

미약신호 환경에서 펄스 레이더 신호의 검출을 위한 고차 스펙트럼 기법의 성능 분석

김동규, 이유리, 김요한, 송규하*, 김형남[Ⓒ]

부산대학교, *국방과학연구소

hnkim@pusan.ac.kr[Ⓒ]

Performance analysis of higher-order spectrum method for pulsed radar signal detection in weak power environment

Kim Dong-Gyu, Lee Yu-Ri, Kim Yo-Han, Song Kyu-Ha*, Kim Hyoung-Nam[Ⓒ]

Pusan National University, *Agency for defense development

요 약

현대전에서 신호정보를 신속하게 수집하고 처리하여 인식 및 식별에 활용하는 전자전 지원 시스템은 아군의 신속한 전략 수립을 위한 필수적인 요소가 되고 있다. 하지만 최근 전자전 환경이 실시간으로 정보를 공유하는 전술체계에 의해 다수의 신호가 혼재되어 있으며, 저피탐 통신 및 레이더에 대한 기술의 발달로 인해, 정확한 정보를 획득하기 어려운 복잡한 환경으로 변모하고 있다. 특히, 신속한 정보의 획득을 위해서는 적군의 통신 및 레이더에 비해 아군의 전자전 지원 시스템의 탐지 거리가 길어야 하므로, SNR이 0 dB 이하인 미약신호 환경에서 신호원을 탐지하는 것이 필수적으로 요구된다. 따라서 본 논문에서는 미약신호 환경에서 강건한 고차 통계치 기반 검출 기법을 펄스형 레이더 신호에 적용하고, 기존의 파워 스펙트럼 기반 검출 기법과 성능을 비교 분석한다.

I. 서 론

전자전 (electronic warfare)은 공간상에 전파되는 전자파의 군사적 응용을 통칭하는 개념으로서, 크게 전자공격 (electronic attack), 전자방어 (electronic protect), 그리고 전자전 지원 (electronic support)으로 구분된다. 전자전 지원 시스템은 적군의 통신 및 레이더 신호를 탐지하고 수집하여, 중심 주파수, 변조 방식, 펄스 폭 등의 제반사항 추정을 통해 신호원의 제원 식별 및 위치 탐지 등을 수행하는 시스템으로서, 현대전에서 아군의 전략적 우위를 확보하기 위해서 필수적인 요소이다 [1][2].

고기능화, 다기능화, 정밀화, 그리고 소형화된 수많은 감시정찰 및 정밀 타격 전력들이 광범위하게 분산 운용되는 대규모 작전 형태를 띠는 현대전에서는 다양한 작전요소들을 상호 연결하여 실시간으로 정보를 공유하는 전술체계로 변함에 따라 다수의 신호가 혼재되어 있는 복잡한 환경으로 변모하고 있으며, 기술의 발달과 함께, 펄스압축, 주파수 도약 등의 피탐 확률을 줄이는 다양한 방법의 변조방식이 사용되고 있다 [3]. 또한, 신속한 신호 정보의 획득을 위하여 적군의 레이더에 비해 아군의 전자전 지원 시스템의 탐지 거리가 길어야 하므로, 필연적으로 신호의 세기가 상당히 낮은 열악한 환경을 고려하여 시스템을 설계해야 한다. 따라서, 최종적으로 전자전 지원 시스템이 신호원의 제원을 정확하게 식별하기 위해서는, 신호 대 잡음비 (signal to noise ratio)가 0 dB 이하가 되는 미약신호 환경에서 신호를 정확하게 탐지하는 것이 필수적으로 선행되어야 한다.

기존의 자기상관 함수 및 에너지 기반 검출 기법 등의 2차 통계치를 활용한 방법들은 신호 대 잡음비가 매우 낮은 미약 신호 환경에서 탐지 성능이 저하된다. 하지만, 확률 밀도 함수(probability density function)가 가우시안인 경우, 고차 통계치 (higher order statistics)는 이론적으로 0이 되는 특성을 활용하면 기존 2차 통계치 기법들에 비해 효과적인 신호 검출이 가능하다 [4].

따라서 본 논문에서는 SNR이 0 dB 이하인 미약신호 환경에서 펄스 레이더 신호 검출 성능을 향상시키기 위하여, 고차 통계치 기반 신호 검출 기법을 적용하고, 그 성능을 기존 파워 스펙트럼 기법과 비교 분석한다.

II. 수신 신호 모델 및 고차 통계치 기반 신호 검출 기법

신호원으로부터 방사되어 수신단에서 수집한 기저대역 수신 신호 $x(t)$ 는 식 (1)과 같이 정의된다.

$$x(t) = s(t) + n(t) \quad (1)$$

$$s(t) = \sum_{k=0}^{K-1} p(t - kT_{PRI})$$

여기서, $p(t)$ 는 단일 펄스 레이더 신호이며, T_{PRI} 는 펄스 반복 주기, 그리고 K 는 펄스 개수이다.

기존의 2차 통계치를 활용한 신호 검출 방법은 다양한 방법이 존재하며, 그 중, 식 (2)로 정의되는 파워 스펙트럼 기반 검출 기법이 대표적이다.

$$P(f) = X(f)X^*(f) \quad (2)$$

여기서, $X(f)$ 는 수신 신호 $x(t)$ 의 푸리에 변환 값이다. 하지만, 이러한 2차 통계치 기반 검출 기법은 신호 대 잡음비가 0 dB 이하인 미약신호 환경에서 탐지 및 식별을 수행해야 하는 전자전 지원 시스템에서 성능이 저하되는 특성이 있다. 이를 극복하기 위해, 기존의 2차 통계치가 아닌 3차 이상의 통계치를 활용하는 방법이 제안되었다[4].

고차 통계치는 가우시안 확률 분포인 경우, 값이 0이 되므로 가우시안

잡음이 더해진 미약 신호 환경에 강건한 특성을 가진다. 이 중, 3차 스펙트럼인 바이스펙트럼(bispectrum)은 식 (3)과 같이 정의된다.

$$B(f_x, f_y) = X(f_x)X(f_y)X^*(f_x + f_y) \quad (3)$$

이를 활용하기 위해 바이스펙트럼의 대각단면(diagonal slice)을 구하면 식 (4)와 같다.

$$B(f, f) = X(f)X(f)X^*(2f) \quad (4)$$

식 (4)의 연산으로부터, 파워 스펙트럼에 비해 가우시안 잡음에 강건한 미약신호 검출이 가능하다.

III. 모의실험 및 성능 분석

본 논문에서는 신호 대 잡음비가 0 dB 이하인 미약 신호의 검출을 위해 바이스펙트럼의 대각단면을 이용하여, 펄스 레이더 신호에 대한 성능을 분석한다. 이 때, offset 주파수는 0 Hz인 사각펄스를 사용하였고, 펄스 폭은 0.5 μs, 펄스 반복 주기 T_{PRI} 는 5 μs, 펄스 개수는 3개로 설정하였다.

그림 1(a)는 SNR이 -10 dB 일 때, 수신 신호와 사각 펄스 형태를 가지는 원 신호를 동시에 나타냈으며, 수신 신호에 대한 파워 스펙트럼과 바이스펙트럼을 그림 1(b) 및 1(c)에 각각 도시하였다. 그림 1로부터 고차 통계치인 바이스펙트럼이 파워 스펙트럼에 비해 실제 신호가 존재하는 0 Hz 이외의 잡음이 상당히 줄어든 것을 확인할 수 있다. 그림 2는 다양한 잡음 환경에서 바이스펙트럼의 잡음 강건성을 확인하기 위하여, 신호 대 잡음비를 -30 dB에서 10 dB까지 변경하면서 식 (5)로 정의 되는 peak to background ratio (PBR)를 도시한 것이다 [4].

$$PBR = 10\log_{10} \frac{p}{b} - PBR_0, \quad (4)$$

여기서, p 는 최대값의 크기이며, b 는 평균값으로 정의되고, PBR_0 는 정규화를 위해서 잡음만 존재할 경우의 PBR을 계산한 것이다. 이 때, PBR 연산은 각 SNR에 대하여 300번 반복하여 앙상블 평균한 값을 사용하였다. 그림 2에서 확인할 수 있듯이, 약 -20 dB에서부터 10 dB 까지 PBR 성능이 파워스펙트럼에 비해 바이스펙트럼이 높은 것을 확인할 수 있다.

IV. 결론

본 논문에서는 미약신호 환경에서 레이더 신호의 검출 성능을 향상시키기 위하여 가우시안 잡음에 강건한 고차 통계치 기반 검출 기법의 성능을 PBR을 활용하여 기존의 파워스펙트럼 기반 기법과 비교 분석하였다. 향후, 최종적인 검출 성능을 분석하기 위해서는 PBR 기반의 임계값 설정 및 검출 기법에 대한 연구가 필요할 것으로 보인다.

참 고 문 헌

[1] 권태영, 정춘일 박창권, "미래전 양상 연구," 한국전력문제연구소, 2004.
 [2] D.-G. Kim, Y.-H. Kim, J.-O. Park, M. S. Lee, Y.-M. Park and H.-N. Kim, "A sequential estimation algorithm for TDOA/FDOA extraction for VHF communication signals," *J. IEEK*, vol. 51. no.

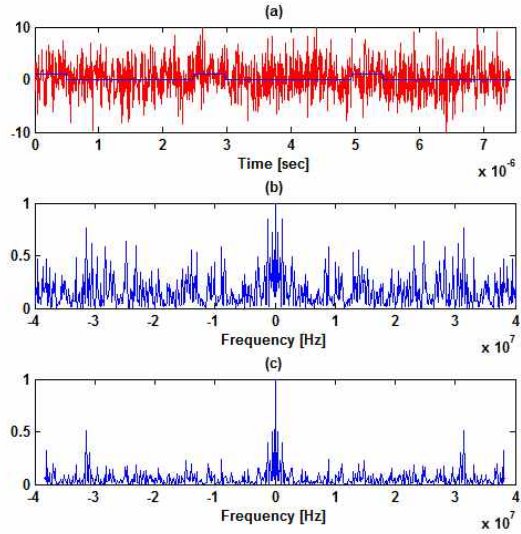


그림 1. (a) 사각펄스 원 신호 및 수신 신호, (b) 파워 스펙트럼, (c) 바이스펙트럼 대각단면.

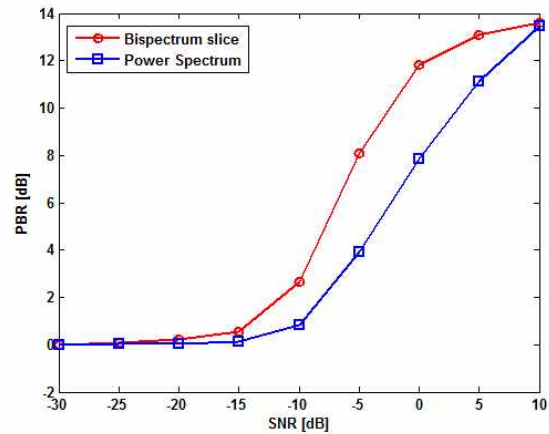


그림 2. 신호 대 잡음비에 따른 peak to background ratio.

7, pp. 60-68, Jul. 2014.
 [3] Denk Aytung, "Detection and jamming Low Probability of Intercept(LPI) RADAR," NAVAL POSTGRADUATE SCHOOL MONTEREY CA, 2006.
 [4] K. M. Hock, "Narrowband weak signal detection by higher order spectrum," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 44, no. 4, pp. 874-879, Apr. 1996.