

수동형 레이더 JSR 분석

송규하, 곽현규, 김산해, 정인환, 이종환

국방과학연구소

khsong@add.re.kr

Analysis of Jamming-to-Signal Ratio of Passive Radar

Song KyuHa, Kwak HyunGyu, Kim SanHae, Jeong InHwan, Lee JongHwan

Agency for Defense Development

요약

본 논문은 FM 라디오 등을 제3의 송신원으로 이용하는 수동형 레이더(passive radar) 재밍을 위한 jamming-to-signal ratio(JSR) 분석을 제시한다. 바이스테틱 거리 방정식(bistatic range equation)으로부터 수동형 레이더에서 잡음 재밍 및 기만 재밍 조건하에서의 이론적 JSR을 유도하고, FM 라디오를 제3의 송신원으로 이용하는 수동형 레이더에서 재밍 송신 출력에 따른 잡음 및 기만 재밍 JSR 분석 결과를 제시하여 향후 수동형 레이더 재밍을 위한 JSR 선정에 기여하고자 한다.

I. 서론

수동형 레이더(passive radar)는 자체 전파 송신 없이 주변 신호원에서 방사되는 신호를 이용하여 이동 표적을 탐지하고 항적을 실시간 추적할 수 있어 최근 많은 관심과 활발한 연구가 이루어지고 있다[1-5]. 수동형 레이더가 이용하는 제3의 송신원에는 FM 라디오, 아날로그 TV, 디지털 TV 및 오디오, GSM 이동통신, WiFi 등 다양하며, 운용 목적에 따라 선택적 또는 복합적으로 이용되고 있다. 수동형 이미징, 비협조적 표적 식별 등 기존 능동형 레이더(active radar)에서의 응용 분야와 유사하게 연구 영역이 최근 확장되고 있어 미래 전장에서는 수동형 레이더와 능동형 레이더가 동시 운용될 것으로 예상되어 군수 분야에서의 수동형 레이더에 대한 대응 수단 확보 필요성이 증가되고 있다[4,5]. 본 논문에서는 수동형 레이더에 대한 잡음 및 기만 재밍 조건하에서의 jamming-to-signal ratio(JSR)를 바이스테틱 거리 방정식(bistatic range equation)으로부터 유도하고, FM 라디오를 제3의 송신원으로 이용하는 수동형 레이더에서 재밍 송신 출력에 따른 잡음 및 기만 재밍 JSR 분석 결과를 제시하여 향후 수동형 레이더 재밍을 위한 JSR 선정에 기여하고자 한다.

II. 수동형 레이더 JSR

일반적으로 수동형 레이더는 기준 신호를 수신하기 위한 기준 채널과 감시 신호를 수신하기 위한 감시 채널을 가지고 운용되며, 기준 신호는 각 송신원에서 방사되는 신호를 수동형 레이더에서 직접 경로로 수신한 신호이고, 감시 신호는 각 송신원의 신호가 표적들에 반사된 신호와 감쇄된 기준 신호 및 클러터 신호 등의 성분이 포함된 신호이다[1,3,5]. 수동형 레이더는 이들 두 신호간 상호상관으로부터 생성되는 amplitude-range-doppler(ARD) plot으로부터 constant false alarm rate(CFAR) 알고리즘을 적용하여 표적정보인 바이스테틱 거리 및 바이스테틱 속도 정보를 추출하며, 각 송신원별 또는 송신원 방송 채널별로 획득된 표적정보들을 이용하여 표적에 대한 공간상 위치를 탐지하고 실시간 항적을 추적/감시하는 기능을 수행한다[5].

그림 1과 같은 일반적인 수동형 레이더 운용 배치 구조에서 제3의 송신

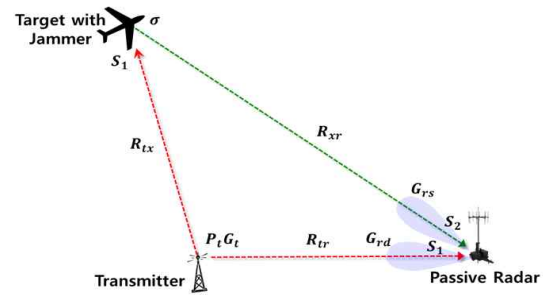


그림 1. 일반적인 수동형 레이더 운용 배치 구조

원의 신호가 등방성으로(isotropically) 방사될 경우 표적 및 수동형 레이더로의 입사 전력 밀도는 다음과 같이 정의될 수 있다[3].

$$S_1 = \frac{P_t G_t}{4\pi (R_{tx})^2} \quad (1)$$

또한, 표적으로의 입사 전력 밀도가 S_1 이고, 표적의 바이스테틱 RCS(radar cross section)가 σ 일 경우, 수동형 레이더로 반사될 수 있는 전력 밀도는 다음과 같이 정의될 수 있다[3].

$$S_2 = \frac{P_t G_t \sigma}{(4\pi)^2 (R_{tx} R_{tr})^2} \quad (2)$$

여기서, P_t 및 G_t 는 각각 송신원의 송신 전력 및 안테나 이득이고, R_{tx} 는 송신원과 표적간의 거리이며, R_{tr} 은 표적과 수동형 레이더간 거리이다. 만약 수동형 레이더의 기준 채널 및 감시 채널에서의 수신 이득을 각각 G_{rd} 및 G_{rs} 로 정의하고, 수신 안테나의 유효 면적은 A_{ef} 이며, 수동형 레이더에서의 잡음 등 손실 성분이 없다고 가정하면, 수동형 레이더에서 수신되는 표적반사신호 전력은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$S = \frac{P_t G_t \sigma A_{ef}}{(4\pi)^2 (R_{tx} R_{tr})^2} = \frac{P_t G_t G_{rs} \sigma \lambda^2}{(4\pi)^3 (R_{tx} R_{tr})^2} \quad (3)$$

수동형 레이더에서의 JSR은 제밍 상황 하에서의 레이더 성능을 정량적으로 판단하는 인자 중 하나이며, 그림 1과 같은 바이스테틱 배치 구조, 송신원 신호 전력, 수동형 레이더에서의 수신 안테나 이득 및 처리 이득, 수동형 레이더 제밍의 제밍 송신 안테나 이득, 송신 전력 및 제밍 기법 등 다양한 성분들에 의해 결정될 수 있다. 우선 수동형 레이더에 수신되는 제밍 신호 전력은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$J = \frac{P_j G_j G_{rs} \lambda^2}{(4\pi)^2 (R_{rr})^2} \quad (4)$$

여기서, P_j 및 G_j 는 각각 제머에서 송신하는 제밍 신호의 송신 전력 및 제밍 송신 안테나 이득이고, λ 는 제밍 주파수의 파장(wavelength)이다. 따라서 수동형 레이더 수신단에서의 제밍 신호와 표적반사신호간 JSR은 다음과 같이 식 (3)과 식 (4)로부터 표현할 수 있다.

$$\frac{J}{S} = \frac{4\pi P_j G_j R_{tx}^2}{P_t G_t \sigma} \quad (5)$$

수동형 레이더는 앞서 언급한 바와 같이 기준 신호와 감시 신호간 상호상관으로부터 얻어지는 ARD plot으로부터 표적을 탐지하며, 이 과정을 통해 실제 표적반사신호에 대해서는 처리 이득이 발생되며, 다음과 같이 정의된다[1,3].

$$G = BT \quad (6)$$

여기서 B 는 신호 대역폭이며, T 는 기준 신호와 감시 신호간 상호상관에서의 적분 시간이다. 신호 대역폭이 50kHz이고, 적분 시간이 1초일 경우 수동형 레이더가 얻을 수 있는 처리 이득은 약 47dB 이다.

수동형 레이더에 대한 제밍 기법은 크게 잡음 제밍과 기만 제밍으로 구분할 수 있으며[4,5], 잡음 제밍 신호는 수동형 레이더의 상호상관 처리에 의한 처리 이득이 발생되지 않지만, 기만 제밍 신호는 실제 수신되는 송신원 신호를 기반으로 생성하여 제밍 신호를 송신하기 때문에 정상적인 표적반사신호에서와 같은 처리 이득을 갖게 된다[5]. 따라서 식 (3), (4) 및 (6)을 이용하면 수동형 레이더에서의 잡음 제밍 JSR은 식 (7)과 같이 그리고 기만 제밍 JSR은 식 (8)과 같이 유도할 수 있다.

$$\left(\frac{J}{S} \right)_n = \frac{4\pi P_j G_j R_{tx}^2}{P_t G_t \sigma BT} \quad (7)$$

$$\left(\frac{J}{S} \right)_d = \frac{4\pi P_j G_j R_{tx}^2}{P_t G_t \sigma} \quad (8)$$

식 (7)에서 확인하듯이 수동형 레이더에서의 잡음 제밍 JSR은 수동형 레이더에서의 coherent 처리에 의해 얻어지는 처리 이득 BT 만큼 줄어든다. 기만 제밍 JSR은 동일한 처리 이득을 얻기 때문에 수동형 레이더 수신단에서의 JSR과 동일하다.

잡음 제밍 및 기만 제밍 조건하에서 제밍 송신 출력에 따른 수동형 레이더에서의 JSR 결과를 확인하기 위한 모의 수동형 레이더 운용 조건은 다음과 같다. 수동형 레이더는 (0, 0, 0)km 위치에 있고, 수동형 레이더가 이용하는 FM 라디오 송신원은 수동형 레이더 기준 상대 위치로 (91.81, -41.90, 0.646)km에 있으며, 94.7MHz 주파수로 일반 음역을 송출하고 있으며, 제머를 탑재한 표적은 (-32.88, 75.12, 5.0)km 위치에서 (-18.72, 89.28, 5.0)km 위치로 340m/s 속도로 이동하고 있다고 가정한다. 신호의 유효 대역폭은 50kHz, 상호상관처리를 위한 적분 시간은 1초로 설정하였다. 또한, 표적의 바이스테틱 RCS는 15dBsm으로 그리고 제밍 송신 안테

나 이득은 0dBi로 가정하였다. 따라서 표적의 초기 위치에서 수동형 레이더에 수신될 수 있는 표적반사신호는 식 (3)에 의해 약 -146dBm으로 매우 미약한 신호 세기를 갖게 되며, 수동형 레이더에서의 coherent 처리에 의한 표적 탐지 과정을 거치면 처리 이득이 반영되어 약 -99dBm 정도의 세기를 갖게 될 것으로 분석된다. 그림 2는 제밍 송신 출력이 1μW에서 5W 범위를 갖는 경우 잡음 제밍 및 기만 제밍에 대한 수동형 레이더 JSR 분석 결과를 보여주고 있다. 잡음 제밍 JSR이 처리 이득 만큼 기만 제밍 JSR 보다 낮음을 확인할 수 있으며, 수동형 레이더에 대한 잡음 제밍으로 유의미한 제밍 효과를 얻기 위해서는 수동형 레이더에서의 처리 이득을 고려하여 보다 강한 세기로 제밍 신호를 방사해야 하며, 반면에 기만 제밍은 표적반사신호와 유사한 크기의 제밍 신호로도 제밍 효과를 얻을 수 있는 것으로 분석된다.

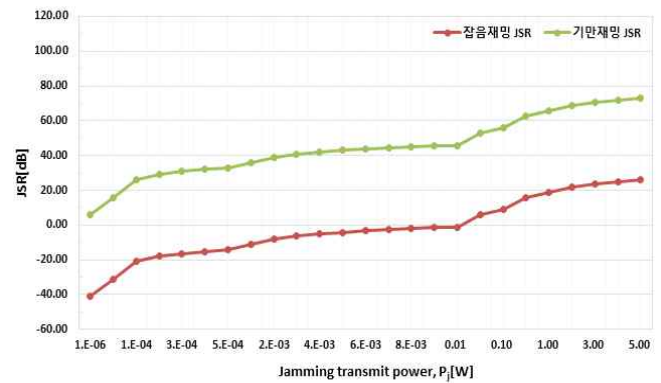


그림 2. 제밍 송신 출력에 따른 FM 라디오 기반 수동형 레이더 JSR

III. 결론

본 논문에서는 바이스테틱 거리 방정식으로부터 수동형 레이더에 대한 잡음 제밍 및 기만 제밍 조건하에서의 이론적 JSR을 유도하였으며, FM 라디오를 제3의 송신원으로 이용하는 경우 제밍 송신 출력에 따른 수동형 레이더에서의 잡음 및 기만 제밍 JSR 분석하였다. 본 논문에서 제시한 결과는 향후 수동형 레이더 제밍을 위한 제밍 기법별 JSR 선정에 기여할 것으로 기대되며, 다양한 모의실험을 통한 이론적 수동형 레이더 JSR 유도 결과의 유효성을 확인하기 위한 후속 연구가 필요하다.

참고 문헌

- [1] H. D. Griffiths and C. J. Baker, "An Introduction to Passive Radar," Second Edition, Artech-House, 2022.
- [2] M. Malanowski et al., "Analysis of detection range of FM-based passive radar," IET Radar Sonar Navig., Vol. 8, pp. 153-159, Feb. 2014.
- [3] M. Malanowski, "Signal Processing for Passive Radar," Artech-House, 2019.
- [4] S. Paine et al., "Evaluating the Performance of FM-based PCL Radar in the Presence of Jamming," IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., Vol. 55, pp. 631-643, April 2019.
- [5] KyuHa Song et al., "Analysis of Deception Jamming Effects on FM Radio based Passive Radar," Journal of the KIMST, Vol. 25, pp. 239-250, June 2022.