

FHSV LFM 레이다 억압을 위한 의사-코히런트 신호 생성기법

박병구*¹, 이정훈*², 김상원*³, 조제일*⁴

A Pseudo-Coherent Signal Generation Technique for FHSV LFM Radar Suppression

Byungkoo Park*¹, Jung-Hoon Lee*², Sang-Won Kim*³, and Jeil Jo*⁴

이 논문은 정부의 재원으로 국방과학연구소의 지원을 받아 수행된 연구임

요 약

일반적으로 전자기전에서는 LFM 레이다에 대응하기 위해 잡음 또는 기만 재밍 기법을 사용한다. 그러나 FHSV LFM 레이다는 중심주파수 또는 chirp rate를 펄스마다 변화시키므로 재밍의 효과가 제한적이다. 이 논문에서는 이러한 FHSV LFM 레이다에 대응하기 위해 의사-코히런트 신호발생기를 제안하였다. 그리고 모의실험을 통해 제안된 의사-코히런트 신호발생기의 신호가 레이다의 탐지 성능을 효과적으로 억압함을 확인하였다.

Abstract

In electronic warfare, noise or deception jamming techniques are used to counter conventional LFM radars. However, since Frequency Hopping and Slope Varying (FHSV) LFM radar changes the center frequency or chirp rate for each pulse, the effectiveness of these jamming methods is limited. This paper proposes a Pseudo-Coherent Signal (PCS) generator to counter FHSV LFM radar. The simulation results show that the proposed PCS generator's signal effectively suppressed the radar's detection capability.

Keywords

frequency hopping, FH, slope varying, SV, linear frequency modulation, LFM, pseudo-coherent signal, PCS

1. 서 론

LFM(Linear Frequency Modulation) 레이다는 송신 신호의 주파수를 시간에 따라 선형적으로 변화시킨 펄스폭을 사용하여 먼 탐지거리를 확보하면서 펄스를 압축하여 높은 거리 해상도를 가진다[1]. 이러한 LFM 레이다는 표적 탐지를 위해 정합필터링(Matched filtering) 및 CFAR(Constant False Alarm

Rate) detection 등과 같은 신호 처리기법을 사용한다[1][2]. 또한 파형의 코히런스(Coherency)를 이용하므로 잡음 환경에 강인하며 레이다의 송신 파형과 일치하지 않는 재밍 신호에 대해 항재밍 특성을 가진다[1][2].

일반적으로 전자기전에서는 LFM 레이다에 대응하기 위해 높은 JSR(Jamming to Signal Ratio)의 잡음(Noise) 재밍을 통해 레이다의 탐지 성능을 억압

* 국방과학연구소 제3기술연구원 3부(*¹ 교신저자)

- ORCID¹: <https://orcid.org/0000-0002-6308-5406>

- ORCID²: <https://orcid.org/0000-0001-9006-1947>

- ORCID³: <https://orcid.org/0000-0002-6096-3920>

- ORCID⁴: <https://orcid.org/0000-0002-3437-2916>

· Received: Mar. 21, 2025, Revised: Apr. 25, 2025, Accepted: Apr. 28, 2025

· Corresponding Author: Byungkoo Park

3rd Directorate, 3rd R&D Institute, Agency for Defense Development, Daejeon, Korea

Tel.: +82-42-821-4790, Email: elcapbk@naver.com

하거나 위상 샘플링(Sampling) 기반의 DRFM(Digital Radio Frequency Memory)을 활용하여 기만(Deception) 재밍을 수행하여 레이다의 탐지거리 및 표적 속도 정보를 기만한다[3][4].

FHSV(Frequency Hopping and Slope Varying) LFM 레이다는 전자기전의 잡음 또는 기만 재밍에 대응하기 위해 송신 펄스마다 chirp rate 또는 중심주파수를 변화시키는 대전자전 기법을 사용한다[5][6].

이 논문에서는 잡음 재밍의 표적 탐지 거부(Denial) 기능과 같이 수신한 LFM 레이다 신호를 변형시켜 레이다에 송신함으로써 레이다의 CFAR 알고리즘을 기만하여 표적 탐지를 억압하는 의사-코히런트 신호(PCS, Pseudo-Coherent Signal) 재밍 기법을 소개한다[7]. 또한 이 논문에서는 단순히 주파수 편이를 만드는 기존의 DRFM은 PCS 신호의 발생이 불가능하므로 펄스 추적기와 DDS(Direct Digital Synthesizer) 기반의 새로운 PCS 발생기를 제안한다.

II. 본 론

2.1 의사-코히런트 신호

PCS 재밍 기법은 일반적으로 LFM 신호를 수신 후, 펄스폭은 유지하고 chirp rate는 변조하여 송신하는 기법이다[7]. 재밍 chirp rate(μ_j)를 설정하기 위해 사전에 분석된 LFM 레이다의 최대 chirp rate(μ_p)를 이용하며 여기서는 $M\mu_p$ 로 설정하였다.

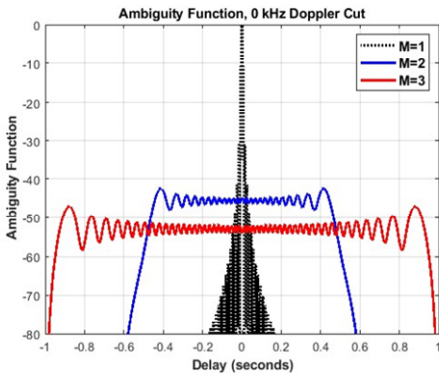


그림 1. LFM 신호의 모호성 함수 크기

Fig. 1. Ambiguity function magnitude of the LFM signal

그림 1은 PCS 신호를 수신한 LFM 레이다의 정합필터(Matched filter)의 출력 상태를 알아보기 위해 모호성 함수(Ambiguity function)를 구하고 도플러가 없는 조건에서 모호성 함수의 크기를 도시한 것이다[8]. $M=1$ 인 경우는 펄스가 압축되어 정점(Peak)을 형성하게 되어 표적을 탐지할 수 있지만 $M=2,3$ 인 경우는 펄스가 압축되지 못하여 표적을 탐지하기가 어렵게 된다.

2.2 PCS 발생기

재밍 대상 FHSV LFM 레이다의 펄스폭, 중심주파수 및 chirp rate를 사전에 분석하여 알고 있다는 가정하에서 PCS를 발생하는 방법은 수신된 LFM 신호를 DDS 등을 이용하여 생성한 chirp 신호와 혼합(Mixing)하여 PCS 신호를 발생하는 것이다.

이 논문에서는 그림 2 및 그림 3과 같이 펄스 추적기(Pulse tracker)와 DDS 기반의 FM Chirp 신호발생기로 구성된 PCS 발생기를 제안한다. 설명의 편의를 위해 해당 발생기의 중간주파수를 1GHz로 가정하였다.

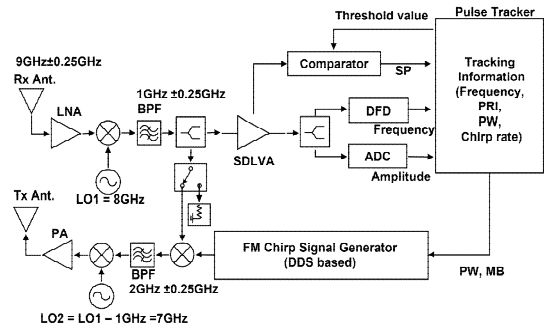


그림 2. 제안된 PCS 발생기
Fig. 2. Proposed PCS generator

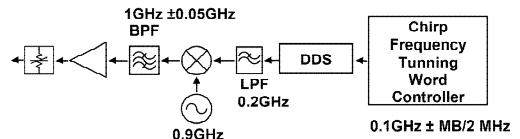


그림 3. DDS 기반 FM Chirp 신호발생기
Fig. 3. DDS based FM Chirp signal generator

펄스 추적기는 DSP/FPGA로 구성되며 DFD(Digital Frequency Discriminator), SDLVA(Successive

Detection Log Video Amplifier), ADC(Analog to Digital Converter) 등의 출력을 이용한다. DDS 기반 FM Chirp 신호발생기는 LPF(Low Pass Filter), BPF(Band Pass Filter), DDS, 국부 신호발생기(LO, Local Oscillator) 등으로 구성된다.

비교기(Comparator)는 임계치 정보를 펄스 추적기를 통해 전달받아 SDLVA 출력과 비교하여 임계치 이상이면 SP(Signal Present) 신호를 발생한다. 펄스 추적기는 SP 신호를 기반으로 DFD 및 ADC 출력을 수신하여 신호 도착 시간, 신호 세기, 주파수 등을 측정하고 해당 신호에 대한 펄스 설명자(PDW, pulse description word)를 생성한다.

생성된 PDW를 사전에 주어진 추적 대상 제원 정보(Tracking information)와 비교하면서 해당 레이더 신호를 추적한다. 이때 시간 및 주파수 필터를 이용하여 필터링과 비교하는 과정을 거치게 되므로 약 300ns 정도의 시간 지연이 발생하게 된다. 펄스 추적기로 레이더의 펄스가 추적되면, FM Chirp 신호발생기는 펄스 추적기로부터 펄스폭(PW, Pulse Width)과 대역폭 변조 정보(MB, Modulated Bandwidth)를 수신한다.

FM Chirp 신호발생기의 제어기는 DDS를 제어하여 고조파가 제거된 $0.1\text{GHz} \pm \text{MB}/2\text{MHz}$ 의 신호를 생성하고 LFP를 통과시킨다. 중심주파수를 1GHz로 만들기 위해 0.9GHz 국부신호와 혼합하여 DDS의 신호를 상향 변환시킨다. 증폭기와 감쇠기를 이용하여 JSR이 13dB 이상이 되도록 신호 세기를 조절한다. 이렇게 생성된 신호를 중간주파수로 내려진 수신 레이더 신호와 혼합시킨다.

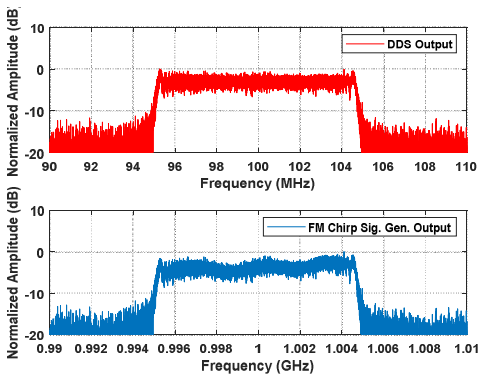


그림 4. FM Chirp 신호발생기 출력

Fig. 4. DDS based FM Chirp signal generator output

그리고 중심주파수를 원래의 중심주파수로 상향 변환시키기 위해 국부신호(LO2)와 혼합시킨 후 증폭하여 PCS 신호를 생성하고 안테나로 출력시킨다.

그림 4의 윗부분은 그림 3의 FM Chirp 신호발생기 내부 DDS의 출력 스펙트럼을 나타낸 것이며 아랫부분은 FM Chirp 신호발생기의 최종 출력 스펙트럼을 나타낸 것이다.

2.3 모의실험 결과

제안된 PCS 발생기의 성능을 확인하기 위하여

Matlab/Simulink 기반의 모의실험을 수행하였다. 실험 제원표는 표 1과 같으며 FHSV LFM 레이더는 고정 PRI 1ms로 100us 펄스폭을 가지는 두 개의 파형을 교대로 송신하고 CA(Cell Average)-CFAR를 사용하여 표적을 탐지한다고 가정하였다. 여기서 f_k , μ_k 는 각각 k 번째 펄스 중심주파수와 chirp rate를 의미하며 샘플링 주파수는 $4f_1$ 으로 설정하였다. 펄스 추적기로부터 전달되는 중심주파수와 대역폭 변조 정보의 오차는 각각 10kHz, 100kHz로 가정하였으며 발생 시간 지연은 300ns로 설정하였다.

표 1. Matlab/Simulink 모의실험 데이터

Table 1. Experimental data for Matlab/Simulink simulation

Parameter	Value	Parameter	Value
f_1/f_2	1/1.01 GHz	μ_1/μ_2	0.04/0.05 MHz/us
f_d	1 MHz	μ_j	0.1 MHz/us

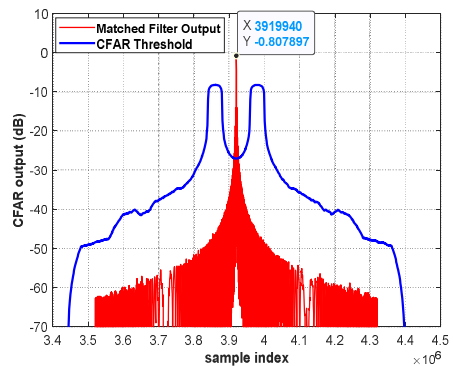


그림 5. 정상 상태의 CFAR 탐지 결과

Fig. 5. CFAR detection results (No Jamming)

그림 5는 f_1 및 f_2 중심주파수를 가지는 각 LFM 펄스에 따른 정합필터(Matched filter) 출력과

CA-CFAR detection 결과 중에서 첫 번째 f_1 펄스의 결과를 나타낸 것이다. 그림 5의 결과 채밍 신호가 없는 경우에는 표적이 탐지됨을 알 수 있다. 그림 6은 기존 DRFM을 이용하여 JSR 13dB의 주파수를 f_d 만큼 편이 시켜 속도기만 수행한 결과이며 표적 거리에 해당하는 sample index의 변화는 생기지만, 여전히 표적이 탐지됨을 알 수 있다. 그러나 그림 7과 같이 300ns의 지연을 두고 JSR 13dB의 PCS 신호가 레이다에 수신되는 경우 CFAR 알고리즘을 기만하여 표적이 탐지되지 않음을 확인할 수 있다.

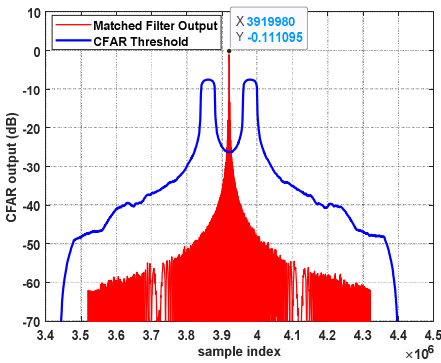


그림 6. 기존 DRFM 속도기만 재밍시 CFAR 탐지 결과
Fig. 6. CFAR detection results for conventional DRFM velocity deception jamming

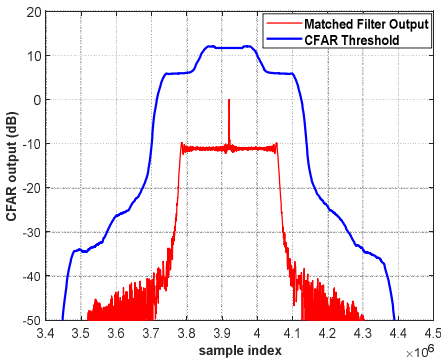


그림 7. PCS 재밍시 CFAR 탐지 결과
Fig. 7. CFAR detection results (PCS Jamming, JSR=13dB)

III. 결 론

이 논문에서는 FHSV LFM 레이다의 탐지 기능을 억압할 수 있는 의사-코히런트 신호(PCS)를 소개하고 이를 발생할 수 있는 펄스 추적기와 DDS 기반의 PCS 발생기를 제안하였다. 모의실험 결과

발생 지연시간이 약 300ns 이내이며 JSR 13dB 이상의 PCS가 FHSV LFM 레이다의 탐지 기능을 억압할 수 있음을 확인하였다. 그러나 지연시간, JSR, 채밍 chirp rate 및 CFAR 알고리즘에 따라 효과가 변화될 수 있으므로 관련된 추가연구가 필요하다.

References

- [1] D. C. Schleher, "Electronic Warfare in the Information Age", Artech House, pp. 201-226, Jul. 1999.
- [2] X. Liu and D. Li, "Analysis of cooperative jamming against pulse compression radar based on CFAR", EURSIP Journal on Advances in Signal Processing, Vol. 69, No. 1, pp. 1-12, Nov. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.aecue.2017.09.010>.
- [3] K. Davison and J. Bray, "Understanding digital radio frequency memory performance in countermeasure design", Applied Sciences, Vol. 10, No. 12, pp. 1-18, Jun. 2020. <https://doi.org/10.3390/app10124123>.
- [4] Y. I. Choi, S. G. Hong, W. Y. Lee, J. T. Park, and C. H. Lee, "Development of VGPO/I Jamming Technique for Phase Sampled DRFM", Journal of KIEES, Vol. 27, No. 12, pp. 1105-1111, Dec. 2016. <https://doi.org/10.5515/KJKIEES.2016.27.12.006>.
- [5] M. Soumekh, "SAR-ECCM using Phase-Perturbed LFM Chirp Signals and DRFM Repeat Jammer Penalization", IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 42, No. 1, pp. 191-205, Jan. 2006. <https://doi.org/10.1109/TAES.2006.1603414>.
- [6] L. Xia, et al., "An Identification Method of Corner Reflector Array Based on Mismatched Filter through Changing the Frequency Modulation Slope", Remote Sensing, Vol. 16, No. 12, Jun. 2024. <https://doi.org/10.3390/rs16122114>.
- [7] J. H. Lee and J. I. Jo, "Chirp Noise Generation device and method for compression pulse signal", US. Patent 11,411,670, Aug. 9, 2022.
- [8] B. R. Mahafza, "Radar Systems analysis and design using MATLAB", CRC Press, pp. 169-202, 2013.