

단일 플랫폼에서 동시 운용되는 펄스 도플러 레이더의 파형 및 변조 방식간의 간섭 분석

김은희^{*1)} · 유성현²⁾ · 김한생²⁾ · 이기원²⁾

¹⁾ 세종대학교 국방시스템공학과

²⁾ LIG넥스원(주) 레이더연구소

Interference Analysis Among Waveforms and Modulation Methods of Concurrently Operated Pulse Doppler Radars

Eun Hee Kim^{*1)} · Seong Hyun Ryu²⁾ · Han Saeng Kim²⁾ · Ki Won Lee²⁾

¹⁾ Department of Defense Systems Engineering, Sejong University, Korea

²⁾ Radar R&D Center, LIGNEX1, Co., Ltd., Korea

(Received 11 August 2021 / Revised 18 October 2021 / Accepted 19 November 2021)

Abstract

As the application field of radar is expanded and the bandwidth increases, the number of radar sensors operating at the same frequency is continuously increasing. In this paper, we propose a method of analyzing interference when two pulse doppler radars are operated at the same frequency with different waveform which are designed independently. In addition, we show that even for a previously designed LFM waveforms, the interference can be suppressed without affecting the performance by changing the sign of the frequency slope by increasing/decreasing, or by modulating the pulses by the different codes. The interference suppression by different slopes is more effective for similar waveform and the suppression by the codes increases as the number of pulses increases. We expect this result can be extended to the cases where multiple radars are operated at the same frequency.

Key Words : Pulse Doppler Radar Waveform(펄스 도플러 레이더 파형), Interference(간섭), LFM Modulation(선형주파수 변조), Binary Code Optimization(바이너리 코드 최적화)

1. 서론

최근 레이더의 응용분야가 늘어남에 따라 동일한 대

역에서 다수의 레이더 센서가 동시 운용되는 예가 늘어나고 있으며, 고해상도 및 정확도를 확보하기 위한 높은 주파수로의 이동으로 인해 타 레이더 뿐 아니라 통신 등의 다른 장비와의 대역 공유상황도 증가하고 있다. 통신 분야에서의 주파수 대역공유는 주파수 분할 뿐 아니라 코드 분할(CDMA, Code Division Multiple

^{*} Corresponding author, E-mail: eunheekim@sejong.ac.kr
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

Access), 시분할(TDMA, Time Division Multiple Access) 방식으로 이루어지고 있으나, 레이다 분야, 특히 군용 레이다들은 주로 주파수 분할 방식으로 타 레이다와 사용 주파수를 상호 회피하는 방법으로 이루어져 왔다. 그러나 동일대역을 사용하는 레이다의 수가 증가하거나, 해상도 증가를 위해 사용 대역폭을 증가시키는 경우, 이러한 방식은 한계를 가지게 된다.

동일 대역에서 다수의 레이다를 운용하는 또 다른 분야로의 다중 입출력(MIMO, Multiple Input Multiple Output) 레이다 또는 레이다 네트워크 분야가 있다^[1,2]. 타레이다의 신호를 간섭 신호로 여겨 완전 배제하고자 자기 반사 신호만을 탐지하는 단일 레이다 운용에 비해, 이러한 시스템은 전 신호를 모두 탐지하고 융합하는 방식을 취한다. 따라서, 경우에 따라 전체 레이다들을 통합 제어 하거나 동기화하여 운용하기도 한다. 예를 들어 가상 합성안테나의 크기(Aperture) 증가를 통한 해상도 향상을 목적으로 하는 MIMO 레이다의 경우, 동기화 된 신호로 직교 변조를 통해 각 신호를 탐지하고 이를 합성하는 방식을 취한다^[3-6].

본 논문에서는 중심주파수가 동일한 두 개의 레이다가 동일 플랫폼에서 독립적으로 동시 운용되는 경우에 대하여 간섭 성능을 분석하는 절차를 제시하였으며, 또한 간섭을 억제하기 위한 추가 변조방식을 제안하였다. 각각의 레이다에서 사용하는 파형은 탐지 확률에 따른 최대 탐지거리, 거리/속도 해상도 및 거리/속도 모호성 등의 요구 성능을 만족시키도록 따로 설계되며, 단일 파형으로 운용되거나 임무와 환경에 따라 여러개의 파형이 설계되어 적용적으로 선택 운용되기도 한다. 따라서 각 요구 성능에 따라 독립적으로 설계된 펄스 도플러 타입의 파형들이 두 개의 레이다에서 동시 운용될 때의 간섭 성능을 분석하는 것이 필요하다. 따라서 본 논문에서는 먼저 이를 위한 절차를 제시하고 최적 파형 조합을 판단할 수 있음을 보였다. 다음으로 설계된 요구 성능과 파형을 유지하면서 상호 간섭을 추가로 억제하기 위한 방법으로 선형 주파수 변조파형의 펄스내 기울기 변경과 펄스간 코드 변조 방법을 제시하고, 시뮬레이션을 통해 이들의 효과를 보였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 동일 중심주파수를 가지는 레이다가 동시 운용될 때, 파형간의 상호 간섭을 분석하기 위한 성능지표로서의 오탐율과 이에 따른 최적의 조합을 선택하는 절차를 제시하였으며, 3장에서는 펄스 내에서의 선형주파수 변조시

기울기를 up/down으로 변경하여 사용하였을 때와 펄스간 코드 변조를 추가하는 경우에 대한 간섭 저감 효과를 분석하였다. 펄스간 변조 코드를 설계하는 방법으로는 성능지표인 오탐율을 기준함수로 SA(Simulated Annealing) 알고리즘을 사용할 수 있음을 보이고, 이를 적용한 결과를 추가로 제시하였다^[7-9]. 이어서 4장에서는 결론을 정리하였다.

2. 상호간섭 성능분석

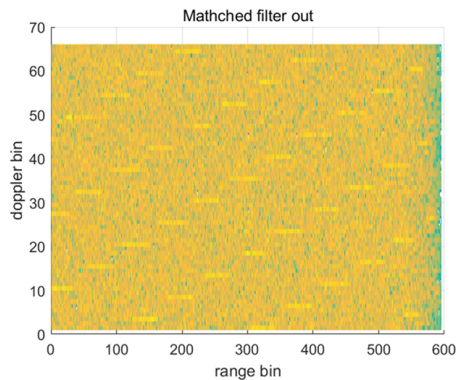
Table 1. Combination of the waveforms

순번	조합 (수신, 간섭)	순번	조합 (수신, 간섭)	순번	조합 (수신, 간섭)
1	(1,2)	22	(2,1)	43	(1,1)
2	(1,3)	23	(3,1)	44	(2,2)
3	(1,4)	24	(4,1)	45	(3,3)
4	(1,5)	25	(5,1)	46	(4,4)
5	(1,6)	26	(6,1)	47	(5,5)
6	(1,7)	27	(7,1)	48	(6,6)
7	(2,3)	28	(3,2)	49	(7,7)
8	(2,4)	29	(4,2)		
9	(2,5)	30	(5,2)		
10	(2,6)	31	(6,2)		
11	(2,7)	32	(7,2)		
12	(3,4)	33	(4,3)		
13	(3,5)	34	(5,3)		
14	(3,6)	35	(6,3)		
15	(3,7)	36	(7,3)		
16	(4,5)	37	(5,4)		
17	(4,6)	38	(6,4)		
18	(4,7)	39	(7,4)		
19	(5,6)	40	(6,5)		
20	(5,7)	41	(7,5)		
21	(6,7)	42	(7,6)		

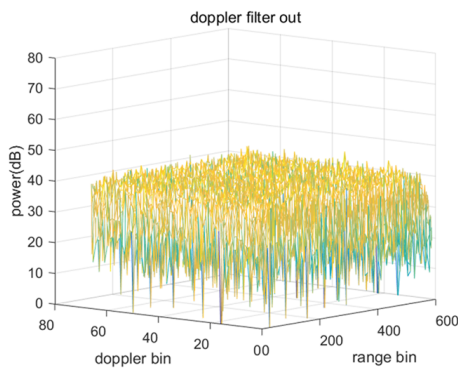
본 연구에 사용된 파형은 총 7개로 각각은 서로 다른 펄스반복주기(PRI, Pulse Repetition Interval), 펄스폭 및 펄스 수를 가지고 있으나 전체 적분 주기(CPI, Coherent Processing Interval)는 2.5 % 이내로 유사하다. 펄스폭의 차이는 최대 3배까지이며, 이에 따라 펄스

수도 최대 3배 이상의 차이를 가지고 있다. 정합필터와 도플러 처리에 의한 SNR의 증가, 즉 신호 처리 이득은 약 35.5 dB 정도로 파형간 차이는 1 dB 이내이다. 선형 주파수 변조의 대역폭은 동일하게 사용하였다. 7개의 파형세트에서 발생할 수 있는 2개의 파형조합은 Table 1에 나타낸 바와 같이 총 49개이며, 이는 동일한 파형을 동시 사용하는 경우도 포함한다.

서로 다른 파형이 선택되는 경우, 펄스폭이 다르면 대역폭이 동일하더라도 Fig. 1의 (a)와 같이 수신기의 정합필터(matched filter) 출력이 감소하며, 반복주기의 상이함으로 인하여 위상맞춤적분(Coherent Integration)은 불가능하므로, 도플러 처리를 수행하면 Fig. 1의 (b)와 같이 더욱 감소되는 것을 볼 수 있다. 이를 정량적으로 비교하기 위한 성능 지표로 단일 표적에 대해 간섭신호의 파워 분포로부터 생기는 오탐율을 택하고 이를 몬테카를로 방식으로 분석하였다.



(a) Matched filter out



(b) After dopper processing

Fig. 1. Output of signal processor for a different waveform

먼저 간섭 신호로 작용하는 레이더의 반사 신호를 신호 대 잡음비(SNR)에 따라 모의하고, 수신 레이더에서의 신호처리를 수행하여 수신신호의 파워를 RD (Range-doppler)맵에서 계산하였다. 이로 부터 간섭 신호 파워의 확률 분포를 수치적으로 계산하였으며, 반사 신호의 위치를 변경시키면서 파워의 분포를 누적, 갱신하였다. 이러한 분석 절차를 Fig. 3에 정리하였다. 반사 신호의 위치는 Fig. 2에서 나타낸 바와 같이 표적의 위치에 의해서 변경될 수도 있고, 두 레이더의 송신 시작의 동기화가 어긋나서 생길 수 있으나 수신 레이더에서는 시작 위치가 변하지만 PRI₁의 간격으로 신호가 나타나므로 동일한 효과로 동작하게 된다. Fig. 2와 3에서 τ_0 는 표적 위치에 의한 반사 신호의 지연 시간, τ_s 는 두 개의 레이더에서의 송신 시간 차이, τ_B 는 버스트 시간이며, PRI₁과 PRI₂는 두 송신 신호의 펄스 반복 주기이다.

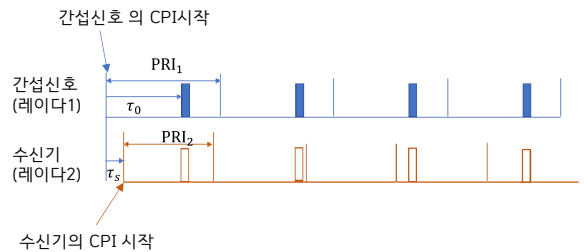


Fig. 2. Interference signal and receiver

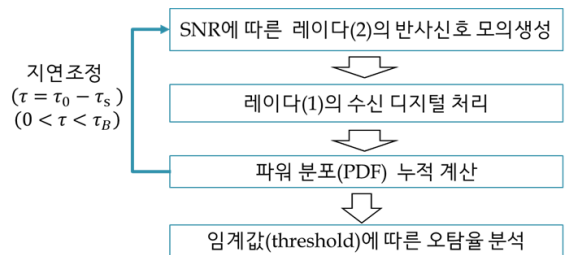
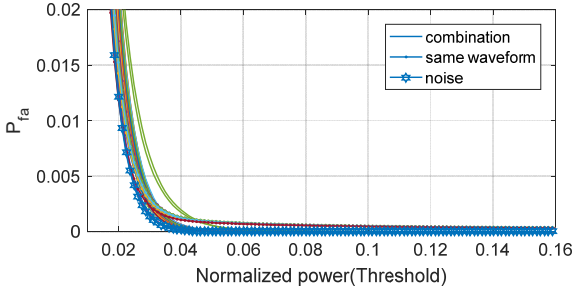


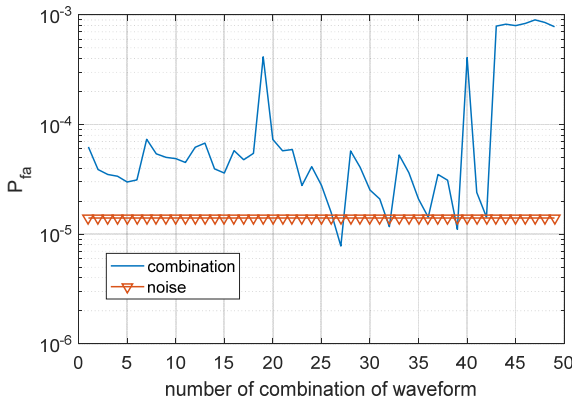
Fig. 3. Monte carlo analysis procedure

Fig. 4의 (a)는 수신기 입력단에서의 신호 대 잡음비(SNR)가 0 dB인 경우에 대하여 신호처리를 거친 후 해상 임계치 이상의 파워를 가지는 확률을 나타낸 것이다. x축은 최대 파워에 의해 정규화한 값이며, y축의 값은 파워값이 해당 임계치를 넘는 오탐율을 나타낸다. 알려진 잡음(noise)의 파워 분포(exponential)에서 변형된 형태를 나타내며, 파형의 조합에 따라 조금씩

다른 형태를 나타낸다. Fig. 4에서 별표선(—*)은 가우시안 열잡음만 존재하는 경우이며 나머지 선들은 각각의 조합(49개)을 나타낸다.



(a) False alarm probability over the threshold power



(b) False alarm probability of each combination for a threshold value of 0.0525

Fig. 4. False alarm Probability including interference signal

Fig. 4의 (b)는 임계치 0.0525에 대하여 각각의 조합에 대한 오탐율의 한 예를 나타낸 것으로 잡음만 존재하는 환경에 비해 오탐율이 높아졌음을 알 수 있다. 특히 43~49번 조합은 같은 파형이 사용된 경우여서 다른 경우에 비해 오탐율이 매우 높다. 서로 다른 파형이 사용된 경우 중에는 19번 조합과 40번 조합이 간섭이 심하여, 사용을 제한하여야 할 필요가 있음을 알 수 있는데, 이 두 조합은 동일한 파형 조합(5,6)에서 수신기와 간섭신호가 다른 경우이며, 이 조합으로 두 개의 레이다가 운용되는 경우 두 레이다가 모두 오탐율이 높아진다는 것을 알 수 있다. 이 조합은 사용된 파형내에서 펄스폭 및 펄스 반복 주기 등에서 가장

유사성이 높은 파형으로 펄스폭이 2.5 % 정도밖에 차이가 나지 않으며 펄스수의 차이도 1이다. 반면, 27번과 32번 조합은 간섭이 잡음신호만큼 작는데 이는 간섭 파형과의 펄스폭차이가 2.5배 이상이기 때문이다.

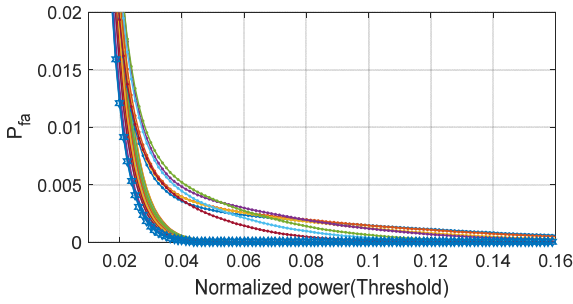
3. 변조에 의한 간섭억제 효과

앞장에서는 제시된 절차를 따라 오탐율이 높은 조합과 낮은 조합을 구분할 수 있고, 선택적으로 운용할 수 있음을 보였다. 본 장에서는 변조를 이용하여 간섭에 의한 오탐율을 추가로 억제하는 방식을 적용하고 성능을 비교하였다. 변조는 기존에 설계된 파형에서 성능에 영향을 미치지 않으면서 간섭을 최소화하기 위해서만 적용되도록 하였다.

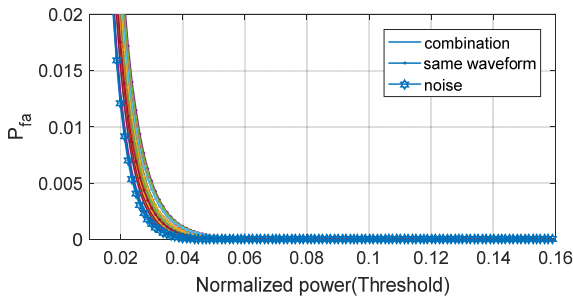
3.1 UP/DOWN CHIRP과 바이너리 코드 변조

펄스 도플러 타입의 탐색 레이다에서 가장 많이 사용되는 변조 방식은 선형주파수변조(LFM, Linear Frequency Modulation)로, 구현이 용이하고 모호성 함수(ambiguity function)의 특성상 거리와 속도에 대한 허용 정도(tolerance)가 위상변조파형의 못형(thumbtack)함수에 비해 상대적으로 높아서 탐색에 유리하다¹⁰⁾. 선형주파수변조 파형의 경우, 기울기가 반대로 변조하는 경우, 즉 증가변조(up chirp)와 감소변조(down chirp)로 택하는 경우에 간섭이 줄어든다. 따라서 본 연구에 사용된 파형 세트들에 대하여 선형주파수 변조 기울기를 증가와 감소로 변경하여 정합필터의 출력이 감소시키며, 펄스 간 바이너리 코드 (-1과 1) 변조를 추가하여 위상의 무작위성을 높임으로써 도플러 처리 출력을 추가로 감소시키는 방법을 적용하였다.

Fig. 5의 (a)는 Fig. 4의 (a)와 동일한 파형들에 대하여 선형주파수변조 기울기를 반대로 변조한 경우의 결과이다. 모든 조합에 대하여 높은 파워를 가지는 확률은 줄어드는 경향을 보이고 있으며, 특히 동일 파형을 사용하는 경우(점 + 실선으로 표시)에는 높은 파워 구간이 줄어들면서 중간 파워 구간의 신호들이 증가하는 효과가 있다. 파형 조합 중에서는 Fig. 4(a)의 연두색으로 표시된 조합의 감소가 두드러지는데 이들은 Fig. 6에서 19번과 40번 조합이다. 즉, 기울기의 부호를 다르게 변경하면 파형의 유사성이 높은 19번과 40번 조합도 다른 조합들과 거의 유사한 오탐율을 가지게 된다.



(a) up/down modulation



(b) up/down and binary code modulation

Fig. 5. False alarm probability according to the modulation

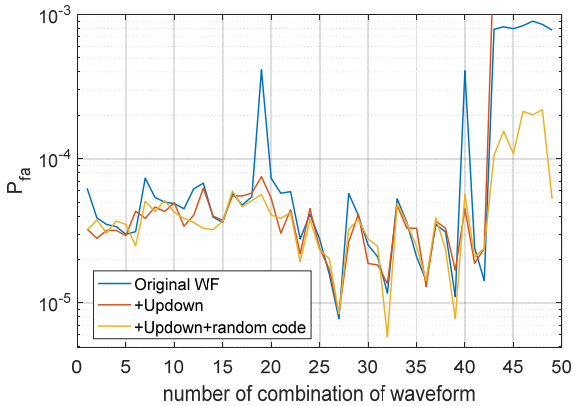


Fig. 6. False alarm probability according to the modulation for a threshold value of 0.0525

Fig. 5의 (b)는 펄스간 바이너리 코드 변조를 추가 적용한 경우로, 코드는 랜덤하게 생성하였다. 동일 파형을 사용하는 경우에 대한 효과가 크게 나타나는데, 이는 동일 파형(동일 펄스반복주기)로 인해 도플러 적분되었던 신호들의 위상에 무작위성이 추가되었기 때

문이다. 다른 파형 조합들에 대해서도 감소효과가 있으나 크게 두드러지지 않는데 이는 사용된 파형 세트들이 펄스수가 20~40 정도로 많지 않기 때문이며, 상대적으로 펄스 수가 많아지면 감소 효과가 커짐을 확인하였다.

3.2 바이너리 코드의 최적화 및 적용

앞절에서 사용한 바이너리 코드들은 랜덤하게 생성되었으나, 동시 운용되는 조합을 제어할 수 있으면 각각의 조합에 대하여 코드를 최적화 할 수 있다. 본 연구에서는 제시한 성능 지표, 즉 오탐율을 목적함수로 범용 최적화 방법인 SA(Simulated Annealing) 알고리즘을 적용하였다^[11].

SA 알고리즘은 Fig. 7에 나타난 바와 같이 정해진 대상 함수를 최적화 할 수 있도록 파라미터를 조금씩 이동하며 이를 반복함으로써 최적 파라미터를 찾는 방법이다. Fig. 7에서 입력인 N_1 과 N_2 는 두 개 코드의 수(pulse 수), N 은 전체 CPI내의 샘플수, M 은 사용되는 위상의 수로 바이너리 코드인 경우 2이다.

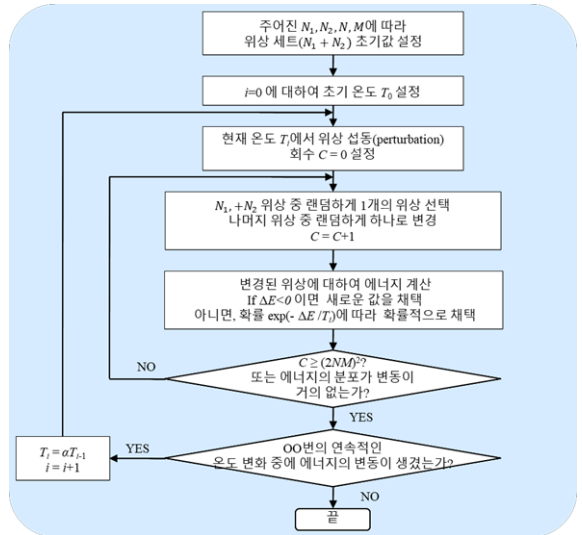


Fig. 7. Block diagram of SA algorithm

SA 알고리즘에서의 설계 요소는 1) 목적함수 2) 파라미터의 이동 방식 3) 초기온도(Initial temperature) 4) 온도 스케줄링(Cooling scheduling) 5) 각 온도에서의 평형결정 조건(Determination of equilibrium condition at each temperature) 6) 종료 조건(Stop condition) 등이다. 앞서 기술한 바와 같이 본 논문에서는 최적화 목적함

수로 오탐을 택하였으며, 전체 바이너리 코드중 하나씩 변화 시키는 이동방식을 취하였다. 또한, 초기 온도는 $T_0 = N_1 + N_2$ 로 택하였으며, 온도의 스케줄링은 다음과 같이 하였으며, 평형도달 조건은 연속적인 상호 간섭 함수의 평균과 분산이 일정범위 이하로 수렴하는 가이다. 이때, 반복 시간이 너무 길어지는 것을 방지하기 위해 최대반복회수는 $(2NM)^2$ 으로 제한하였다^[8].

$$\begin{cases} T_i = \frac{T_0}{\log(1+i)} & \text{if } T > 20 \\ T_{i+1} = 0.9T_i & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

마지막으로 종료 조건으로 온도를 연속적으로 3번 이상 낮추어도 목적 함수값이 변하지 않으면 종료하도록 하였다.

아래 결과는 19번 파형세트에 대하여 각각의 코드를 SA로 구한 것이며, 두 개의 파형은 각각 26, 25개의 펄스로 구성되어 있다.

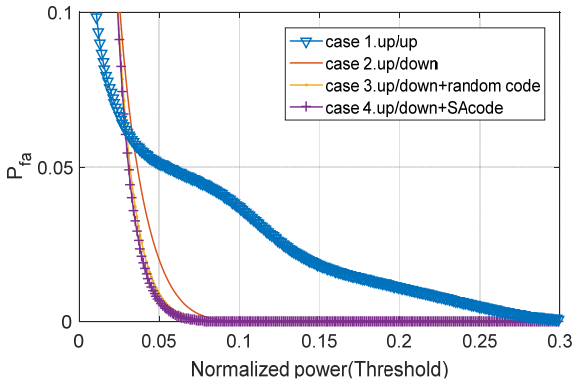


Fig. 8. False alarm probability by SA code

Fig. 8은 변조에 의한 확률 분포의 변경을 표시하고 있다. case 1은 같은 기율기(증가)의 변조를 사용한 경우이며, case 2는 기율기를 다르게 변조한 경우이다. 앞절에서도 기술한 바와 같이 이러한 방식의 변조에 의한 변화가 이 세트에 대해 큰 효과를 나타내고 있다. case 3은 펄스간 코드를 무작위 바이너리로 선정한 경우이며, case 4는 SA알고리즘에 의해 최적화된 바이너리 코드 변조의 결과이다. Fig. 9는 임계값을 바꾸면서 각 경우(case)에 대하여 오탐율을 계산한 것이다. 동일한 증가변조(upchirp)를 사용한 경우에 비해 변조를 추가할수록 오탐율의 감소는 매우 크게 나타

나며, 임계값을 높일수록 차이가 커지는 것으로 나타난다.

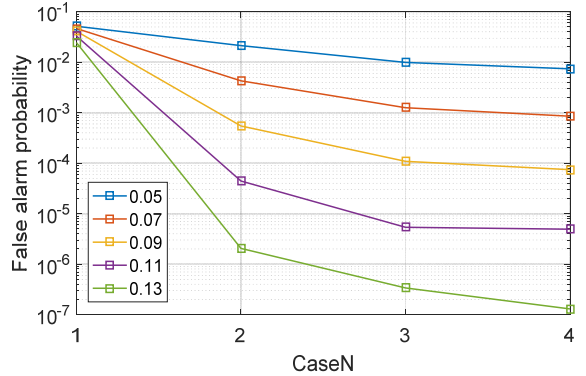


Fig. 9. False alarm probability according to the modulation

4. 결론

본 논문에서는 동일 주파수를 사용하는 레이더들이 독립적으로 설계된 서로 다른 파형으로 운용되는 경우에 대한 간섭을 통계적으로 분석하고 오탐율에 따라 최적 또는 최악의 조합을 분석하는 방법을 제시하였다. 또한 이미 설계된 파형이라 할지라도, 선형주파수 변조기율기를 증가/감소로 다르게 변조하거나 펄스마다 코드를 추가 변조하면 원래 설계 성능에 영향 없이 간섭효과를 억제할 수 있음을 보였다.

사용되는 파형에 따라 차이를 보이기는 하겠지만 다른 레이더에 의한 간섭 신호는 표적의 반사 신호이기 때문에, 신호 대 잡음비가 낮은 경우, 즉 신호의 크기가 잡음에 비해 작은 경우에는 영향이 크지 않다. 즉, 일반적으로 레이더에서 최소 신호 대 잡음비를 결정하는 최대 탐지거리에서는 영향이 작고 오히려 신호가 커지는 단거리에서 탐지 성능의 제약으로 작용할 것으로 예상되며, 허용 가능한 신호 대 간섭비는 파워 분포에 의한 탐지확률, 오탐지 확률로 정해져야 하나, 보수적 기준을 적용한다면 최소 신호 대 잡음비보다 낮추어야 할 것이다. 이러한 결과는 함정과 같이 하나의 플랫폼 위에 동일 주파수를 운용하는 다수의 레이더가 있거나, 4면 동시 운용되는 다기능 레이더에서 연속되는 면간의 간섭을 억제하는 방안으로 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 국방과학연구소 미래도전사업 지원으로 수행되었습니다.

References

- [1] M. Goppelt, H. Blöcher, and W. Menzel, "Automotive Radar-Investigation of Mutual Interference Mechanisms," *Advances in Radio Science*, 8(B. 3), pp. 55-60, 2010.
- [2] Z. Geng, "Evolution of Netted Radar Systems," *IEEE Access*, Vol. 8 pp. 124961-124977, 2020.
- [3] H. He, P. Stoica, and J. Li, "Designing Unimodular Sequence Sets with Good Correlations: Including an Application to MIMO Radar," *IEEE Transactions on Signal Processing*, Vol. 57, No. 11, pp. 4391-4405, Nov. 2009.
- [4] Gini, Fulvio, Antonio De Maio, and Lee Patton, *Waveform Design and Diversity for Advanced Radar Systems*. London: Institution of Engineering and Technology, 2012.
- [5] E. H. KIM, K. BAIK, "MVDR Code Receiver for Code Multiplexing MIMO Radar," *Electronics Letters*, Vol. 55, No. 1, pp. 49-51, 2019.
- [6] K. Rambach and B. Yang, "MIMO Radar: Time Division Multiplexing vs. Code Division Multiplexing," *Conf. on Radar Systems(Radar 2017)*, Belfast, UK, October, pp. 1-5. 2017.
- [7] S. Kirkpatrick, C. D. Gelatt Jr., and M. P. Vecchi, "Optimization by Simulated Annealing," *Science*, Vol. 220, No. 4598, pp. 671-680, May 1983.
- [8] H. Deng, "Polyphase Code Design for Orthogonal Netted Radar Systems," *IEEE Transactions on Signal Processing*, Vol. 52, No. 11, pp. 3126-3135, Nov. 2004.
- [9] Jin Mo Yang, Whan Woo Kim, "A Study on Radar Waveform - Polyphase Sequence," *Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology*, Vol. 13, No. 4, pp. 673-682, 2010.
- [10] E. Yang, H. Lee, J. Song, "Maximum Likelihood Based Doppler Estimation and Target Detection with Pulse Code Modulated Waveform," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, Vol. 25, No. 12, pp. 1275-1283, 2014.
- [11] E. H. Kim, S. B. Kim, S. S. Han, S. J. Shin, and S. R. Oh, "Design of Polyphase Codes Using Simulated Annealing," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, Vol. 31, No. 4, pp. 383-393, Apr. 2020.