

Wigner-Ville 분포 기반 Hough 변환을 이용한 선형 주파수 변조 신호 검출기의 성능 분석

이유리, 김동규, *곽현규, 김형남[©]

부산대학교, *국방과학연구소

hnkim@pusan.ac.kr[©]

Analysis of linear frequency modulation signal detection performance using Hough transform based on Wigner-Ville distribution

Lee Yu-Ri, Kim Dong-Gyu, *Kwak Hyun-Gyu and Kim Hyoung-Nam[©]

Pusan National Univ., *Agency for defense development

요 약

본 논문에서는 전자전 지원을 위한 수동 탐지 환경에서 수신된 신호가 선형 주파수 변조된 신호일 때 Wigner-Ville 분포 기반 Hough 변환을 이용한 신호 검출기의 성능을 분석한다. 선형 주파수 변조 신호일 경우에 Hough 변환을 이용하면 에너지를 한 곳에 집중시킬 수 있는 효과를 얻을 수 있다. 이러한 효과를 분석하고 Hough 변환을 적용한 경우의 성능 향상 정도를 확인하기 위하여 신호대잡음비에 따른 신호 검출 성능을 시뮬레이션 결과로 제시한다.

I. 서론

전자전에서는 정보를 전달할 때 정보 유출을 방지하기 위한 전자전 방어의 일종으로 시간에 따라 주파수가 변하는 송신 펄스를 이용하는 경우가 많다. 아군의 전자전 지원을 위한 수동 탐지 환경에서 적군의 전자전 방어를 위한 비정상 (non-stationary) 송신 신호를 탐지하고 분석하기 위해서는 단구간 푸리에 변환 (short time Fourier transform, STFT), 웨이블릿 변환 (wavelet transform), Wigner-Ville 분포 등과 같은 기법들이 사용된다. 이러한 기법들 중에서 Wigner-Ville 분포는 시간 및 주파수 분해능 (resolution)이 가장 높은 것으로 알려져 있다[1]. 따라서 신호가 발생한 구간과 발생하지 않는 구간의 차이가 크기 때문에 시간에 따라 주파수가 변하는 신호 검출 시에 유용하게 쓰인다.

다양한 송신 펄스 중 선형 주파수 변조 (linear frequency modulation, LFM)는 시간에 따른 주파수가 선형적으로 변하는 방식으로 전자전에서 유용하게 사용되고 있다[2]. 수동 탐지 환경에서 LFM 신호를 탐지하고 분석하는 방법으로는 시간-주파수 분석 결과에 Hough 변환을 적용하여 LFM 신호의 주파수 증가량 등에 관한 신호 정보를 얻을 수 있다. 이러한 Hough 변환 방식은 LFM 신호 정보를 얻는 것뿐만 아니라 LFM 신호의 에너지를 한 점으로 집중시키는 효과가 있어 LFM 신호 검출 성능을 높일 수 있다. 따라서 본 논문에서는 Wigner-Ville 분포 기반 Hough 변환을 이용한 LFM 신호 검출기 성능을 SNR (signal-to-noise ratio)에 따른 검출 확률 (probability of detection)로 나타내었다.

II. LFM 신호 검출

본 논문에서 사용하고 있는 LFM 수신 신호 $s(t)$ 는 식 (1)과 같은 시간에 따른 주파수 $f(t)$ 를 가지는 식 (2)와 같다.

$$f(t) = \begin{cases} \left(f_c - \frac{\Delta F}{2}\right) + \frac{\Delta F}{T_u}t, & 0 \leq t < T_u \\ \left(f_c + \frac{\Delta F}{2}\right) - \frac{\Delta F}{(T_p - T_u)}(t - T_u), & T_u \leq t < T_p \end{cases} \quad (1)$$

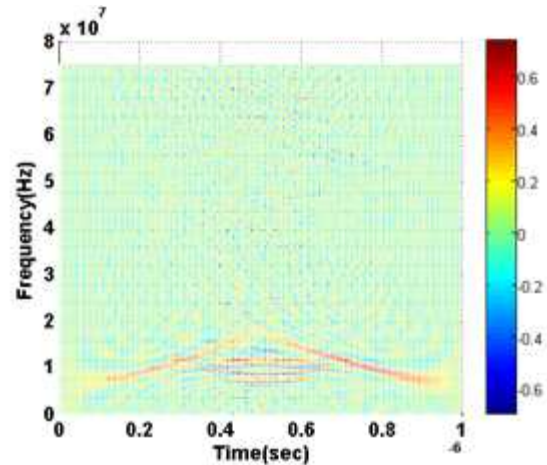


그림 1. LFM 신호의 Wigner-Ville 변환 결과 (SNR=5dB).

$$s(t) = \exp\left(j2\pi \int_0^t f(\tau) d\tau\right) + n(t) \quad (2)$$

여기서 T_p 는 펄스폭을, T_u 는 주파수가 증가하는 구간을, f_c 는 중심 주파수를, ΔF 는 주파수가 변화하는 폭을 나타낸다. 그리고 $n(t)$ 는 AWGN (additive white gaussian noise) 을 나타낸다.

A. Wigner Ville 분포

Wigner-Ville 분포는 시간-주파수 분석 기법 중 하나로 시간에 따라 주파수가 변하는 비정상 신호를 분석하기에 적합한 방식으로 식 (3)과 같이 정의된다.

$$WVD(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} s\left(t + \frac{\tau}{2}\right) s^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (3)$$

여기서 $*$ 는 공액 켈레 복소수를 의미하고, f 는 순시 주파수를 나타내고, τ 는 군 지연 (group delay)을 나타낸다. 그림 1은 $f_c = 10\text{MHz}$, $\Delta F = 20\text{MHz}$, $T_p = 1\mu\text{s}$, $T_u = 0.5\mu\text{s}$ 인 경우에 식 (2)에서 정의된

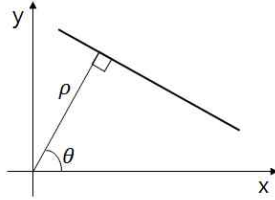


그림 2. 직선과 Hough 변환 시 해당 파라미터.

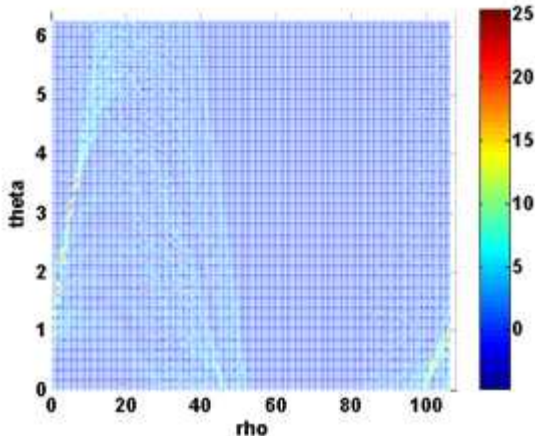


그림 3. 시간-주파수 그래프의 Hough 변환 결과 (SNR=5dB).

LFM 신호를 Wigner Ville 변환한 결과이다.

B. Hough 변환[3]

Hough 변환은 주로 영상 신호 처리 분야에서 영상의 특징점을 찾아내기 위하여 사용된다. Hough 변환은 그림 2와 식 (4)와 같이 그래프에서의 직선에 해당하는 정보를 하나의 특징점으로 나타낼 수 있어 효율적이다.

$$y \sin \theta + x \cos \theta = \rho \tag{4}$$

ρ 는 원점에서 직선까지 직교하는 거리를 말하며, θ 는 직선의 직교축과 x 축이 이루는 각도이다. 직선 검출을 위하여 식 (4)에서 x와 y는 상수로 놓고 ρ 와 θ 는 변수로 놓고 거리-각도 분석 방식으로 변환한다. 그림 3은 그림 1의 시간-주파수 분석 방법에 Hough 변환을 적용한 결과이다. 그림 1에서 2개의 직선은 Hough 변환함으로써 그림 3과 같이 2개의 점을 가지게 된다. 이 때 시간-주파수 축에서 직선으로 퍼져있던 신호의 에너지가 한 점에 집중되어 주변 신호가 없는 부분과의 차이가 커지는 효과를 얻을 수 있다.

III. 모의실험 결과

신호 검출기의 성능을 분석하기 위하여 150 MHz의 샘플링 주파수로 샘플링한 $f_c = 10 \text{ MHz}$, $\Delta F = 20 \text{ MHz}$, $T_p = 1 \mu s$, $T_u = 0.5 \mu s$ 인 LFM 신호를 이용해 AWGN 을 포함하여 모의실험을 하였다. 본 논문에서 사용되는 SNR은 펄스폭 내에서의 신호대잡음비를 의미한다. 또한 성능 분석을 위해 같은 조건의 모의실험을 4,000번 반복한 결과를 이용하였다.

그림 4는 오경보율 (false alarm rate)이 0.01이고, 펄스폭이 $1 \mu s$ 일 때, 수신 신호의 SNR에 따른 Wigner-Ville 분포를 이용한 신호 검출 기법과 Wigner-Ville 기반 Hough 변환을 이용한 검출 기법의 LFM 신호 검출 확률을 나타낸다. Wigner-Ville 분석만을 적용한 검출기보다 Hough 변환을 추가적으로 적용한 검출기의 성능이 약 1.5 dB만큼 향상되었다. 이는 시간-주파수 축으로 퍼져 있던 신호의 에너지를 Hough 변환을 통해 에너

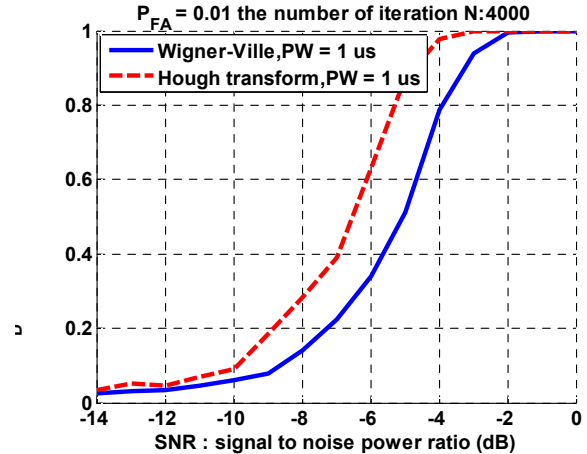


그림 4. SNR에 따른 LFM 신호 검출 확률 ($P_{FA} = 0.01$).

지를 집중시켜줌으로써 다른 잡음과 신호와의 차이가 커져서 검출 성능이 개선되는 결과를 얻게 된 것으로 볼 수 있다.

IV. 결론

본 논문에서는 전자전의 수동 탐지 환경에서 수신 신호가 LFM인 경우에 Wigner-Ville 분포 기반 Hough 변환을 이용한 신호 검출기의 성능을 분석하였다. 시간-주파수 분석 방식에 Hough 변환을 적용하게 되면 LFM 신호의 경우에 시간-주파수 축으로 퍼져 있는 신호 성분들이 한 점으로 집중되기 때문에 검출 확률을 확인하였을 때 Wigner-Ville만을 적용한 결과보다 약 1.5 dB가 향상된 것을 확인하였다. 이러한 분석 결과는 LFM의 신호 검출기에 관한 성능을 검증하고 비교하는 연구에 활용될 수 있을 것이다.

ACKNOWLEDGMENT

본 논문은 국방과학연구소의 연구비 지원으로 수행하였습니다. (과제명: 미약신호 탐지 기술 연구, 계약번호 UD150003ED)

참 고 문 헌

[1] Poyil, A. T., et al, "Multi Resolution Signal Analysis Using Improved Wigner Ville Distribution," Communication, Information & Computing Technology (ICCICT), 2012 International Conference on. IEEE, 2012.

[2] C. De Luigi, et al., "An iterative algorithm for estimation of linear frequency modulated signal parameters," IEEE Signal Processing Letters, vol.9, no.4, pp. 127-129, 2002.

[3] Barbarossa, S., et al., "Analysis of multicomponent LFM signals by a combined Wigner-Hough transform," IEEE Transactions on Signal Processing, vol.43, no.6, pp.1511-1515, 1995.