

FM 라디오 기반 수동형 레이더에 대한 톤 재밍 효과 분석

곽현규*, 김산해*, 정인환*, 이종환*, 송규하*, 은창수°

Analysis of Tone Jamming Effects on FM Radio Based Passive Radar

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

요 약

수동형 레이더는 자체 전파 송신이 없이 은밀한 감시가 가능하기 때문에 전장에서 전투기의 생존성을 위협하게 된다. 따라서 전투기 보호를 위한 수동형 레이더 대응 재밍 기술에 대한 연구가 필요하다. 본 논문에서는 FM(Frequency Modulation) 라디오 기반의 수동형 레이더에 싱글 톤, 가변 싱글 톤, 멀티 톤과 같은 다양한 재밍 신호 인가 시 톤 종류에 따라 특정 패턴을 가지는 것을 ARD(Amplitude Range Doppler) 맵을 통해 확인하고, FM 기반 수동형 레이더에 대한 톤 재밍 효과는 시나리오 기반 모의실험을 통해 수동형 레이더의 CFAR(Constant False Alarm Rate) 검출 결과에서의 표적 검출 확률로 비교 분석하고자 한다. 톤 재밍 신호 인가 시 FM 기반 수동형 레이더에 대한 톤 재밍 효과는 반송파 주파수의 싱글 톤 재밍 신호 인가 시 우수함을 확인하였고, 또한 FM 방송 유효대역폭 내에 재밍 신호 성분이 많을수록 재밍 성능이 우수함을 모의실험을 통해 확인하였다.

Key Words : FM Radio, Passive Radar, Electronic Attack, Tone Jamming, CFAR detection

ABSTRACT

Passive radar is capable of covert surveillance without own transmitting signal and it threatens the survivability of the fighter on the battlefield. Therefore, it is indispensable to study jamming technology for passive radar to protect fighter. In this paper, we showed that the ARD(Amplitude Range Doppler) map results for each tone type have a specific pattern in the presence of various different tone jamming signals such as single tone, variable single tone and multi-tone signals. In simulation, we compared and analyzed tone jamming effect on the FM(Frequency Modulation) based passive radar through the target detection probability of the CFAR(Constant False Alarm Rate) detection result. Tone jamming effect was predominant for passive radar in the presence of single tone signals at carrier frequency and it had better performance when jamming signal occupied much wider effective bandwidth of FM Radio signal.

I. 서 론

PCL(Passive Coherent Location), PBR(Passive Bistatic Radar) 등으로 알려진 수동형 레이더는 FM

라디오 방송신호, 아날로그 TV(Television), DAB(Digital Audio Broadcasting), DVB(Digital Video Broadcasting) 등과 같은 제 3의 송신원에서 방사한 신호를 이용하여 표적을 탐지하고 표적의 위치추적이

* First Author : Agency for Defense Development, kwak1015@add.re.kr, 정희원

° Corresponding Author : ChungNam National University, eun@cnu.ac.kr, 종신회원

* Agency for Defense Development, ksh808@add.re.kr, 정희원; ihjeong1@add.re.kr; head75@add.re.kr; khsong@add.re.kr, 정희원
논문번호 : 202203-040-A-RE, Received March 21, 2022; Revised May 10, 2022; Accepted May 20, 2022

가능한 시스템으로서 수십 년에 걸쳐서 연구개발이 이루어지고 있다¹⁻⁶⁾.

이러한 수동형 레이더는 자체 전파 송신이 없으므로 신호 송출을 위한 주파수 할당이 불필요하고 송신원 미설계에 따른 개발비용감소 등의 장점으로 민간 및 군수분야에서 많은 관심을 받고 있다^{2,7-9)}. 특히, 군수분야에서 수동형 레이더는 적군에 노출되지 않고 은밀(covert) 감시가 가능하여 전투기의 생존성을 위협할 수 있다. 이에 따라, 최근에는 전투기 보호를 위한 수동형 레이더 대응 재밍 기술 연구의 필요성이 대두되고 있고, 최근 논문들에서는 FM 라디오 방송신호를 이용하는 수동형 레이더에 대한 잡음(noise) 재밍과 싱글 톤(single tone) 재밍 시 수동형 레이더 표적 탐지 성능을 평가하여 재밍 효과를 분석한 연구 결과를 발표하고 있다^{10,11)}. 싱글 톤 재밍의 경우 FM 라디오 채널의 반송파 주파수에 대한 재밍 결과를 기술하고 있고, 다양한 톤 재밍 시의 재밍 효과는 포함하고 있지 않다. 따라서 본 논문에서는 반송파 주파수 이외의 여러 종류의 톤 재밍 시 수동형 레이더에 대한 재밍 효과를 비교 분석하고자 한다. 이를 위해 싱글 톤의 경우 반송파 주파수 이외의 주파수로 변경하여 방송 채널 내에 싱글 톤 재밍 효과를 확인하고, 수동형 레이더의 단위 처리시간 동안에 싱글 톤을 가변하거나 멀티 톤을 발생하여 이에 대한 재밍 효과와 표적 검출 확률에 대해 분석하고자 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 FM 라디오 기반 수동형 레이더 동작에 대하여 소개하고, 3장에서는 톤 종류별 재밍 효과에 대해 기술한다. 4장에서는 톤 종류별 재밍 성능을 모의실험을 통해 분석하며, 마지막으로 4장에서 결론을 맺는다.

II. FM 라디오 기반 수동형 레이더

그림 1은 FM 라디오 기반 수동형 레이더 시스템을 도시하고 있다. 수동형 레이더(Passive Radar)는 FM 송신원에서 방사되는 신호를 직접 수신하는 기준신호(Reference Signal)와 표적에 부딪혀 주변으로 반사되어 수신되는 표적반사신호(Target Reflected Signal)와의 교차상관관계(Cross - Correlation)를 이용하여 표적의 정보를 추출하고, 다수의 송신원 신호에서 추출된 표적정보를 기반으로 표적의 위치를 탐지하고 항적을 추적하게 된다^{1, 7, 12)}. 직접 수신하는 기준신호와 표적에 반사되어 수신되는 표적반사신호는 하나의 수신 배열안테나로 수동형 레이더에 수신되기 때문에 디지털 빔포밍 등의 신호처리 과정을 통해 기준신호

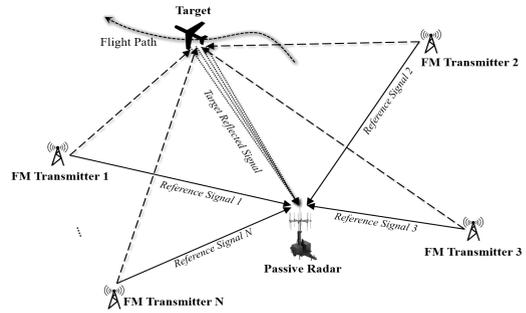


그림 1. FM 라디오 기반 수동형 레이더
Fig. 1. FM Radio Based Passive Radar.

와 표적반사신호를 분리하고¹³⁾, 표적반사신호에 포함된 기준신호 성분과 클러터신호 성분을 제거하는 적응적 필터링을^{7, 11)} 수행하여 신호제거가 미약한 표적 반사신호 성분이 교차상관관계 수행 시 잘 나타날 수 있도록 한다. 신호분리 및 간섭제거 이후, 식 (1)과 같은 교차상관관계를 통해 수동형 레이더 위치 및 FM 송신원 위치, 표적의 위치로부터 얻어지는 바이스테틱 거리(Bistatic Range)에 의한 기준신호와 표적반사신호 간 신호도착시간 차이인 TDOA(Time Difference Of Arrival)와 표적이 고속으로 이동함으로써 발생하는 바이스테틱 속도(Bistatic Velocity)에 따른 도플러(Doppler) 주파수 성분이 ARD 맵 상에 나타나게 되고, CFAR 검출을 통해 검출된 표적정보인 TDOA, 도플러 주파수를 추정한다. 이와 같은 절차를 다수의 FM 송신원별로 수행하며, FM 송신원별로 추정된 표적정보를 이용하여 표적의 위치를 탐지하고 항적을 추적한다.

$$A(\tau, f_d) = \int_T s_r(t) r^*(t - \tau) e^{-j2\pi f_d t} dt \quad (1)$$

여기서, $A(\tau, f_d)$ 는 표적반사신호 $s_r(t)$ 와 기준신호 $r(t)$ 와의 교차상관관계 결과로써 기준신호를 τ 만큼 시간지연을 시키고, f_d 만큼 주파수 천이시킨 후의 교차상관관계를 통한 ARD 맵 결과를 나타낸다. T 는 CPI(Coherent Processing Interval)로 불리는 수동형 레이더의 단위 처리 시간이다.

III. 톤 종류별 재밍 효과

앞장에서 설명한 바와 같이 수동형 레이더의 표적 위치 탐지를 위해서는 표적정보(TDOA, 도플러 주파수) 추정이 필요하고, 표적정보 추정은 식(1)을 이용

한 ARD 맵 생성 및 CFAR 검출기를 이용한 ARD 맵 상의 피크 검출을 통해 수행되며, 재밍 신호 인가 시 ARD 맵 상에 피크 패턴 변화가 발생함으로써 수동형 레이더의 표적 검출 성능에 영향을 미칠 수 있다. 본 장에서는 톤 재밍신호 인가 시 수동형 레이더의 ARD 맵 상에서 피크의 패턴이 변화되는 재밍 효과를 확인해 보고자 한다.

3.1 톤 재밍 신호

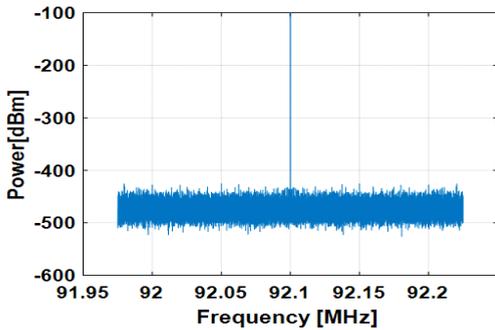
본 논문에서는 다양한 형태의 톤 재밍신호에 의한 수동형 레이더의 재밍 효과를 확인하기 위해 식 (2)~(4) 와 같이 톤 재밍신호를 생성하였다.

식 (2)의 $J_s(t)$ 는 싱글 톤 재밍신호이며 A 는 JSR(Jamming to Signal Ratio)에 따른 재밍신호 세기이고, f 는 톤 주파수이다. 톤 주파수는 참고문헌 [11]에서와 같이 반송파 또는 방송 채널 내 다른 주파수 즉, 반송파와 편차를 갖도록 변경이 가능하다. 식 (3)의 $J_v(t)$ 는 가변 싱글 톤으로써 Δt 는 CPI 시간 내에서 n 개의 톤으로 변화시키는 시간이다. 따라서 FM 방송신호의 대역폭(200kHz)에 대해서 싱글 톤을 Δt

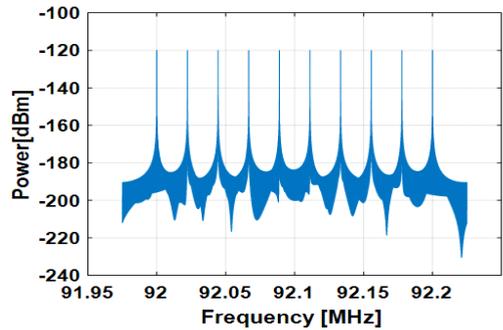
표 1. 재밍신호 종류 및 파라미터
Table 1. Jamming Signal Type and Parameters.

No.	Type		Parameters	Values
1	Single Tone		Frequency	variable
2	Variable Single Tone	chirp - up	Sweep Interval	20kHz
3		chirp-down		
4	Multi-Tone		Number of Tone	10
5			Tone Interval	uniform random

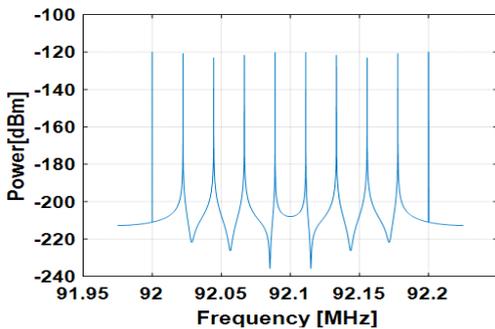
간격으로 스위치하여 톤 재밍신호를 발생한다. 식 (4)의 $J_m(t)$ 는 멀티 톤으로써 다수의 톤이 CPI 시간 동안 동시에 발생한다. 톤의 개수나 간격에 따라 재밍신호 생성은 달라질 수 있다. 표 1은 톤 재밍신호 종류 및 파라미터를 나타내며, 그림 2는 CPI 구간 동안의 생성 신호의 스펙트럼을 도식하고 있다.



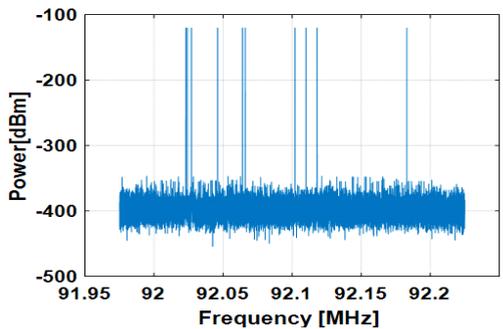
(a) Single Tone



(b) Variable Single Tone



(c) Multi Tone(Uniform)



(d) Multi Tone(Random)

그림 2. 톤 재밍신호 스펙트럼
Fig. 2. Spectrum of Tone Jamming Signals.

$$J_s(t) = A \exp(-j2\pi ft) \tag{2}$$

$$J_v(t) = A \exp(-j2\pi f_1 \Delta t) + \dots + A \exp(-j2\pi f_n n \Delta t) \tag{3}$$

$$J(t) = \frac{A}{N} \exp(-j2\pi f_1 t) + \dots + \frac{A}{N} \exp(-j2\pi f_n t) \tag{4}$$

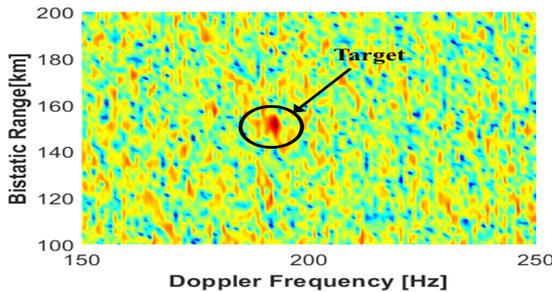
3.2 톤 종류별 재밍 효과

본 장에서는 앞에서 기술한 각각의 톤 재밍신호가 수동형 레이더에 인가되었을 때, 수동형 레이더의 ARD 맵 패턴을 확인하고자 한다. 그림 3은 JSR 50dB의 싱글 톤 재밍신호를 인가하였을 때의 결과이다.

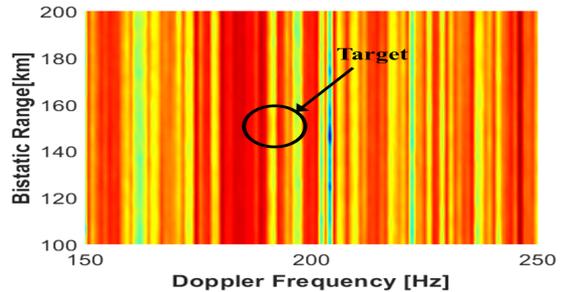
재밍신호가 비인가되는 경우와 비교하면 싱글 톤 재밍신호를 반송파 주파수에 인가하였을 경우 ARD 맵에서 피크가 다양한 도플러 축 상에서 거리 축으로 길게 나타나게 된다. CFAR 검출기는 검출하고자 하는 셀(Cell) 주변에 테스트 셀의 잡음 크기를 이용하여 검출 임계치를 설정한다. 이 때 도플러 축 상에서 거리 축으로 길게 피크가 형성되면 피크에 표적이 묻혀 검출되지 않을 수 있고, 피크에 묻히지 않더라도 테스트 셀에 피크가 들어가게 되면 검출 임계치가 높

아져 표적 검출 확률이 감소하는 것을 예상할 수 있다. 또한 FM 방송 채널 내에서 싱글 톤 재밍신호의 주파수 변화 시, 싱글 톤 재밍신호 주파수가 반송파 주파수에서 멀어질수록 ARD 맵에서 거리 축으로 길게 나타나는 피크의 세기가 감소하는 것을 확인할 수 있고, ARD 맵에서 표적의 존재 유무를 확인할 수 있다. 즉, 싱글 톤 재밍의 경우에는 반송파 주파수의 싱글 톤 재밍신호가 동일 재밍신호세기에서 재밍 효과가 우수함을 예상할 수 있다.

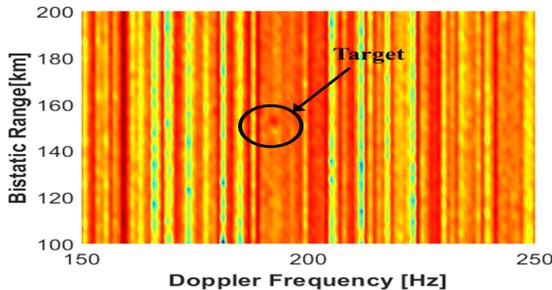
또한, 가변 싱글 톤(chirp-down, chirp-up) 재밍신호와 멀티 톤(균일간격, 랜덤간격) 재밍신호를 인가하였을 때의 ARD 맵에서의 재밍 효과를 확인하였다. 가변 싱글 톤의 경우 표 1의 파라미터와 같이 CPI 시간 동안 동일 시간 간격으로 주파수를 20kHz 간격으로 변경하며 신호를 발생하고, 주파수 변경 방향에 따라 chirp-down, chirp-up 신호로 나뉜다. 멀티 톤의 경우는 CPI 시간 동안 FM 방송 대역폭 내의 다수의 주파수 성분을 동시에 발생하고 톤 간의 간격은 FM 방송신호의 대역폭 내에서 균일하게 나누거나 그림 2(d)의 멀티 톤 프로파일과 같이 랜덤한 간격으로 나누어서 발생하였다. 그림 4와 5는 가변 싱글 톤과 멀티 톤이 수동형 레이더에 인가되었을 때의 ARD 맵을 도시하고 있다. 가변 싱글 톤은 발생 주파수 변화에



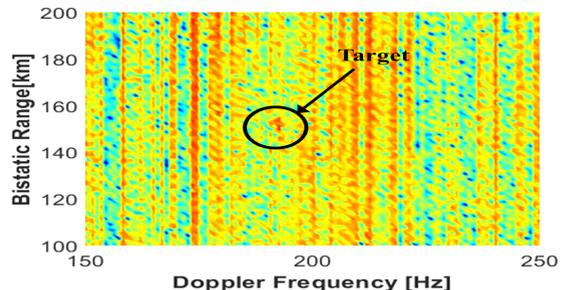
(a) No Jamming



(b) Single Tone Jamming on Carrier



(c) Single Tone Jamming on 20kHz



(d) Single Tone Jamming on 70kHz

그림 3. 싱글 톤 재밍신호 인가 시 ARD 맵(JSR = 50dB)

Fig. 3. ARD Map in the presence of the Single Tone Jamming Signal with JSR 50 dB.

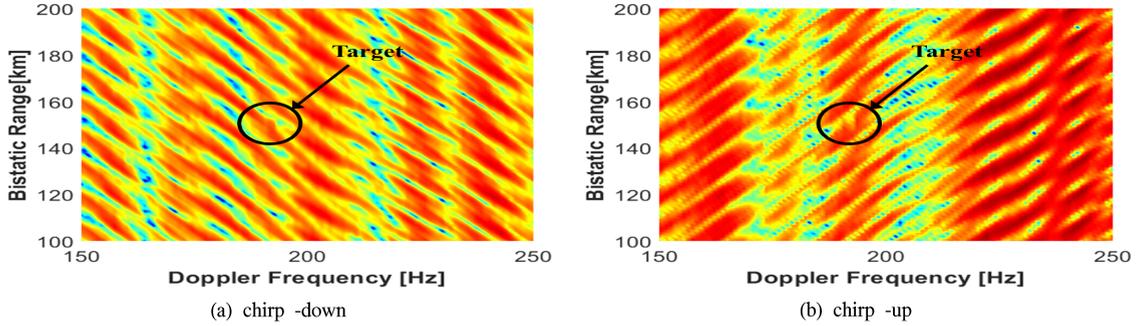


그림 4. 가변 싱글 톤 재밍신호 인가 시 ARD 맵(JSR = 50dB)
 Fig. 4. ARD Map in the presence of the Variable Single Tone Jamming Signal with JSR 50 dB.

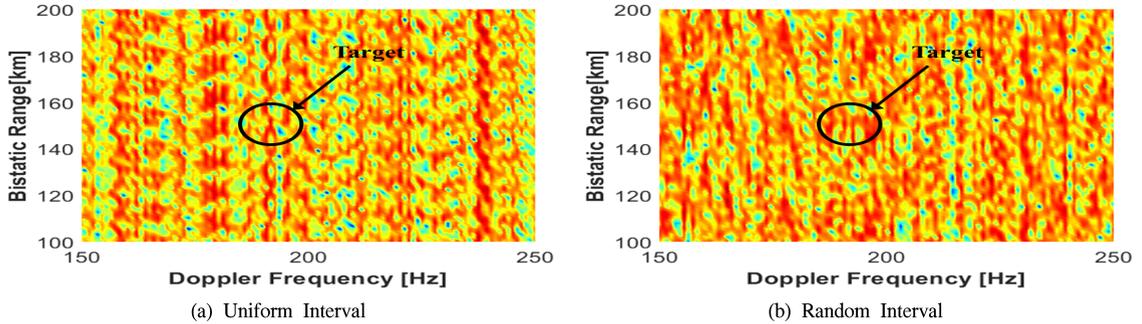


그림 5. 멀티 톤 재밍신호 인가 시 ARD 맵(JSR = 50dB)
 Fig. 5. ARD Map in the presence of the Multi-Tone Jamming with JSR 50 dB.

의해 피크가 거리축과 도플러 축상에서 주파수 변화 방향에 따라 사선으로 나타나고, 멀티 톤은 ARD 맵에 나타나는 피크가 사선 패턴과 거리 축으로 직선 패턴이 섞여 있는 것을 확인할 수 있다. 즉, ARD 맵을 통해 확인한 결과 싱글 톤처럼 피크가 특정 패턴을 가지며, 특정 패턴의 피크로 인해 CFAR 검출기에서 표적 검출되지 않을 수 있고, 피크에 묻히지 않더라도 테스트 셀에 피크가 들어가게 되어 검출 임계치 상승으로 표적 검출 확률이 감소하는 것을 예상할 수 있다. 싱글 톤 재밍과 달리 피크가 연속적이지 않기 때문에 표적이 피크가 없는 곳에 위치해 있는 시나리오에서는 싱글 톤 재밍 대비 표적 검출 확률의 증가를 예상할 수 있다. 또한 멀티 톤의 경우에는 피크가 랜덤하고 연속성이 낮은 피크가 빈번하게 발생하기 때문에 표적이 아닌 재밍신호에 의해 생성된 피크가 표적으로 검출되는 오탐지 확률 증가도 예상된다.

IV. 톤 재밍 종류별 재밍 성능

앞 장에서는 톤 재밍 종류에 따른 수동형 레이더의 ARD 맵에서의 재밍 효과를 확인하였다. 본 장에서는

재머의 이동 모의를 통한 시나리오 기반의 모의실험을 통해 수동형 레이더에 재밍신호가 인가되었을 때 재밍신호 비인가인 경우 표적 검출 대비 표적 검출 확률 분석을 통해 재밍 성능을 확인하고자 한다.

4.1 모의실험 설정

수동형 레이더에 대한 톤 재밍 성능 확인을 위한 모의실험을 위해 수동형 레이더, 재머, FM 송신원의 배치는 그림 6과 같다. 재머의 종류를 전투기로 가정하고, 수동형 레이더 장비의 탐지 가능 바이스태틱 거리 및 표적 탐지 거리 등을 고려하여 재머의 이동 경로는 그림 6에서처럼 초기 위치 (-105.5, -81.5, 4.5) km 에서 340 m/s 등속도로 50초 동안 (-89.38, -77.36, 4.45) km의 위치로 이동하도록 설정하였고, 수동형 레이더는 원점에, FM 송신원은 (54.25, -92.31, 0.94) km 위치로 설정하였다.

FM 송신원의 주파수는 92.1MHz로 설정하였으며, 대중가요가 방송된다고 가정하였다. 앞 장에서 기술한 수동형 레이더의 신호처리 구조를 모의하기 위하여 원형 8배열의 안테나를 이용한 빔포밍 알고리즘을 적용하여 신호를 수신하고, 간섭신호제거를 위해

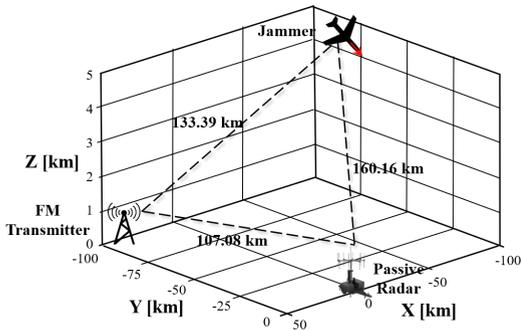


그림 6. 모의실험을 위한 공간 배치 구조
Fig. 6. Cartesian geometry in simulation.

표 2. 모의실험 변수
Table 2. Simulation parameters.

Parameters		Values
FM Transmitter	Antenna beam pattern	Isotropic
	Carrier frequency	92.1 MHz
	EIRP (Effective Isotropically Radiated Power)	3 kW
	Position	(54.25, -92.31, 0.94) km
Passive Radar	Antenna structure	8-element UCA
	Interference rejection algorithm	ECA
	CFAR algorithm	2D CA-CFAR
	False alarm rate	10^{-6}
	CPI	1.0 s
	Position	(0.0, 0.0, 0.0) km
Jammer	Velocity	Constant 340 m/s
	Jamming antenna beam pattern	Isotropic
	Initial position	(-105.50, -81.50, 4.50) km
	Final position	(-89.38, -77.36, 4.45) km

ECA(Extensive Cancellation Algorithm)을 사용하였으며[14], 표적 검출을 위한 CFAR 알고리즘은 2D CA(Cell Averaging)-CFAR를 사용하였다^[15,16]. FM 송신원, 재머, 수동형 레이더에 대한 주요 변수는 표 2와 같다.

4.2 모의실험 결과

그림 7과 그림 8은 재밍신호를 비인가하는 경우에 재머 이동 시작 위치에서의 ARD 맵 결과 및 50초 동안의 재머 이동에 따른 CFAR 표적 검출 결과를 누적하여 나타낸 것이다. 그림 7의 결과를 보면, FM 송신

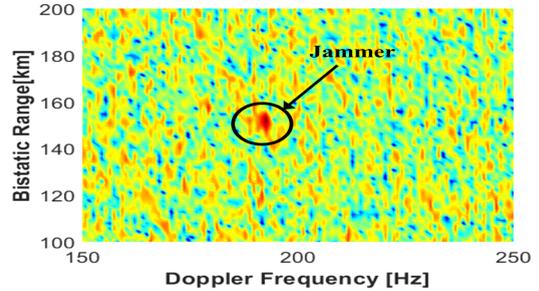


그림 7. 재머 이동 시작 위치에서의 ARD 맵(재밍신호 비인가)
Fig. 7. ARD Map at the starting point of jammer flight path in the absence of jamming.

원, 재머, 수동형 레이더 배치 구조에 의한 시간지연에 따른 바이스테틱 거리와 재머 이동에 따른 도플러 주파수에 대응되는 ARD 맵 위치에 재머가 나타남을 확인할 수 있고, 표적정보인 바이스테틱 거리와 도플러 주파수는 각각 153.49 km, 192.64 Hz로 추정되었다.

그림 8의 1초 단위의 ARD 맵 결과에 대해 50초 동안 누적한 CFAR 검출 결과에서는 재머가 지속적으로 탐지됨을 확인할 수 있다. 그림 9에서 그림 11은 JSR이 30dB인 싱글 톤 재밍신호를 인가하는 경우, 반송파 편차에 따른 CFAR 누적 결과를 도시하고 있다. 결과를 보면, 재밍신호에 의해 ARD 맵 결과에 특정한 패턴의 피크로 인해 CFAR 검출 성능이 감소함을 확인할 수 있다. 재밍신호 비인가 대비 반송파에 싱글 톤 재밍 인가 시, 그림 9에 도시된 검출 개수 2개는 오 탐지된 결과이고, 검출확률은 0%로 재밍 성능이 가장 뛰어난 것을 확인할 수 있다. 한편, 그림 10과 그림 11은 반송파에 20kHz와 70kHz 편차를 주는 경우의 검출확률은 각각 26%와 100%로, 싱글 톤이 반송파에서 멀어질수록 ARD 맵의 특정 패턴 피크의 세기가 감소하여 재밍효과가 크게 감소함을 확인하였다.

그림 12와 그림 13은 수동형 레이더에 CPI 구간동안 방송 대역폭 내를 20kHz 간격으로 chirp-down 및

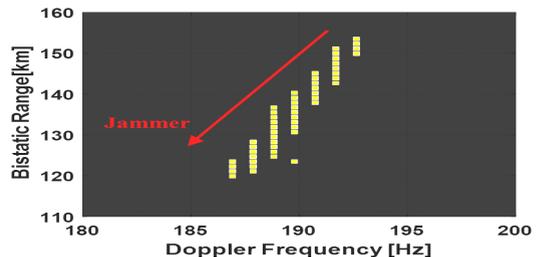


그림 8. 재머 이동 구간의 CFAR 검출 결과 누적(재밍신호 비인가)
Fig. 8. Accumulated CFAR output for the simulated jammer flight path in the absence of jamming.

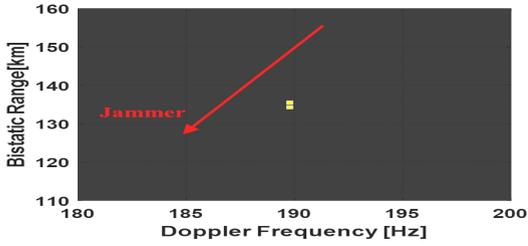


그림 9. 싱글 톤(반송파 주파수) 재밍신호 인가 시 재머 이동 구간의 CFAR 검출 결과 누적(JSR : 30dB)
 Fig. 9. Accumulated CFAR output for the simulated jammer flight path in the presence of the single tone(on carrier) jamming with JSR 30dB.

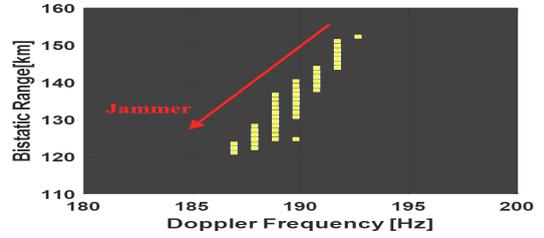


그림 12. 가변싱글톤(chirp down)재밍신호 인가 시 재머 이동 구간의 CFAR 검출 결과 누적(JSR : 30dB)
 Fig. 12. Accumulated CFAR output for the simulated jammer flight path in the presence of the variable single tone(Chirp-Down) jamming with JSR 30dB.

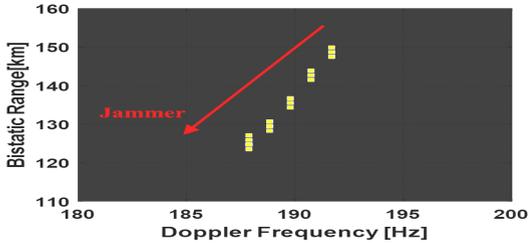


그림 10. 싱글 톤(반송파 편차 : 20kHz) 재밍신호 인가 시 재머 이동 구간의 CFAR 검출 결과 누적(JSR : 30dB)
 Fig. 10. Accumulated CFAR output for the simulated jammer flight path in the presence of the single tone(carrier deviation 20kHz) jamming with JSR 30dB.

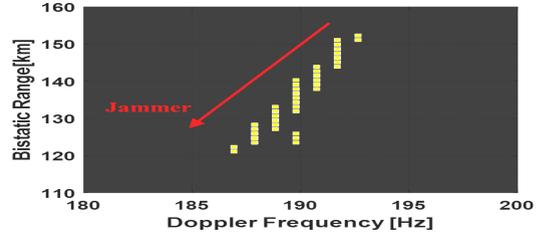


그림 13. 가변싱글톤(chirp up)재밍신호 인가 시 재머 이동 구간의 CFAR 검출 결과 누적(JSR : 30dB)
 Fig. 13. Accumulated CFAR output for the simulated jammer flight path in the presence of the variable single tone(Chirp-up) jamming with JSR 30dB.

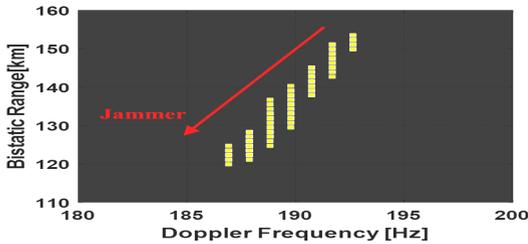


그림 11. 싱글 톤(반송파 편차 : 70kHz) 재밍신호 인가 시 재머 이동 구간의 CFAR 검출 결과 누적(JSR : 30dB)
 Fig. 11. Accumulated CFAR output for the simulated jammer flight path in the presence of the single tone(carrier deviation 70kHz) jamming with JSR 30dB.

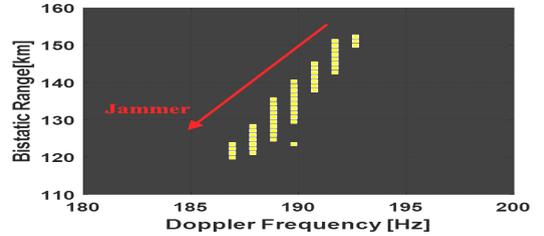


그림 14. 멀티 톤(균일간격)재밍신호 인가 시 재머 이동 구간의 CFAR 검출 결과 누적(JSR : 30dB)
 Fig. 14. Accumulated CFAR output for the simulated jammer flight path in the presence of the multi-tone(uniform) jamming with JSR 30dB.

chirp-up 형태로 스위칭하는 가변 싱글 톤 재밍신호를 인가하는 경우의 결과를 도시하고 있다. 결과를 보면, ARD 맵에 사선 형태로 생성된 피크로 인해 CFAR 검출 확률이 재밍신호 비인가하는 경우 대비 각각 80%와 74%로 감소함을 확인할 수 있으며, chirp-down 및 chirp-up 형태의 신호에 대해서는 ARD 맵에 발생하는 피크의 방향이 바뀔 뿐 재밍 효과는 유사함을 알 수 있다. 그림 14와 그림 15는 10개의 멀티 톤을 균일간격과 랜덤간격으로 CPI 구간동안 동시에 발생하여 재밍신호로 인가하는 경우의 CFAR

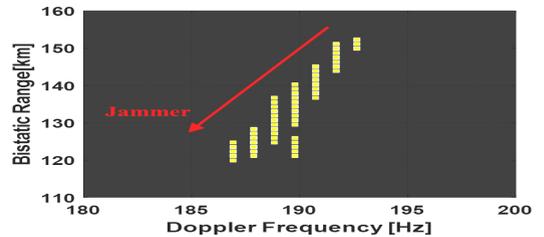


그림 15. 멀티 톤(랜덤간격)재밍신호 인가 시 재머 이동 구간의 CFAR 검출 결과 누적(JSR : 30dB)
 Fig. 15. Accumulated CFAR output for the simulated jammer flight path in the presence of the multi-tone(random) jamming with JSR 30dB.

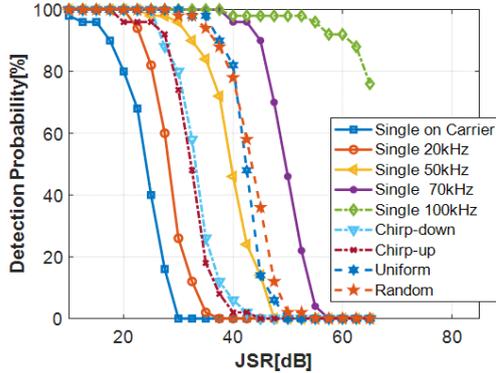


그림 16. 톤 재밍신호 별 검출 확률 비교
 Fig. 16. Detection probability comparison between tone Jamming signals.

검출 결과를 각각 도시하고 있다. 균일간격과 랜덤간격으로 발생한 멀티 톤 재밍의 검출확률은 재밍신호를 비인가하는 경우 대비 각각 100%와 98%로, 다른 재밍신호 대비 동일 JSR에서 재밍 성능은 크게 저하되지만 CFAR 누적 결과를 보면 재밍신호 비인가 대비 검출되는 셀 개수가 증가하여 오탐지 확률이 증가함을 알 수 있다.

그림 16은 JSR에 따른 각 톤 재밍신호 별 재밍신호 비인가 대비 검출 확률을 도시하고 있다. 싱글 톤 재밍의 경우 재밍신호의 주파수가 반송파에서 멀어질수록 검출 확률이 재밍신호를 비인가하는 경우에 가까워져서 재밍 효과가 감소하는 것을 확인할 수 있다. FM 방송신호의 유효대역폭(약 20kHz)을 넘어서는 반송파 편이 싱글 톤 재밍의 경우에는 재밍 효과가 급격히 감소하는 것으로 보아 FM 방송신호의 유효대역폭 내로 싱글 톤 재밍신호를 인가해야 효율적인 재밍 효과를 볼 수 있다고 판단된다. 또한, 반송파 주파수의 싱글 톤 재밍 대비 가변 단일 톤 및 멀티 톤 재밍 효과가 상대적으로 낮음을 확인할 수 있다. 가변 싱글 톤 및 멀티 톤의 경우 방송 채널 대역폭 내에서 주파수가 변하거나, 다수의 톤 동시 발생으로 인해 전력이 분배되어 싱글 톤 대비 FM 방송 신호의 유효대역폭 내에 재밍신호 성분이 줄어들어 동일 JSR에서 싱글 톤 대비 재밍 효과가 감소하는 것으로 판단된다. 즉, FM 라디오 기반 수동형 레이더 시스템에 대해서는 FM 방송신호의 유효대역폭 내로 톤 재밍신호의 에너지를 집중할수록 재밍 성능이 좋아지기 때문에 가변 싱글 톤 및 멀티 톤 대비 싱글 톤의 재밍 성능이 우수하다고 할 수 있다. 수동형 레이더는 다수의 방송 채널에 대한 CFAR 검출 결과인 표적 정보 중에서 동일

표적에 대한 표적 정보를 매칭시켜 표적의 위치를 탐지한다. 멀티 톤 재밍의 경우 싱글 톤 대비 검출 확률이 높아 재밍 성능은 다소 떨어지지만 CFAR 검출 시 오탐지 확률을 높일 수 있어 표적 정보 매칭 시의 연산 시간 증가에 기여할 것으로 판단된다.

V. 결론

본 논문에서는 FM 라디오 기반 수동형 레이더에 톤 재밍신호를 인가하는 경우에 수동형 레이더의 ARD 맵 상에서의 재밍 효과를 확인하였고, 모의실험을 통해 다양한 형태의 톤 신호에 따른 수동형 레이더에서의 재밍 성능을 표적 검출 확률로 비교·분석하였다. 동일 JSR 에서의 톤 재밍신호에 의한 효과는 FM 방송 신호의 유효대역폭 내로 톤 재밍신호의 성분이 많은 반송파 주파수의 싱글 톤의 재밍 성능이 가장 우수함을 확인하였다. 한편, 이러한 톤 신호를 이용한 재밍을 수행하는 경우에 수동형 레이더의 ARD 맵 상에서의 이상 패턴으로 재밍을 인지할 수 있으므로, 향후 JSR 조정 및 다양한 패턴의 톤 재밍 프로파일 설정 등을 통해 수동형 레이더에서의 피재밍 인지를 어렵게 할 수 있는 기법에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

References

- [1] P. E. Howland, D. Maksimiuk, and G. Reitsma, "FM radio based bistatic radar," *IEE Proc. Radar Sonar and Navig.*, vol. 152, no. 3, pp. 107-115, Jun. 2005. (<https://doi.org/10.1049/ip-rsn:20045077>)
- [2] 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>)
- [3] D. Gould, R. Pollard, C. Sarno, and P. Tittensio, "A multiband passive radar demonstrator," in *Proc. Int. Radar Symp.*, pp. 657-660, Cracow, Poland, May 2006. (<https://doi.org/10.1109/irs.2006.4338144>)
- [4] G. Chen, et al., "Improved mismatched filtering for ATV-based passive bistatic radar," *IET Radar Sonar and Navig.*, vol. 12, pp. 663-

670, Apr. 2018.
 (https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2017.0476)

[5] G. Bournaka, et al., "Experimental study for transmitter imperfections in DVB-T based passive radar," *IEEE Trans. Aerospace and Electron. Syst.*, vol. 54, no. 3, pp. 1341-1354, Dec. 2017.
 (https://doi.org/10.1109/TAES.2017.2785518)

[6] M. Edrich, A. Schroeder, and F. Meyer, "Design and performance evaluation of a mature FM/DAB/ DVB-T multi-illuminator passive radar system," *IET Radar, Sonar and Navig.*, vol. 8, pp. 114-122, Feb. 2014.
 (https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2013.0162)

[7] H. D. Griffiths and C. J. Baker, *An Introduction to Passive Radar*, Artech-House, 2017.

[8] N. J. Willis and H. D. Griffiths, *Advances in Bistatic Radar*, SciTech, 2007.
 (https://doi.org/10.1049/SBRA001E)

[9] 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)

[10] M. Inngs, 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)

[11] 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)

[12] I. H. Jeong, et al., "Localization performance analysis of multistatic PCL system based on FDOA," *J. KIEES*, vol. 31, no. 1, pp. 26-32, Jan. 2020.
 (https://doi.org/10.5515/KJKIEES.2020.31.1.26)

[13] J. I. Ahn, et al., "Surveillance channel generation technique by interference signal suppression in multistatic PCL system," in *Proc. KIEES Summer Conf. 2019*, vol. 7, Jeju, Korea, Aug. 2019.

[14] R. Cardinali, F. Colone, C. Ferretti, 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)

[15] M. Malanowski, *Signal Processing for Passive Bistatic Radar*, Artech-House, 2019.

[16] H. G. Kwak, et al., "Target detection using variable window size in FM radio broadcast based PCL system," in *Proc. KIEES Summer Conf. 2020*, vol. 8, Jeju, Korea, Aug. 2020.

곽현규 (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]

김산해 (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]

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]

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]

이 중 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]

은 창 수 (Changsoo Eun)



1985년 2월 : 서울대학교 전자공학과 졸업
1987년 2월 : 서울대학교 전자공학과 석사
1995년 12월 : The University of Texas at Austin 전기공학과 박사

1997년~현재 : 충남대학교 전자정보통신공학과 교수
<관심분야> 통신신호 처리, RF 및 초고주파 회로 등