donoho, and M. Saunders, "Atomic Decomposition by Basis Pursuit," SIAM Review, vol. 43, no. 1, pp. 129 - 159, 2001.

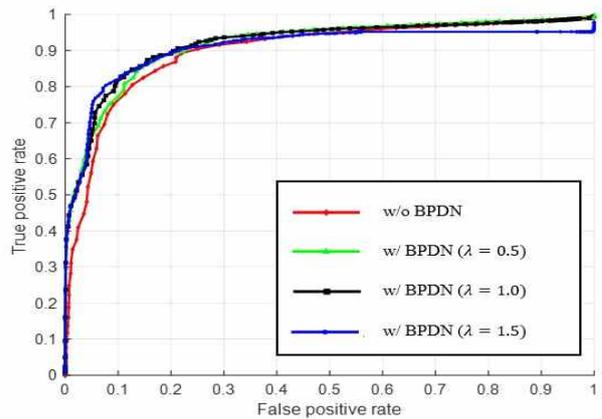


그림 2. 표적 신호의 신호 대 잡음비가 -30 dB일 때 BPDN 적용 전과 후의 수신자 조작 특성 곡선

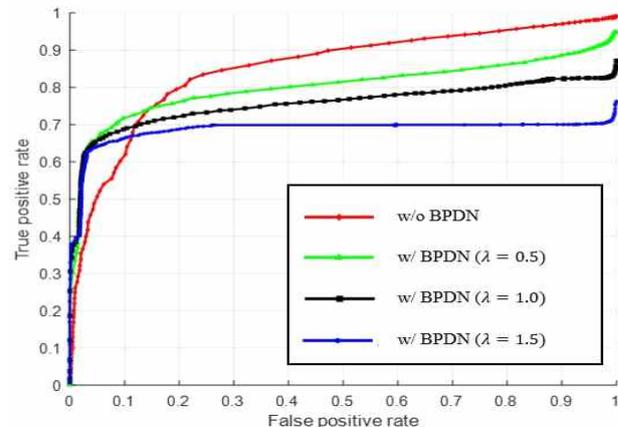


그림 3. 표적 신호의 신호 대 잡음비가 -35 ~ -25 dB 일 때 BPDN 적용 전과 후의 수신자 조작 특성 곡선