

수동형 레이더 JSR 분석

송규하*, 곽현규*, 김산해*, 정인환*, 이종환*

Analysis of Jamming-to-Signal Ratio of Passive Radar

Kyuha Song*, Hyungyu Kwak*, Sanhae Kim*, Inhwan Jeong*, Jonghwan Lee*

요약

본 논문은 수동형 레이더(passive radar) 전자 재밍을 효과적으로 수행하기 위한 JSR(Jamming-to-Signal Ratio) 분석을 제시한다. 이를 위해 송신원, 표적 그리고 수동형 레이더로 구성되는 수동형 레이더 운용 기하학적 배치구조에서의 바이스테틱 거리 방정식으로부터 수동형 레이더에 대한 잡음 및 기만 재밍 각각에 대한 JSR 수식을 유도한다. 그리고 다양한 재밍 조건에서 수동형 레이더에서의 표적 탐지 결과를 기반으로 재밍 효과를 확인할 수 있는 모의실험 결과를 제시하여, 향후 수동형 레이더 재밍을 위한 재밍 기법별 JSR 및 재밍 출력 선정에 기여하고자 한다.

Key Words : Passive Radar, Jamming Technique, Noise Jamming, Deception Jamming, JSR

ABSTRACT

This paper presents an analysis of the jamming-to-signal ratio(JSR) to effectively perform electronic jamming for passive radar. To do this, we derive the JSR equations for noise and deception jamming respectively for passive radar from a bistatic range equation in a passive radar geometry consisting of transmitter, target and passive radar. Then, by presenting simulation results to be investigated the jamming effects on the target detection results in passive radar under various jamming conditions, we intend to contribute to the selection of JSR and jamming transmit power for each jamming technique for passive radar in the future.

1. 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^[1-18]. 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^[1-7]. 최근에는 수동형 이

미징, 비협조적 표적 식별 등 기존 능동형 레이더(active radar)에서의 응용 분야와 유사하게 연구 영역이 확장되고 있으며^[2,3,8-10], 미래 전장에서는 수동형 레이더와 능동형 레이더가 동시에 운용될 것으로 예상되어 군수 분야에서의 수동형 레이더에 대한 대응 수단 확보 필요성이 증가되고 있다^[11-16]. 수동형 레이더 위치 및 이용 방송 채널에 대한 사전정보 제공 조건에서 단일 방송 채널에 대한 잡음 및 단일 톤 재밍 하에서의 FM 라디오 기반 수동형 레이더 성능 및 재밍 효과를 분석한 논문들이 일부 공개가 되었으며^[11,12], 최근에는 다양한 톤 재밍에 대한 FM 라디오 기

* First Author : Agency for Defense Development, khsong@add.re.kr, 정희원

° Corresponding Author : Agency for Defense Development, khsong@add.re.kr, 정희원

* Agency for Defense Development, kwak1015@add.re.kr, 정희원; ksh808@add.re.kr, 정희원; ihjeong1@add.re.kr; head75@add.re.kr
 논문번호 : 202303-039-0-SE, Received February 27, 2023; Revised April 7, 2023; Accepted April 13, 2023

만 수동형 레이더에서의 재밍 효과와 톤 재밍별 수동형 레이더에서의 표적 검출 확률을 분석한 연구 결과가 소개되었다¹³. 또한 잡음 및 톤 재밍 시 수동형 레이더 운용자가 운용 화면을 통해 재밍 상황을 인지함으로써 인한 재밍 노출 문제를 최소화하면서 전투기의 생존성을 높일 수 있는 수동형 레이더 기만 재밍에 대한 연구 결과가 소개되고 있다^{14,15}. 하지만 송신원, 재머를 탑재한 표적 그리고 수동형 레이더로 구성되는 수동형 레이더 재밍 기하학적 배치구조에서 수동형 레이더의 코히어런트(coherent) 처리 후 의미 있는 재밍 효과를 얻기 위해 재밍 기법별 JSR(Jamming-to-Signal Ratio)을 얼마로 선정해야 하는지에 대한 분석은 거의 없었다¹⁶.

본 논문에서는 일반적인 수동형 레이더 운용 기하학적 배치구조에서의 바이스테틱 거리 방정식으로부터 수동형 레이더에 대한 잡음 및 기만 재밍 각각에 대한 JSR 수식을 유도한다. 그리고 다양한 재밍 조건에서의 모의실험을 통해 수동형 레이더에서의 표적 탐지 결과로 잡음 및 기만 재밍으로 의미 있는 재밍 효과를 유발할 수 있는 JSR 선정 가능성을 확인하여, 향후 수동형 레이더 재밍을 위한 재밍 기법별 JSR 및 재밍 출력 선정에 기여하고자 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 일반적인 수동형 레이더 운용 기하학적 배치구조에서의 바이스테틱 거리 방정식으로부터 수동형 레이더 재밍 기법별 JSR 수식을 유도하고, 3장에서는 가상 수동형 레이더 재밍 운용 조건에서의 모의실험 결과를 제시하여 재밍 기법별 유의미한 재밍 효과를 얻기 위한 JSR 선정이 가능함을 보이고, 4장에서 결론을 맺는다.

II. 수동형 레이더 JSR

일반적으로 수동형 레이더는 기준신호(reference signal)를 수신하기 위한 기준 채널과 감시신호(surveillance signal)를 수신하기 위한 감시 채널을 가지고 운용하며, 기준신호는 각 송신원에서 방사되는 신호를 각 송신원과 수동형 레이더 간 직접 경로로 수신하는 신호이고, 감시신호는 각 송신원의 신호가 표적에 반사된 신호와 감쇄된 기준신호 및 주변 클러터에 의한 반사 신호 등이 포함된 신호이다^{1,7,14,15}. 수동형 레이더는 이들 두 신호간 상호상관으로부터 생성되는 ARD(Amplitude-Range- Doppler) plot으로부터 CFAR(Constant False Alarm Rate) 알고리즘을 적용하여 표적정보인 바이스테틱 거리 또는 TDOA(Time Difference of Arrival)와 바이스테틱 속도 또는

Doppler 주파수 정보를 추출하며, 다수의 송신원 또는 방송 채널별로 획득된 표적정보를 이용하여 표적에 대한 공간상 위치를 탐지하고 실시간 항적을 추적하여 전장을 감시하는 기능을 수행한다^{13,15}.

그림 1은 일반적인 바이스테틱 수동형 레이더 운용 배치의 한 예를 보여주고 있으며, 여기서 제3의 송신원의 신호가 등방성으로(isotropically) 방사된다고 가정하면 표적 및 수동형 레이더로의 입사 전력 밀도(incident power density) S_1 은 다음과 같이 정의될 수 있다⁷.

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

또한, 식 (1)과 같이 표적으로의 입사전력밀도가 S_1 이고 표적의 바이스테틱 RCS(Radar Cross Section)가 σ 일 경우, 수동형 레이더로 반사될 수 있는 전력 밀도 S_2 는 다음과 같이 정의될 수 있다⁷.

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

여기서 P_t 및 G_t 는 각각 송신원의 송신 전력과 송신 안테나 이득이고, R_{tx} 는 송신원과 표적 간의 거리이며, R_{xr} 은 표적과 수동형 레이더 간 거리이다. 만약 그림 1과 같이 수동형 레이더의 기준 채널 및 감시 채널에서의 수신 이득을 각각 G_{rr} 및 G_{rs} 로 정의하면, 이와 관련되는 채널별 안테나 유효 면적은 각각 $G_{rr}\lambda^2/(4\pi)$ 및 $G_{rs}\lambda^2/(4\pi)$ 이며⁷, 수동형 레이더에서의 잡음 등 손실 성분이 없다고 가정하면, 수동형 레이더에서 수신되는 기준신호 및 표적반사신호(target echo signal) 전력은 다음과 같이 각각 표현할 수 있다.

$$S_r = \frac{P_t G_t G_{rr} \lambda^2}{(4\pi)^2 (R_{tr})^2} \quad (3)$$

$$S_t = \frac{P_t G_t G_{rs} \sigma \lambda^2}{(4\pi)^3 (R_{tx} R_{xr})^2} \quad (4)$$

여기서 S_r 및 S_t 는 각각 수동형 레이더에서의 기준 신호 및 표적반사신호에 대한 수신 전력이며, λ 는 송신원 신호의 파장이며, R_{tr} 은 송신원과 수동형 레이더

간 거리이다. 식 (3)과 (4)는 수동형 레이더에서의 잡음 등 손실이 없다고 가정한 결과이다. 하지만 실제 환경에서는 열 잡음(thermal noise), 전파 손실, 케이블 및 전송 경로 손실, 안테나 방사 패턴 손실 등의 시스템 손실 성분이 존재한다^{5,7)}. 이러한 시스템 손실 성분을 L 로 표현할 수 있으며, 수식에 반영하고자 할 경우에는 식 (3) 및 (4)의 분모에 포함하면 된다. 본 논문에서는 수동형 레이더에서의 시스템 손실이 없다고 가정하고 수동형 레이더 재밍 기법별 JSR을 유도하고자 한다.

수동형 레이더의 JSR은 재밍 상황 하에서의 수동형 레이더 성능을 정량적으로 판단할 수 있는 인자 중 하나로서, 송신원-표적-수동형 레이더로 구성되는 바이스테틱 기하학적 배치구조, 송신원의 송신 전력 및 송신 안테나 이득, 수동형 레이더에서의 수신 안테나 이득 및 처리 이득, 수동형 레이더 재머의 재밍 송신 안테나 이득, 재밍 송신 전력 및 재밍 기법 등 다양한 성분들에 의해 결정될 수 있다. 우선 그림 1과 같은 운용 배치에서 재머를 탐재한 표적이 재밍신호를 방사한다면 수동형 레이더 수신단에 수신되는 재밍신호 전력은 앞서 설명한 수동형 레이더에서의 기준신호 및 표적반사신호 수식과 유사하게 다음과 표현할 수 있다.

$$J = \frac{P_j G_j G_{rs} \lambda^2}{(4\pi)^2 (R_{rr})^2} \quad (5)$$

여기서 P_j 및 G_j 는 각각 재머에서 송신하는 재밍 신호의 송신 전력 및 재밍 송신 안테나 이득이고, λ 는 재밍신호의 주파수에 대응하는 파장이다. 수동형 레이더는 기준 채널과 감시 채널로 기준신호 및 감시신호를 각각 수신하지만, 탐지하고자 하는 표적반사신호는 감시 채널로 수신되고, 수동형 레이더는 일반적으로 감시신호에서의 기준신호 간섭 최소화를 위해 송신원 방향으로 널포밍을 수행하므로¹⁵⁾, 수동형 레이더 JSR 수식 유도를 위한 수동형 레이더 재밍신호는 감시 채널로 수신되는 것으로 가정하였다. 식 (5)는 수동형 레이더에서의 기준신호와 감시신호 간 상호상관에 의한 코히어런트 처리가 수행되지 않은 수동형 레이더 수신단에서의 재밍신호 전력이다. 이 때 재밍신호와 기준신호 및 표적반사신호 간 JSR은 다음과 같이 식 (3), (4)와 식 (5)로부터 다음과 같이 각각 계산될 수 있다.

$$\frac{J}{S_r} = \frac{P_j G_j G_{rs} (R_{tr})^2}{P_t G_t G_{rr} (R_{xr})^2} \quad (6)$$

$$\frac{J}{S_t} = \frac{4\pi P_j G_j (R_{tx})^2}{P_t G_t \sigma} \quad (7)$$

수동형 레이더는 앞서 언급한 바와 같이 기준신호와 감시신호간 상호상관으로부터 얻어지는 ARD plot 으로부터 표적을 탐지하는데, 이는 수동형 레이더에 수신되는 매우 미약한 표적반사신호가 기준신호와의 코히어런트 처리 과정을 거치면서 표적반사신호에 처리 이득이 반영되기 때문이며, 수동형 레이더에서의 처리 이득은 다음과 같이 정의된다^{11,7)}.

$$G = BT \quad (8)$$

여기서 B 는 신호 대역폭이고, T 는 기준신호와 감시신호 간 상호상관에서의 적분 시간이다. 만약 수동형 레이더에서 수신한 신호의 대역폭이 $50kHz$ 이고 적분시간이 1초이면, 수동형 레이더의 표적반사신호가 얻을 수 있는 처리 이득은 약 $47dB$ 이다.

수동형 레이더에 대한 재밍 기법은 크게 잡음 재밍과 기만 재밍으로 구분할 수 있으며¹¹⁻¹⁶⁾, 잡음 재밍신호는 수동형 레이더의 기준신호와 상관성이 거의 없어, 잡음 재밍신호가 수동형 레이더의 감시신호에 포함되더라도 수동형 레이더의 상호상관 처리에 의한 처리 이득이 잡음 재밍신호에 반영되지 않는다. 반면에 기만 재밍신호는 재머에서 수신되는 송신원 신호를 기반으로 생성하므로 수동형 레이더는 실제 표적에서 반사되는 신호와 동일하게 처리하게 되어 잡음 재밍신호와 달리 기만 재밍신호는 표적반사신호에서와 동일한 처리 이득을 갖게 된다^{14,15)}. 따라서 식 (4), (5) 및 (8)로부터 수동형 레이더에서 코히어런트 처리

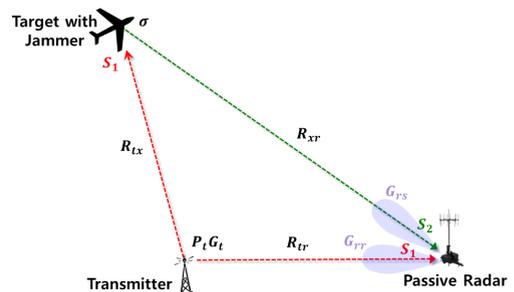


그림 1. 수동형 레이더 JSR 분석을 위한 기하학적 배치
Fig. 1. Geometry for analysis of JSR of passive radar

후 잡음 재밍 JSR은 식 (9)와 같이 그리고 기만 재밍 JSR은 식 (10)과 같이 유도할 수 있다.

$$\left(\frac{J}{S}\right)_n = \frac{J}{S_t BT} = \frac{4\pi P_j G_j (R_{tx})^2}{P_t G_t \sigma BT} \quad (9)$$

$$\left(\frac{J}{S}\right)_d = \frac{JBT}{S_t BT} = \frac{4\pi P_j G_j (R_{tx})^2}{P_t G_t \sigma} \quad (10)$$

수동형 레이더의 재밍 기법별 JSR 유도 결과를 보면, 잡음 재밍 JSR은 재밍신호가 수동형 레이더에서의 코히어런트 처리에 의한 처리 이득을 얻지 못하기 때문에 BT 만큼 재밍 효과가 줄어들게 된다. 따라서, 잡음 재밍으로 수동형 레이더에 의미 있는 재밍 효과를 유발하기 위해서는 수동형 레이더에서의 코히어런트 처리 이득을 고려하여 더 강한 신호세기를 갖는 재밍신호를 방사해야 한다. 반면에 기만 재밍신호는 표적반사신호와 동일한 처리 이득을 얻을 수 있어, 수동형 레이더에 수신되는 표적반사신호 전력과 유사한 신호세기를 갖는 재밍신호 송신으로도 수동형 레이더에 의미 있는 재밍 효과를 얻을 수 있을 것으로 예상된다. 기만 재밍신호는 잡음 재밍과 달리 수동형 레이더 운용자가 재밍 상황을 인지하지 못하도록 재밍신호를 방사하는 것에 의미가 있으므로^[4,15] 식 (10)을 참고하여 재머 이동 경로별 적절한 기만 재밍신호의 송신 출력을 선정하여 재밍신호를 방사해야 한다. 만약 너무 높은 JSR을 갖는 기만 재밍신호를 방사하면 재밍 전에 수동형 레이더에서 탐지되고 있던 표적들이 사라지게 할 수 있어 수동형 레이더 운용자에게 재밍 상황이 노출될 수 있다^[15].

III. 모의실험

수동형 레이더 JSR 분석 결과를 확인하기 위한 모의 실험을 위해 재머를 탐제한 표적, 수동형 레이더 그리고 FM 라디오 송신원의 공간상 배치는 그림 2와 같이 설정하였다. 그리고 수동형 레이더와 FM 라디오 송신원 위치 및 방송 주파수 정보는 사전정보로 제공되었다고 가정하였다. 그림 2에서, 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)km에서 94.7MHz 주파수로 약 40kHz의 평균 유효 대역폭을 갖는 일반 음악 방송을 송출하고 있으며, 재머를 탐제한 표적은 (-32.64, 75.36, 5.0)km 위치에서 (-18.48, 89.52, 5.0)km 위치로 340m/s 속도로

60초 동안 이동하고 있으며, 클러터는 없는 것으로 가정하였고, 재머를 탐제한 표적, 수동형 레이더 그리고 FM 라디오 송신원 간의 거리는 그림 2에 각각 표시하였다. 또한 수동형 레이더는 원형 8배열 안테나를 가지고 디지털 빔포밍/널포밍 알고리즘을 사용하여 기준신호 및 감지신호 분리를 수행하고, 기준신호 간섭 영향 최소화를 위해 ECA(Extensive Cancellation Algorithm)를 사용하였으며^[17,18], 기준신호와 감지신호 간 코히어런트 처리를 위한 CPI(Coherent Processing Interval) 즉 적분 시간은 1초로 설정하였고, 2D CA(Cell Averaging)-CFAR 알고리즘으로 표적 검출을 수행하였다^[7]. 표적의 바이스테틱 RCS는 15dBsm, 재밍 송신 안테나 이득은 0dBi로 가정하였다. FM 라디오 송신원, 수동형 레이더 그리고 재머를 탐제한 표적에 대한 주요 모의실험 주요 변수는 표 1에 정리하였다.

그림 2와 표 1의 모의실험 조건에서, 재머를 탐제한 표적이 초기 위치에 있을 때 FM 라디오 송신원의 음악 방송 신호가 표적에 반사되어 수동형 레이더에

표 1. 모의실험 변수
Table 1. Simulation parameters

Parameters		Values
FM Radio Transmitter	Antenna beam pattern	Isotropic
	Carrier frequency	94.7 MHz
	EIRP (Effective Isotropically Radiated Power)	3 kW
	Radio contents	Music
	Position	(91.81, -41.90, 0.646) km
Passive Radar	Antenna structure	8-element UCA
	Receiving gain	0 dBi
	Interference rejection algorithm	ECA
	CFAR algorithm	2D CA-CFAR
	False alarm rate	10-6
	CPI, T	1.0 s
Target with Jammer	Position	(0.0, 0.0, 0.0) km
	Bistatic RCS	15 dBsm
	Velocity	Constant 340 m/s
	Jamming antenna beam pattern	Isotropic
	Jamming antenna gain	0 dBi
	Initial position	(-32.64, 75.36, 5.0) km
Final position	(-18.48, 89.52, 5.0) km	

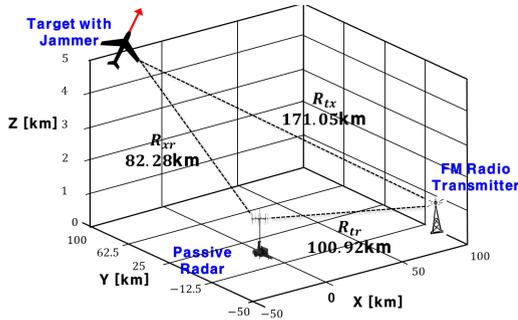


그림 2. 모의실험에서의 수동형 레이더 재밍 시나리오 배치
Fig. 2. Passive radar jamming scenario geometry in simulation

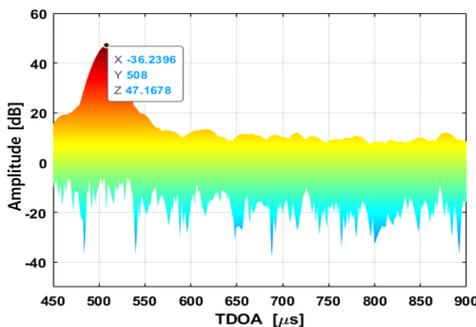
수신될 수 있는 표적반사신호는 식 (4)에 의해 $-146.16dBm$ 으로 매우 미약한 신호세기를 가질 것으로 계산된다. 그리고 수동형 레이더에서 유효 대역폭 약 $40kHz$ 의 음악 방송 신호를 대상으로 1초의 적분 시간으로 코히어런트 처리를 수행한다면 식 (8)에 의해 $46.02dB$ 의 처리 이득을 얻을 것으로 예상되어, 코히어런트 처리 후 표적반사신호는 $-100.14dBm$ 정도의 신호세기를 갖게 될 것으로 계산된다. 코히어런트 처리 시간 단위마다 음악 방송 신호의 실 유효 대역폭 변화 및 시스템 손실 등의 영향으로 일부 오차가 있을 수 있지만, 수동형 레이더의 ARD plot 상에서 표적은 적분 시간마다 처리 이득을 반영된 결과로 나타나게 될 것이다.

그림 3은 모의실험에서 사용한 음악 방송 신호로 얻을 수 있는 처리 이득 결과를 보여주고 있다. 그림 3 (a)는 음악 방송 신호의 초기 1초 동안 단일 크기를 갖는 기준신호와 감지신호 간 코히어런트 처리에 의해 얻어지는 처리 이득 결과이고, 그림 3 (b)는 모의 표적이 이동하는 60초 동안 얻어질 수 있는 처리 이득

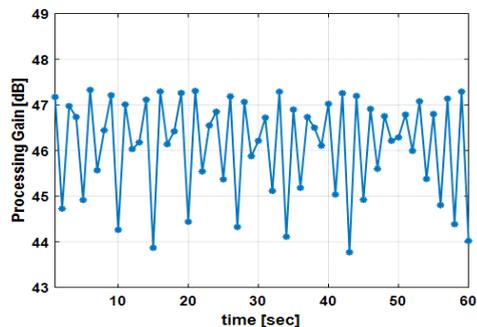
결과이다. 초기 1초 적분 시간 동안의 처리 이득은 약 $47.17dB$ 로 이 경우 식 (8)을 이용하면 유효 대역폭은 약 $52.09kHz$ 로 분석되며, 60초 동안의 모의 비행 경로에서 처리 이득은 $43.77dB \sim 47.33dB$ 범위를 가지는 것으로 분석되었으며, 평균 처리 이득은 $46.11dB$ 으로 약 $40kHz$ 의 평균 유효 대역폭을 갖고 있다. 즉 재머를 탑재한 표적이 이동하는 시간에서 처리 이득은 방송 신호의 내용에 따라 일정 범위 내에서 변화되며, 이에 따라 특정 JSR에서 표적 탐지 결과도 차이가 발생할 수 있음을 예상할 수 있다.

그림 4는 재밍이 없는 경우 재머를 탑재한 표적이 이동 초기 위치에 있을 때 수신된 기준신호와 표적반사신호를 이용한 코히어런트 처리로 얻어진 ARD plot 결과를 보여주고 있다. ARD plot 결과에서 표적 반사신호는 $-98.99dBm$ 정도 신호세기로 나타나고 있으며, 이는 수동형 레이더 수신단에서의 표적반사신호의 크기 $-146.16dBm$ 에 그림 3 (a)에서의 결과인 1초 동안 적분 시간에 의한 처리 이득 $47.17dB$ 가 반영된 것으로, 이동 초기 위치에서의 음악 방송 신호의 유효 대역폭이 앞서 계산한 방송 신호의 유효 대역폭 약 $40kHz$ 보다 약 $12kHz$ 더 넓어 예상한 ARD plot에서의 표적반사신호보다 큰 신호세기를 갖는 것으로 분석된다. 그리고 그림 5는 그림 4에서와 같이 얻어지는 ARD plot 결과에 2D CA-CFAR 알고리즘을 적용하여 얻어진 표적 검출 결과로서, 그림 5 (a)는 표적 이동 초기 위치에서의 표적 검출 결과이고, 그림 5 (b)는 60초 동안 표적이 이동한 경로에 대해 누적 표적 검출 결과를 보여주고 있다. 재밍이 없을 경우 정상적으로 표적이 탐지됨을 모의실험 결과에서 확인할 수 있다.

다음은 표적에 탑재된 재머에서 수동형 레이더로

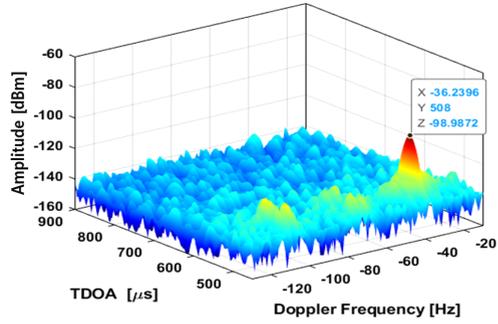
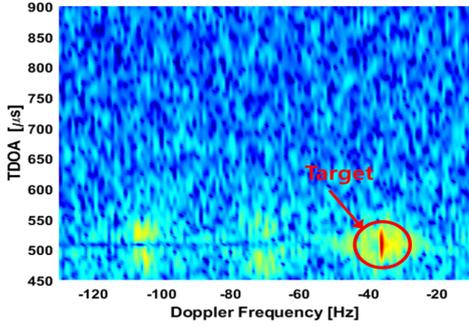


(a) Processing gain in the first second



(b) Processing gain over the entire simulated flight

그림 3. 모의실험에서의 음악 방송 신호에 대한 처리 이득
Fig. 3. Processing gain for music broadcast signal in simulation

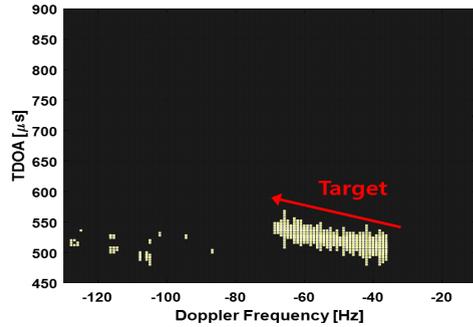
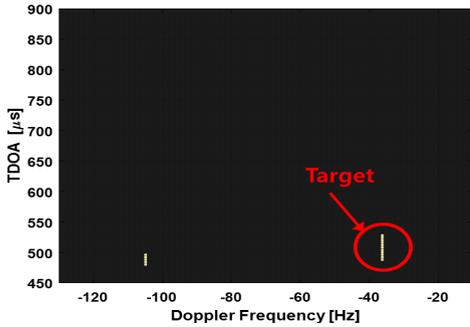


(a) 2D ARD plot

(b) 3D ARD plot

그림 4. 재밍 없는 경우 모의 표적 이동 경로 초기 위치에서의 ARD plot

Fig. 4. ARD plot at the starting point of the simulated target flight path in the absence of jamming



(a) CFAR output at the starting point of the simulated target

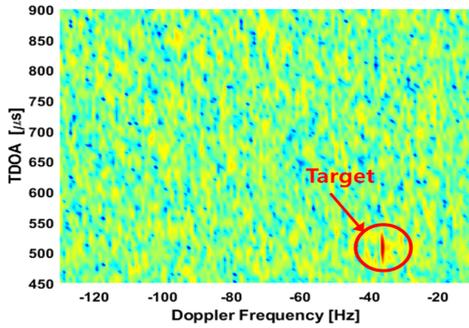
(b) Accumulated CFAR output over the entire simulated flight

그림 5. 재밍 없는 경우 모의 표적에 대한 CFAR 결과

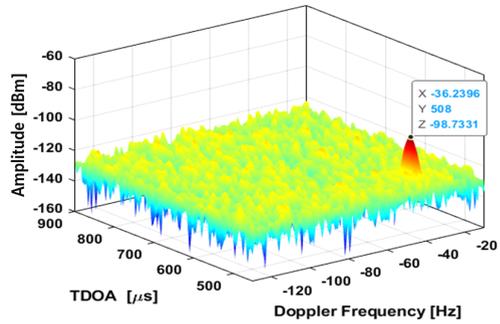
Fig. 5. CFAR output for the simulated target in the absence of jamming

잡음 재밍신호를 방사할 경우를 살펴보고자 한다. 그림 6과 그림 7은 각각 JSR 30dB를 갖는 잡음 재밍신호가 수동형 레이더 수신단에 수신되는 경우 수동형 레이더에서의 코히어런트 처리 후 얻어지는 ARD plot 및 CFAR 검출 결과이다. 그림 4와 그림 6을 비교해 보면, 잡음 재밍신호의 영향으로 전체적 ARD plot의 잡음 레벨이 상승한 것을 확인할 수 있다. 하지만, 수동형 레이더 수신단에서 JSR 30dB를 갖는 잡음 재밍신호는 코히어런트 처리 후 본 논문에서 유도한 식 (9)를 적용하면 처리 이득만큼 잡음 재밍 JSR이 줄어들게 된다. 즉 모의 표적 이동 초기 위치에서의 처리 이득인 47.17dB만큼 잡음 재밍 JSR이 줄어들어 코히어런트 처리 후 잡음 재밍신호의 JSR은 -17.17dB 정도가 되고, 따라서 그림 6 (b)에서 확인하는 바와 같이 재머를 탐제한 표적이 정상적으로 보이게 되고, 그림 7의 CFAR 검출 결과에서도 모의 표적 이동 전체 구간에 대해서 정상적으로 표적이 검출됨을 확인할 수 있다. 따라서, 수동형 레이더에 대한

잡음 재밍으로 수동형 레이더에서 표적 탐지를 방해하려면 수동형 레이더에서의 처리 이득을 고려하여 잡음 재밍신호를 송신해야 함을 모의실험으로 확인할 수 있다. 그림 8은 60초 동안의 전체 모의 표적 이동 구간에서 이용하는 음악 방송 신호로 수동형 레이더가 가지는 처리 이득 43.77dB ~ 47.33dB의 평균 처리 이득인 약 46dB를 기준으로 수동형 레이더 수신단에서의 JSR을 40dB ~ 50dB 범위에 대해 2dB 단위로 증가시키며 잡음 재밍을 수행했을 때 수동형 레이더에서의 누적 CFAR 결과를 보여주고 있다. 수동형 레이더 수신단에서 JSR 40dB인 경우 코히어런트 처리 후 잡음 재밍 JSR은 -7.33dB ~ -3.77dB 범위를 가지고, JSR이 2dB 증가할 때마다 코히어런트 처리 후 잡음 재밍 JSR 범위도 2dB씩 증가하여, JSR 50dB인 경우 코히어런트 처리 후 잡음 재밍 JSR은 2.67dB ~ 6.23dB 범위를 가진다. 그림 8의 결과에서 확인되는 바와 같이, 수동형 레이더 수신단에서 JSR 40dB 및 42dB에서는 모의 표적 이동 구간 동안 정



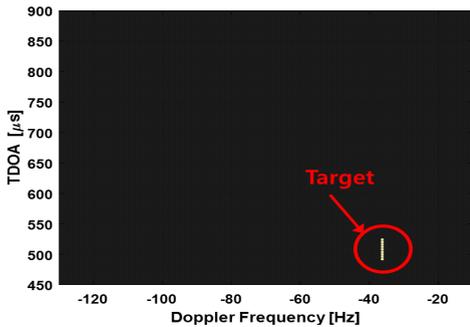
(a) 2D ARD plot



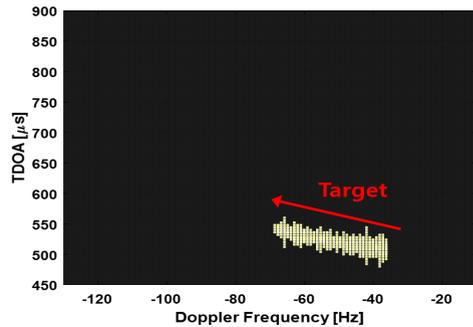
(b) 3D ARD plot

그림 6. 수동형 레이더 수신단에서의 JSR 30dB 잡음 재밍 존재 시 모의 표적 이동 경로 초기 위치에서의 ARD plot

Fig. 6. ARD plot at the starting point of the simulated target flight path in the presence of noise jamming with JSR 30dB at the passive radar receiving end



(a) CFAR output at the starting point of the simulated target



(b) Accumulated CFAR output over the entire simulated flight

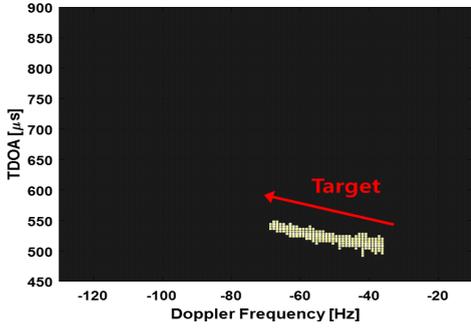
그림 7. 수동형 레이더 수신단에서의 JSR 30dB 잡음 재밍 존재 시 모의 표적에 대한 CFAR 결과

Fig. 7. CFAR output for the simulated target in the presence of noise jamming with JSR 30dB at the passive radar receiving end

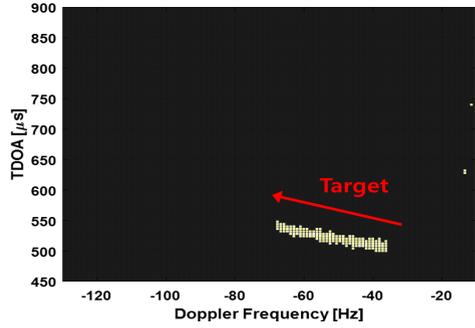
상적으로 표적이 탐지되지만, JSR 44dB부터 표적이 탐지되지 않는 경우가 발생하기 시작하고, JSR 48dB 이후 즉 수동형 레이더에서의 코히어런트 처리 후 잡음 재밍 JSR이 전체 모의 표적 이동 구간에서 0보다 큰 값을 갖는 경우에서 표적 탐지가 급격하게 감소하였으며, JSR 50dB에서는 표적이 전혀 탐지되지 않았다. 따라서, 수동형 레이더에서 코히어런트 처리 후 잡음 재밍 JSR을 약 3dB 이상으로 유지할 수 있는 재밍 송신 출력으로 잡음 재밍신호를 방사한다면 수동형 레이더를 효과적으로 재밍할 수 있을 것으로 예상된다.

끝으로 그림 2와 표 1의 모의실험 조건에서, 표적에 탑재된 재머가 수동형 레이더로 허위표적 기만 재밍신호를 방사할 경우 수동형 레이더에서의 코히어런트 처리 후 재밍 결과를 살펴보고자 한다. 그림 9와 그림 10은 각각 수동형 레이더의 수신단 기준 JSR

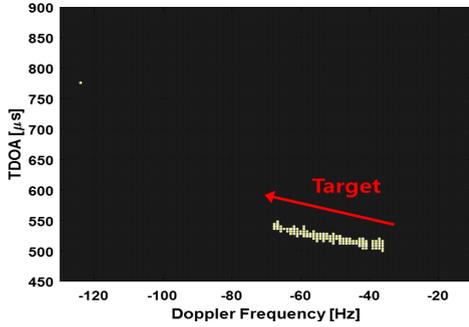
0dB의 허위표적 기만 재밍신호와 재머를 탑재한 표적에 대한 표적반사신호가 동시에 수동형 레이더로 수신될 경우 수동형 레이더에서 처리된 ARD plot과 2D CA-CFAR 알고리즘을 적용하여 얻어진 표적 검출 결과를 보여주고 있다. 여기서 허위표적은 실 표적에 대한 ARD plot 위치 기준으로 (+150μs, -60Hz) 만큼 떨어진 위치에 발생하도록 설정하였다. 기만 재밍의 경우에는 앞 장에서 분석한 바와 같이 수동형 레이더 수신단에서의 JSR과 수동형 레이더에서의 코히어런트 처리 후 JSR이 동일하다. 따라서, JSR 0dB의 허위표적 기만 재밍신호는 표적반사신호와 유사한 크기로 ARD plot 결과에 나타나게 되며, 그림 9 (b)에서 확인되는 바와 같이 실 표적은 약 -98.92dBm, 허위표적은 약 -99.2dBm의 크기를 갖는 것으로 나타났다. 재밍이 없는 경우인 그림 4 (b)에서의 결과 대비 실 표적의 미세한 크기 변화와 JSR 0dB로 허위표



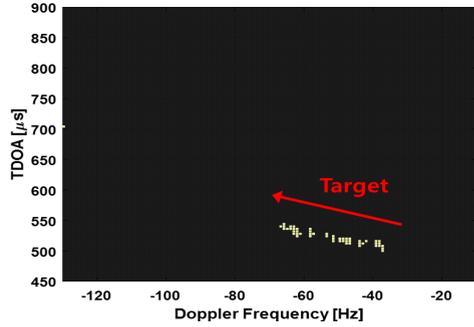
(a) JSR 40dB at the passive radar receiving end



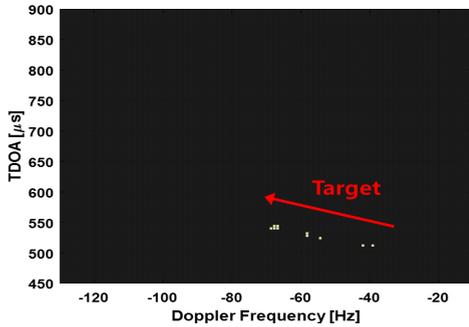
(b) JSR 42dB at the passive radar receiving end



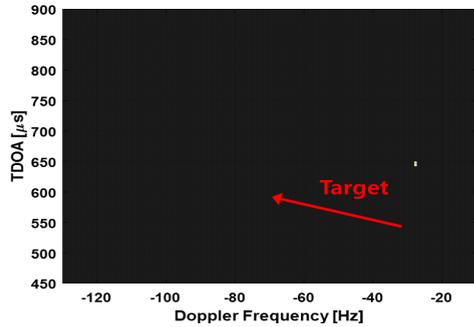
(c) JSR 44dB at the passive radar receiving end



(d) JSR 46dB at the passive radar receiving end



(e) JSR 48dB at the passive radar receiving end



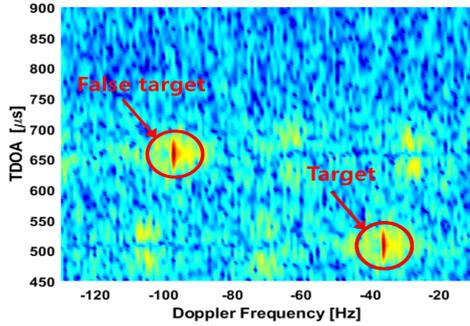
(f) JSR 50dB at the passive radar receiving end

그림 8. 수동형 레이더 수신단에서의 40 ~ 50dB JSR 잡음 재밍 존재 시 모의 표적에 대한 누적 CFAR 결과

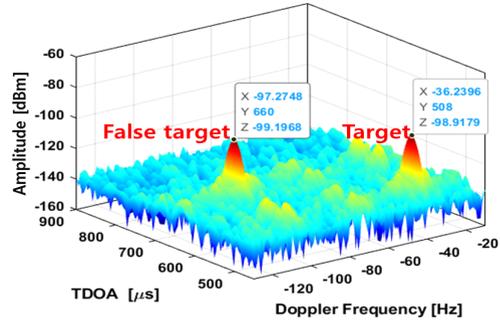
Fig. 8. Accumulated CFAR output for the simulated target in the presence of noise jamming with JSR 40 ~ 50dB at the passive radar receiving end

적 기만 재밍 신호 방사 조건이지만 실 표적과 허위 표적의 크기가 동일하지 않은 이유는 1초 동안 실 표적의 미세한 이동, 허위 표적 존재에 의한 기저 레벨의 변화 등의 영향으로 예상할 수 있다. 그리고 그림 10 (b)에서 확인되는 바와 같이, 모의 표적 이동 전체 구간에 대해서도 허위 표적과 실 표적이 모두 동시 탐지 되는 것을 확인할 수 있다. 따라서, 수동형 레이더에 대한 허위 표적 기만 재밍은 수동형 레이더에서 수신

되는 표적 반사 신호의 신호 세기를 고려한 JSR 선정으로도 즉 잡음 재밍 대비 매우 낮은 저전력 재밍 출력으로도 의미 있는 재밍이 가능함을 모의 실험으로 확인할 수 있다.

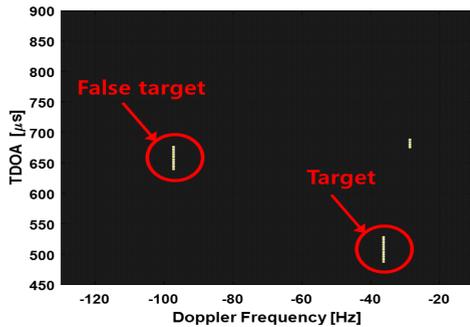


(a) 2D ARD plot

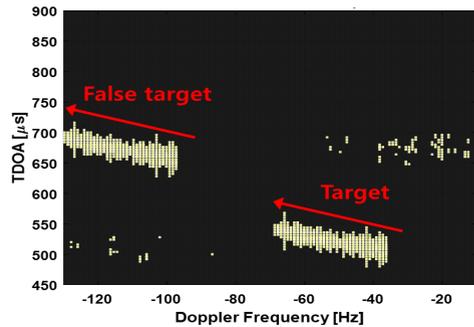


(b) 3D ARD plot

그림 9. 수동형 레이더 수신단에서의 JSR 0dB 허위표적 기반 재밍 존재 시 모의 표적 이동 경로 초기 위치에서의 ARD plot
 Fig. 9. ARD plot at the starting point of the simulated target flight path in the presence of false target deception jamming with JSR 0dB at the passive radar receiving end



(a) CFAR output at the starting point of the simulated target



(b) Accumulated CFAR output over the entire simulated flight

그림 10. 수동형 레이더 수신단에서의 JSR 0dB 허위표적 기반 재밍 존재 시 모의 표적에 대한 CFAR 결과
 Fig. 10. CFAR output for the simulated target in the presence of false target deception jamming with JSR 0dB at the passive radar receiving end

IV. 결 론

본 논문에서는 수동형 레이더에서의 바이스태틱 거리 방정식으로부터 수동형 레이더에 대한 잡음 및 기만 재밍 조건하에서의 이론적 JSR 수식을 유도하였고, 가상 수동형 레이더 재밍 시나리오에서 다양한 JSR에 대한 모의실험 결과를 제시하였다. 모의실험 결과, 수동형 레이더를 효과적으로 재밍하기 위해서는 잡음 재밍의 경우 수동형 레이더 수신단 기준으로는 수동형 레이더에서의 처리 이득 보다 약 3dB 큰 JSR을 갖도록 재밍 신호 송신을 해야 하며, 반면에 기만 재밍의 경우에는 수동형 레이더의 탐지 대상 표적에서 반사되는 표적반사신호 수준의 재밍신호 세기인 0dB JSR로도 유의미한 재밍 효과를 유발할 수 있음을 확인하였다. 따라서 향후 전투기 침투 경로를 고려하여 수동형 레이더 정상 동작을 방해할 수 있는 재밍

기법별 재밍 출력 선정에 기여할 수 있을 것으로 판단되며, 또한 재밍 대상 송신원 유효 방사 출력 및 최대 재밍 거리를 기반으로 수동형 레이더 재머가 가져야 할 재밍 출력 요구 능력을 결정하는 데에도 활용할 수 있을 것으로 기대된다. 본 논문의 가상 수동형 레이더 재밍 시나리오에서는 수동형 레이더 위치 및 수동형 레이더에서 이용하는 방송 채널 주파수 정보가 사전 정보로 제공되며 표적의 바이스태틱 RCS도 고정된 것으로 가정하였으나, 실제 환경에서는 그렇지 않을 것이다. 따라서 수동형 레이더 운용에 대한 사전정보 없는 조건에서의 재밍 영역을 고려한 JSR 선정, 그리고 표적이 이동함에 따라 송신원-표적-수동형 레이더로 구성되는 바이스태틱 기하학적 배치가 지속적으로 변화함에 따른 바이스태틱 표적 RCS 변화를 고려한 JSR 선정 또는 유지 방안에 대한 후속 연구가 필요할 것으로 판단된다.

References

- [1] H. D. Griffiths and C. J. Baker, *An Introduction to Passive Radar*, Second Ed., Artech-House, 2022.
- [2] K. Kulpa and M. Malanowski, "From klein heidelberg to modern multistatic passive radar," in *Proc. 20th Int. Radar Symp.*, pp. 1-9, Ulm, Germany, Jun. 2019. (<https://doi.org/10.23919/IRS.20198768176>)
- [3] J. Palmer, D. Cristallini, and H. Kuschel, "Opportunities and current drivers for passive radar research," in *IEEE Radar Conf.*, pp. 145-150, Johannesburg, South Africa, Oct. 2015. (<https://doi.org/10.1109/radarconf.2015.7411870>)
- [4] M. Malanowski, K. Kulpa, P. Samczynski, J. Misiurewicz, and J. Kulpa, "Long range fm-based passive radar," in *IET Int. Conf. Radar Syst.*, pp. 1-5, Glasgow, UK, Oct. 2012. (<https://doi.org/10.1049/cp.2012.1578>)
- [5] M. Malanowski, K. Kulpa, J. Kulpa, P. Samczynski, and J. Misiurewicz, "Analysis of detection range of FM-based passive radar," *IET Radar Sonar and Navig.*, vol. 8, pp. 153-159, Feb. 2014. (<https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2013.0185>)
- [6] K. Kulpa and J. Misiurewicz, "Stretch processing for long integration time passive covert radar," in *Int. Conf. Radar*, pp. 496-499, Shanghai, China, Oct. 2006. (<https://doi.org/10.1109/icr.2006.343481>)
- [7] M. Malanowski, *Signal Processing for Passive Bistatic Radar*, Artech-House, 2019.
- [8] J. Brown, et al., "Passive bistatic radar location experiments from an airborne platform," *IEEE AES Mag.*, vol. 27, pp. 50-55, Nov. 2012. (<https://doi.org/10.1109/maes.2012.6380826>)
- [9] M. K. Baczyk, P. Samczynski, K. Kulpa, and J. Misiurewicz, "Micro-Doppler signatures of helicopters in multistatic passive radars," *IET Radar Sonar and Navig.*, vol. 9, pp. 1276-1283, Dec. 2015. (<https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2015.0125>)
- [10] D. Cristallini, et al., "Space-based passive radar enabled by the new generation of geostationary broadcast satellites," in *IEEE Aerospace Conf.*, pp. 1-11, Big Sky, MT, USA, Mar. 2010. (<https://doi.org/10.1109/aero.2010.5446694>)
- [11] M. Inggs, et al., "Noise jamming of a FM band commensal sensor," *IET Radar Sonar and Navig.*, vol. 11, pp. 946-952, Apr. 2017. (<https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2016.0494>)
- [12] S. Paine, et al., "Evaluating the performance of FM-based PCL radar in the presence of jamming," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 55, no. 2, pp. 631-643, Apr. 2019. (<https://doi.org/10.1109/TAES.2018.2858158>)
- [13] H. G. Kwak, et al., "Analysis of tone jamming effects on FM radio based passive radar," *J. KICS*, vol. 47, no. 8, pp. 1037-1046, Aug. 2022. (<https://doi.org/10.7840/kics.2022.47.8.1037>)
- [14] K. H. Song, et al., "Analysis of deception jamming effects on passive radar," in *KIEES Summer Conf.*, p. 450, Jeju, Korea, Aug. 2021.
- [15] K. H. Song, et al., "Analysis of deception jamming effects on FM radio based passive radar," *J. KIMST*, vol. 25, no. 3, pp. 239-250, Jun. 2022. (<https://doi.org/10.9766/kimst.2022.25.3.239>)
- [16] K. H. Song, et al., "Analysis of jamming-to-signal ratio of passive radar," in *2022 KICS Fall Conf.*, pp. 1-2, Gyeongju, Korea, Nov. 2022.
- [17] R. Cardinali, F. Colone, C. Ferrletti, and P. Lombardo, "Comparison of clutter and multipath cancellation techniques for passive radar," in *Proc. IEEE Radar Conf.*, pp. 1-5, Waltham, MA, USA, Apr. 2007. (<https://doi.org/10.1109/RADAR.2007.374262>)
- [18] F. Colone, D. W. O'hagan, P. Lombardo, and C. J. Baker, "A multistage processing algorithm for disturbance removal and target detection in passive bistatic radar," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 45, no. 2, pp. 698-722, Apr. 2009. (<https://doi.org/10.1109/taes.2009.5089551>)

송 규 하 (Kyuha Song)



1996년 2월 : 경북대학교 전자공학과 졸업
1998년 2월 : 포항공과대학교 전자전기공학과 석사
2019년 8월 : 포항공과대학교 전자전기공학과 박사
1998년 2월~현재 : 국방과학연구소(ADD) 책임연구원

<관심분야> 전자전, 신호처리, 위치탐지, 인공지능 등
[ORCID:0000-0001-9800-2116]

정 인 환 (Inhwan Jeong)



2013년 8월 : 한국항공대학교 전자공학과 졸업
2015년 8월 : 한국항공대학교 전자공학과 석사
2015년 9월~현재 : 국방과학연구소(ADD) 선임연구원

<관심분야> 전자전, RF, 신호처리, 위치탐지 등
[ORCID:0000-0002-0114-6381]

곽 현 규 (Hyungyu Kwak)



2007년 2월 : 충남대학교 정보통신공학과 졸업
2009년 2월 : 충남대학교 정보통신공학과 석사
2009년 5월~현재 : 국방과학연구소(ADD) 선임연구원

<관심분야> 전자전, 통신, 신호처리, 위치탐지 등
[ORCID:0000-0002-7972-3038]

이 종 환 (Jonghwan Lee)



1999년 2월 : 충남대학교 전파공학과 졸업
2001년 2월 : 충남대학교 전파공학과 석사
2021년 2월 : 충남대학교 전파공학과 박사
2001년 1월~현재 : 국방과학연구소(ADD) 책임연구원

<관심분야> 전자전, 안테나 등
[ORCID:0000-0003-1162-0531]

김 산 해 (Sanhae Kim)



2000년 2월 : 숭실대학교 전자공학과 졸업
2002년 2월 : 숭실대학교 전자공학과 석사
2010년 8월 : 숭실대학교 전자공학과 박사
2011년 1월~현재 : 국방과학연구소(ADD) 책임연구원

<관심분야> 전자전, 신호처리, 위치탐지 등
[ORCID:0000-0002-1092-0877]