

자동 변조 식별 기반 재밍 기법의 성능 분석

김 광 열*, 신 요 안°, 김 태 훈*, 최 증 원*

Performance Analysis of Automatic Modulation Classification Based Jamming Scheme

Kwang-Yul Kim*, Yoan Shin°,
 Taehoon Kim*, Jeung Won Choi*

요 약

최적의 재밍 성능을 보장하기 위한 방법으로 수신 신호의 변조 방식을 식별하는 연구가 진행되고 있다. 그러나 현재까지 진행된 연구는 식별된 신호의 전체 심벌에 대한 재밍 성능을 분석하였으며, 실시간으로 자동 변조 식별을 수행하면서 재밍 변조를 수행했을 때의 성능은 분석되지 않았다. 따라서 본 논문은 제한된 심벌 개수 내에서 변조 식별을 위한 심벌 개수와 변조 식별 결과에 따른 재밍 성능의 관계를 수식적으로 도출하고 모의실험으로 재밍 성능을 검증하였으며, 최적의 재밍을 위한 요구 사항을 분석하였다.

Key Words : jamming, automatic modulation classification, multi-sensor, pulse duration, cumulants

ABSTRACT

In order to guarantee the optimal jamming performance, the research has been underway to classify the modulation scheme. However, the research conducted so far has analyzed the jamming performance against the classified signals, not the jamming performance according to the jamming modulation by the result of automatic modulation

classification (AMC) in real time. In this paper, we numerically derive the relationship between the number of symbols used for AMC and the jamming performance according to the AMC result within a limited number of symbols, verify the jamming performance by computer simulation, and analyze the requirements for optimal jamming.

I. 서 론

재밍은 전자기파를 이용하여 표적 신호를 교란시키는 대표적인 전자 공격으로 재밍 변조, 재밍 전력, 그리고 재밍 방식을 할당하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다^[1]. 이 중 전송된 신호의 변조 방식을 자동으로 식별하여 변조 방식에 따라 최적의 재밍 변조 신호를 설계하는 연구가 진행되었으며^[2], 변조 식별 성능을 향상시키기 위해 다중 센서 신호를 융합하여 신호 대잡음비 (Signal-to-Noise Ratio; SNR)를 향상시키는 연구가 각각 진행되었다^[3]. 그러나 표적 신호의 심벌 개수는 전자전의 특성상 제한적일 수 있으며, 변조 식별을 수행할 수 있는 최소 단위의 심벌에 대해 변조 식별을 수행하면서 재밍을 수행하는 것이 효율적이다. 따라서 본 논문은 제한된 심벌 개수 내에서 변조 식별을 위한 심벌 개수와 변조 식별 결과에 따른 재밍 성능의 관계를 수식적으로 분석하고, 모의실험을 통한 성능 검증과 함께 최적의 재밍을 위한 요구 사항을 분석한다.

II. 신호 융합 기반 AMC 모델

그림 1은 신호 융합 기반의 일반적인 자동 변조 식별 (Automatic Modulation Classification; AMC) 기법을 도시한 것이다. 고려된 기법은 한 개의 송신기, N_s 개의 다중 센서 노드, 그리고 AMC 기능을 포함하는 한 개의 융합 센터 (Fusion Center)로 구성된다. 다음은 융합 센터에서의 수신 신호를 표현한 것이다^[3].

$$r_F(n) = \sum_{m=1}^{N_s} b_m \{s_m(n) + g_m(n)\}, \quad (1)$$

* 본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소가 지원하는 미래전투체계 네트워크기술 특화연구센터 사업의 일환으로 수행되었습니다 (UD160070BD).

♦ First Author : School of Electronic Engineering, Soongsil University, kky1117@ssu.ac.kr, 정희원

° Corresponding Author : School of Electronic Engineering, Soongsil University, yashin@ssu.ac.kr, 증신회원

* The 2nd R&D Institute - 1st Directorate, Agency for Defense Development, {sky-top1; jwchoi}@add.re.kr, 정희원

논문번호 : KICS2018-01-006, Received January 4, 2018; Revised February 5, 2018; Accepted February 5, 2018

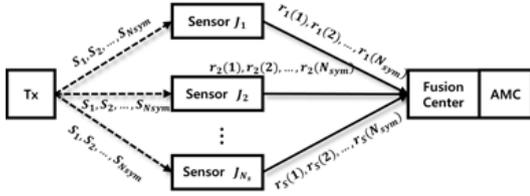


그림 1. 신호 융합 기반의 자동 변조 식별 기법
Fig. 1. Signal fusion based automatic modulation classification scheme

여기서 $s_m(n)$ 은 m 번째 센서에서의 수신 신호, b_m 은 m 번째 센서 신호의 정규화 된 가중치, $g_m(n)$ 은 AWGN (Additive White Gaussian Noise)를 의미한다. 그리고 AMC는 융합된 신호를 이용해서 신호의 변조를 식별하게 된다. 본 논문에서는 다양한 AMC 방식 중 큐물런트 (Cumulant) 기반의 계층적 AMC 기법을 이용한다. 다음 식은 본 논문에서 고려한 4차 큐물런트 중 \widehat{C}_{40} 를 수식적으로 표현한 것이다³⁾.

$$\widehat{C}_{40} = \left[\frac{1}{N_{sym}} \sum_{n=1}^{N_{sym}} r^4(n) - 3(\widehat{C}_{20})^2 \right] / (\widehat{C}_{21})^2, \quad (2)$$

여기서 2차 큐물런트인 \widehat{C}_{20} 과 \widehat{C}_{21} 은 다음 식과 같이 표현된다^{3,4)}.

$$\widehat{C}_{20} = \frac{1}{N_{sym}} \sum_{n=1}^{N_{sym}} r^2(n), \quad (3)$$

$$\widehat{C}_{21} = \frac{1}{N_{sym}} \sum_{n=1}^{N_{sym}} |r(n)|^2. \quad (4)$$

한편, AWGN 채널 환경일 때 식 (2)의 \widehat{C}_{21} 은 다음 식과 같이 \widetilde{C}_{21} 로 대체해야 한다⁴⁾.

$$\widetilde{C}_{21} = \widehat{C}_{21} - \widehat{C}_{21,g}, \quad (5)$$

여기서 $\widehat{C}_{21,g}$ 는 AWGN $g(n)$ 의 추정된 분산값을 의미한다.

III. AMC 기반 재밍 기법의 성능 분석

본 논문은 AMC 기반 재밍 기법의 성능을 식별 결과와 제한된 심벌 개수에 따라 분석한다. 고려된 변조 기법은 BPSK (Binary Phase Shift Keying), 4-PAM (Pulse Amplitude Modulation), 16-QAM (Quadrature

AM), 그리고 8-PSK를 고려하며, 재머는 AWGN 재머와 펄스 (Pulse) 재머를 고려한다.

3.1 식별 결과에 따른 재밍 성능 분석

본 논문에서는 BPSK 신호를 표적 신호라고 가정하며, 변조 식별을 위해 식 (2)의 절대값 $|\widehat{C}_{40}|$ 을 이용한다⁴⁾. 이 때 참고문헌 [4]에서는 BPSK 신호를 식별하기 위한 임계치의 상한값이 없기 때문에 정확한 식별 결과를 얻을 수 없다. 따라서 본 논문은 BPSK 신호의 특성 ($|\widehat{C}_{40}|=2$)을 고려하여 식별을 위한 임계치를 $1.68 \leq |\widehat{C}_{40}| \leq 2.32$ 로 적용한다. 그리고 AMC 결과에 따라 표적 신호인 경우에는 최적의 펄스 지속 시간이 고려된 펄스 재밍, 표적 신호가 아닌 경우에는 AWGN 재밍을 발생시킨다고 가정한다. 이 때 표적 신호인 BPSK 신호의 재밍 성능을 비트오율 (Bit Error Rate; BER)로 표현하면 각각 다음 식과 같다.

$$P_1 = \rho \cdot Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_j/\rho}}\right), \quad (6)$$

$$P_0 = (1-\rho) \cdot Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_j}}\right), \quad (7)$$

여기서 ρ 는 펄스 지속 시간, $Q(x) \triangleq 1/\sqrt{2\pi} \int_x^\infty e^{-t^2/2} dt$, E_b 는 비트 에너지, 그리고 N_j 는 재밍 전력 스펙트럼 밀도를 의미한다. 식 (6)을 통해 펄스 지속 시간이 짧을수록 강력한 재밍 신호를 발생시킬 수 있는 것을 볼 수 있으며, 최적의 펄스 지속 시간을 위해 다음 식을 이용한다.

$$\rho_{opt} = \arg\max_{\rho_k} \rho_k \cdot Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_j/\rho_k}}\right), \quad (8)$$

여기서 ρ_k 는 펄스 지속 시간의 특정한 범위를 의미한다. 따라서 센서 개수와 변조 식별 결과에 따른 BPSK 신호의 재밍 성능은 다음 식과 같이 표현된다.

$$P_b^{N_s} = \widehat{\alpha}^{N_s} \cdot \rho_{opt} \cdot P_1 + (1 - \widehat{\alpha}^{N_s}) \cdot (1 - \rho_{opt}) \cdot P_0, \quad (9)$$

여기서 $\widehat{\alpha}^{N_s}$ 는 센서 개수 N_s 에 따른 변조 식별 확률을 의미하며, 정규화 된 값을 갖는다.

3.2 제한된 심벌 개수에 따른 재밍 성능 분석

전자전에서 표적 신호의 심벌 개수는 제한적일 수

있으며, 심벌 개수에 따른 변조 식별 성능과 재밍 성능을 분석할 필요가 있다. 본 논문에서는 심벌 개수를 $N_{sym} = 100$ 으로 고정하고, 변조 식별을 위한 심벌 개수 N_{AMC} 와 P_1 인 경우의 심벌 개수 N_{opt} 의 비율에 따른 재밍 성능을 분석한다. 이 때 N_{AMC} 개수와 P_0 인 경우에는 AWGN 재밍을 수행하며, P_1 인 경우에만 펄스 재밍을 수행한다. 다음 식은 변조 식별을 위한 센서 개수와 심벌 개수에 따른 재밍 성능을 표현한 것이다.

$$P_{b,AMC}^{N_s} = \frac{(N_{sym} - N_{AMC})}{N_{sym}} \cdot P_b^{N_s} + \frac{N_{AMC}}{N_{sym}} \cdot P_0 \quad (10)$$

IV. 모의실험 결과 및 결론

본 논문에서 분석한 제한된 심벌 개수에 따른 재밍 성능을 검증하고 분석하기 위해 모의실험을 수행하였다. 모의실험을 위해 그림 1의 AMC 모델을 고려하였으며, $N_s = 1$ 인 단일 (Single) AMC (“S-AMC”)와 $N_s = 10$ 인 다중 (Multiple) AMC (“M-AMC”)로 구분하여 모의실험을 수행하였다. 변조 기법은 앞서 언급된 바와 같이 BPSK, 4-PAM, 16-QAM, 8-PSK를 고려하였으며, 표적 신호인 BPSK 신호에 대한 이론적인 재밍 성능은 식 (10)을 이용하였다. 표 1은 모의실험을 위한 주요 파라미터이다.

그림 2는 변조 식별에 사용된 심벌 개수에 따른 식별 성능을 측정된 결과이다. 변조 식별 성능을 측정하기 위해 수신 신호의 $E_b/N_0 = \gamma = \{-10, -5\}$ [dB]로 설정하였다. 모의실험을 통해 N_{AMC} 가 증가할수록 통계적 특성에 의해 변조 식별 성능이 향상되는 것을 볼 수 있었는데, 특히 N_s 를 증가시키는 것이 N_{AMC} 를 증가시키는 것보다 식별 성능을 높이는 데 효율적인 것을 볼 수 있다. 따라서 제한된 심벌 개수에서 변조 식별 성능을 향상시키기 위해서는 다수의 센서 노드를 사용하는 것이 적합하다고 볼 수 있다.

표 1. 모의실험을 위한 주요 파라미터
Table 1. Main parameters for the simulations

Parameter	Value
Target modulation type	BPSK
Number of sensors N_s	{1,10}
Number of symbols N_{sym}	100
Number of symbols N_{AMC}	{10:10:100}
Cumulant and threshold	$1.68 \leq \hat{C}_{40} \leq 2.32$
Pulse duration range ρ_k	{ $1/N_{AMC}$:0.0001:1}

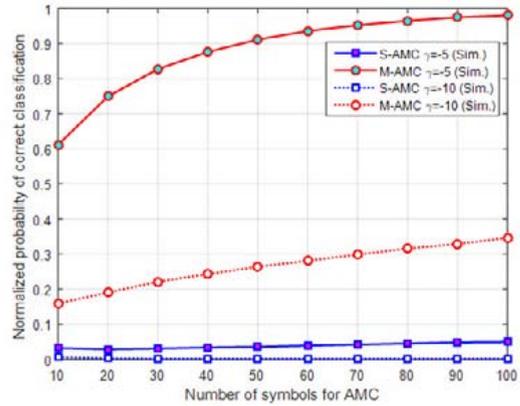


그림 2. 변조 식별에 사용된 심벌 개수에 따른 BPSK에 대한 식별 성능 ($\gamma = \{-10, -5\}$ [dB])
Fig. 2. Classification performance of BPSK according to the number of symbols used for AMC

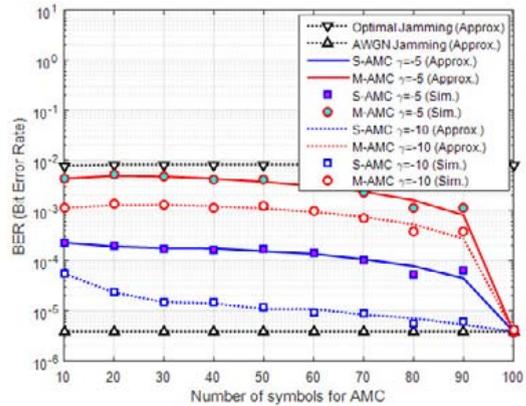


그림 3. 변조 식별에 사용된 심벌 개수에 따른 BPSK의 BER 성능 ($\gamma = \{-10, -5\}$ [dB], $E_b/N_j = 10$ [dB])
Fig. 3. BER performance of BPSK according to the number of symbols used for AMC

그림 3은 변조 식별에 사용된 심벌 개수에 따른 재밍 성능을 측정된 결과이다. $\gamma = -5$ [dB]인 경우, 식별 확률이 높음에 따라 펄스 재밍의 비율이 높아져 표적 신호에 대한 재밍 성능을 향상시킬 수 있다. 그러나 $\gamma = -10$ [dB]인 경우, 식별 성능이 낮기 때문에 AWGN 재밍의 비율이 높아져 표적 신호에 대한 재밍 성능이 저하된 것을 볼 수 있다. 따라서 재밍 성능을 향상시키기 위해서는 식별된 변조 신호에 따라 최적의 펄스 재밍을 수행하는 것이 필요하다는 것을 확인하였다. 한편, 통계적인 특성으로 인해 N_{AMC} 와 N_s 가 증가할수록 변조 식별 성능은 향상되겠지만 N_{AMC} 가 증가할수록 펄스 재밍의 비율이 작아지기 때문에 재밍 성능이 저하되는 것을 볼 수 있으며, $N_{AMC} = 100$ 인 경우 (변조 식별로만 사용한 경우) 재밍 전력만 고려한 AWGN

재밍의 성능에 수렴하게 되는 것을 볼 수 있다.

모의실험을 통해 변조 식별을 위한 심벌 개수와 변조 식별 결과에 따른 재밍 성능의 관계를 검증하였다. 결과적으로 재밍 성능을 향상시키기 위해서는 적은 개수의 심벌로도 변조 식별 성능을 향상시킬 수 있어야 하며, 이를 위해 다수의 센서를 이용하여 SNR을 향상시킬 필요가 있음을 보였다. 따라서 앞으로는 위치정보와 다수의 센서를 이용하여 적은 개수의 심벌로도 SNR을 향상시키는 연구를 수행하고, 이를 통해 변조 기법에 따라 최적의 재밍 성능을 보장할 수 있는 재밍 기법을 연구하고자 한다.

References

- [1] R. Poisel, *Modern Communications Jamming: Principles and Techniques*, Artech House, 2011.
- [2] S. Amuru and R. M. Buehrer, "Optimal jamming against digital modulation," *IEEE Trans. Inf. Forensics Security*, vol. 10, no. 10, pp. 2212-2224, Oct. 2015.
- [3] Y. Zhang, N. Ansari, and W. Su "Multi-sensor signal fusion-based modulation classification by using wireless sensor networks," *Wireless Commun. & Mob. Comput.*, vol. 15, no. 12, pp. 1624-1632, Aug. 2015.
- [4] A. Swami and B. M. Sadler, "Hierarchical digital modulation classification using cumulants," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 48, no. 3, pp. 416-429, Mar. 2000.