

FM 라디오 기반 수동형 레이더에서 FDOA 축 부엽에 의한 오탐지 결과 제거 방법

박도현*, 박근호*, 김형남^o

A Method for Eliminating False Detection Results Caused by FDOA-Domain Sidelobes in FM-Radio-Based Passive Radar

Do-Hyun Park*, Geun-Ho Park*, Hyoung-Nam Kim^o

요약

FM 라디오 기반 수동형 레이더는 다양한 방송 신호 중 하나인 FM 라디오 신호를 이용하여 표적의 위치 및 속도를 추정하는 레이더 시스템이다. 이러한 FM 라디오 기반 수동형 레이더는 기준 신호와 표적 반사 신호를 이용하여 CAF (cross-ambiguity function)를 유도한다. 유도된 CAF를 이용하여 도달 시간 차이와 도플러 주파수 차이를 추정하고, 최종적으로 표적의 위치 및 속도를 계산한다. 그러나 수신된 FM 라디오 신호의 구조로 인하여 CAF에서 FDOA (frequency difference of arrival) 축으로 부엽이 발생할 수 있고 이는 수동형 레이더의 탐지 성능을 저하시키는 오탐지 결과를 만들어낼 수 있다. 본 논문에서는 FDOA 축으로 형성되는 부엽의 발생 패턴을 분석한 후, 부엽 발생 패턴의 분석 결과를 이용하여 부엽에 의한 오탐지 제거 방법을 제안하고 모의실험을 통해 제안한 기법의 성능이 효과적임을 확인한다.

Key Words : FM radio, passive radar, cross-ambiguity function, CFAR detection, false detection

ABSTRACT

FM radio-based passive radar is a radar system that estimates the position and speed of a target using an FM radio signal, which is one of the various broadcast signals. This FM radio-based passive radar uses a reference signal and a target echo signal to derive CAF (cross-ambiguity function). Using the derived CAF, the time difference of arrival and the frequency difference of arrival are estimated, and finally the position and velocity of the target are calculated. However, due to the structure of the received FM radio signal, sidelobes may occur on the CAF's FDOA (frequency difference of arrival) domain, which may result in false detection that degrades the detection performance of the passive radar. In this paper, after analyzing the occurrence pattern of the sidelobes formed at the FDOA domain, we propose a method to remove the false detection results caused by sidelobes and show the effective performance of the proposed method.

※ 본 논문은 2019년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2019-0-00706, 주요 보안시설 및 항만 인프라 보안성 강화용 3S(Security,Safety,Safeguard) 보안허브플랫폼 개발)

※ 본 논문은 BK21플러스, IT기반 융합산업 창의인력양성사업단에 의하여 지원되었음

• First Author : Department of Electronics Engineering, Pusan National University, dohpark@pusan.ac.kr, 학생(석박통합과정), 학생회원

^o Corresponding Author : Department of Electronics Engineering, Pusan National University, hnkim@pusan.ac.kr, 정교수, 종신회원

* Department of Electronics Engineering, Pusan National University, fot97311@pusan.ac.kr, 연구원, 학생회원

논문번호 : 202005-109-C-RN, Received May 19, 2020; Revised July 24, 2020; Accepted August 2, 2020

I. 서론

수동형 레이더는 직접적으로 전파를 방출하지 않고 상용 방송·통신 신호를 이용하여 표적을 탐지하고 표적에 대한 정보를 추정하는 레이더 시스템이다^[1]. 수동형 레이더가 표적을 탐지하기 위하여 사용 가능한 방송·통신 신호로 FM (frequency modulated) 라디오 신호^[2], digital video broadcasting-terrestrial^[3], digital audio broadcasting^[4], Wi-Fi^[5] 등이 존재한다. 이러한 다양한 신호들 중에서 FM 라디오 신호는 대부분의 지역에서 송출하고 있어 신호의 수집이 용이하고, 방송 커버리지가 넓어 탐지 영역이 넓다는 장점을 가져 항공기 탐지가 가능한 수동형 레이더에 주로 쓰인다^[6].

FM 라디오 기반 수동형 레이더의 구조는 그림 1과 같은 블록도로 나타낼 수 있다. FM 라디오 송신기로부터 직선상으로 수신되는 기준 신호 (reference signal)가 기준 채널로 수신되고 표적에 반사되어 수신되는 표적 반사 신호 (target echo signal)가 포함된 감시 신호 (surveillance signal)가 감시 채널로 수신된다. 감시 채널에 수신된 신호는 표적 반사 신호뿐만 아니라 탐지 성능을 저하시키는 기준 신호 및 클러터 신호들도 존재하므로^[7] 이를 제거하기 위하여 간섭 신호 제거가 필수적이다. 이를 위하여 적응 필터 기반 간섭 신호 제거 방법인 LMS (least mean square), normalized LMS, recursive least square^[8-9] 및 최소 제곱법 기반 간섭 신호 제거 방법인 extensive cancellation algorithm^[2], sequential cancellation

algorithm^[10] 등의 여러 가지 기법이 사용된다. 이러한 간섭 신호가 제거된 감시 신호와 기준 신호를 이용하여 CAF (cross-ambiguity function)를 유도함으로써 기준 신호와 감시 신호와의 도플러 주파수 차이를 의미하는 FDOA, 그리고 도달 시간 차이 또는 바이스테틱 거리 (bistatic range)로도 표현되는 TDOA (time difference of arrival)를 추정한다. 이렇게 유도된 CAF에 다중 표적에 대한 TDOA 및 FDOA를 탐지하기 위하여 CFAR (constant false alarm rate) 탐지기를 적용한다^[11]. CFAR 탐지기는 추정한 잡음 분산을 기반으로 특정 임계값을 설정하고, 이를 CAF에 적용하여 다중 표적에 대한 탐지를 수행한다.

그러나 FM 라디오 신호의 구조로 인하여 FM 라디오 기반 수동형 레이더의 CAF 유도 결과에서 FDOA 축으로 부엽 (sidelobe)이 형성될 수 있다^[12]. 이러한 부엽은 CFAR 탐지기를 통해 검출될 수 있고 이는 수동형 레이더의 표적 탐지 성능을 저하시킨다. 따라서 FM 라디오 기반 수동형 레이더의 표적 탐지 성능을 향상시키기 위해 부엽에 의한 오탐지 결과 제거 방법이 요구된다.

기존에 제안된 FM 라디오 기반 수동형 레이더에서의 오탐지 제거 방법^[12]은 오탐지 결과가 표적 탐지 결과를 중심으로 대칭적으로 발생하지 않을 경우 완벽히 제거가 되지 않는다는 단점을 지니고 있다. 본 논문에서는 수신된 신호의 고조파 성분을 추정하는 첫 번째 단계와 추정된 정보를 이용하여 오탐지 결과를 제거하는 두 번째 단계로 구성된 오탐지 제거 방법을 제안한다. 제안하는 오탐지 제거 방법은 기존에 제안된 오탐지 제거 방법과는 다르게 오탐지 결과가 표적을 중심으로 대칭적으로 발생하지 않을 경우에도 오탐지 제거가 가능하다는 장점을 지닌다.

본 논문은 II 장에서 수동형 레이더의 표적 탐지 방법에 대하여 간략히 소개한다. III 장에서는 CAF의 FDOA 축으로 형성되는 부엽 발생 패턴에 대해 분석한다. IV 장에서는 부엽 발생의 원인인 수신 신호의 고조파 성분에 대한 추정 방법을 소개하고 부엽에 의한 오탐지 결과들을 제거하는 방법을 제안한다. V 장에서 모의실험을 통해 제안하는 방법에 의해 오탐지 결과가 제거됨을 보이고 마지막으로 VI 장에서 본 논문의 결론을 내린다.

II. FM 라디오 기반 수동형 레이더

본 장에서는 FM 라디오 기반 수동형 레이더에서의 표적 탐지 방법에 대하여 설명한다. 수동형 레이더는

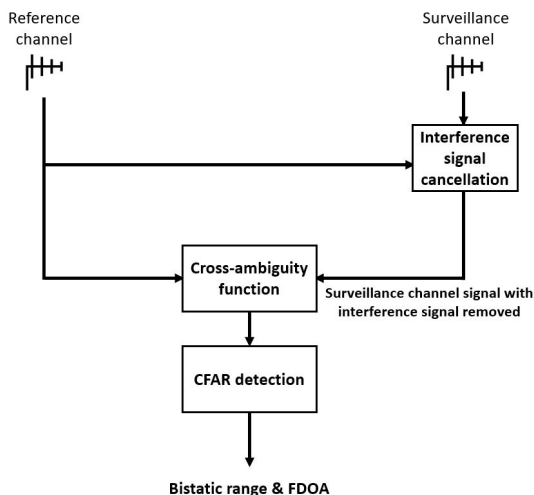


그림 1. FM 라디오 기반 수동형 레이더의 블록도
Fig. 1. Block diagram of FM radio-based passive radar.

기준 신호와 감시 신호를 수신하여 두 신호 간의 도달 시간 차이와 도플러 주파수 차이를 계산하고 표적의 위치와 속도를 계산한다. 이를 위해 수동형 레이더 시스템은 감시 신호에 존재하는 간섭 신호를 제거하고, 간섭 신호가 제거된 신호를 이용하여 CAF를 유도한다. 유도된 CAF에서 다중 표적 탐지를 위해 CFAR 탐지를 적용하고 탐지 결과에서 하나의 결과 값을 도출해내기 위해 grouping 알고리즘을 적용한다. 본 장에서는 수동형 레이더가 표적 탐지를 수행하기 위해 사용하는 CAF 유도, CFAR 탐지 및 grouping 알고리즘에 대하여 간략히 설명한다.

2.1 Cross-ambiguity function

CAF는 기준 신호와 간섭 신호가 제거된 감시 신호를 이용하여 기준 신호와 표적 반사 신호 간의 도달 시간 차이 및 도플러 주파수 차이를 추정하기 위한 함수이다. CAF는 다음 식으로부터 유도할 수 있다.

$$CAF(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} s_{surv}(t)s_{ref}(t-\tau)e^{-j2\pi f_s t} dt. \quad (1)$$

위 식에서 s_{surv} 는 간섭 신호가 제거된 감시 신호, s_{ref} 는 기준 신호, f_s 는 샘플링 주파수, τ 는 도달 시간 차이, 그리고 f 는 도플러 주파수 차이를 의미한다. 그림 2는 단일 표적이 존재하였을 때의 기준 신호와 간섭 신호가 제거된 감시 신호를 이용하여 CAF를 유도한 후 도달 시간 차이를 바이스태틱 거리로 변환시킨 결과이다. 표적과 수신기와의 바이스태틱 거리 및 수신된 기준 신호와 표적 반사 신호 간의 도플러 주파수 차이에 해당하는 CAF 위치에 첨점이 형성되는 것을

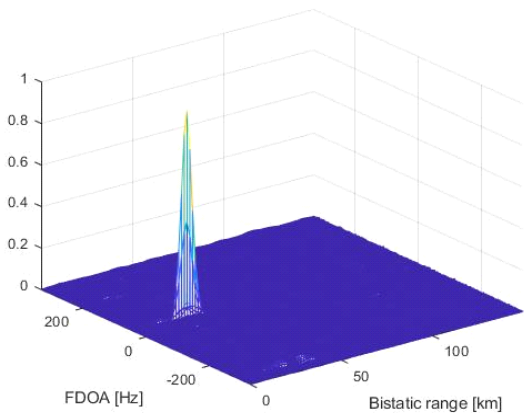


그림 2. CAF 유도 결과
Fig. 2. CAF derivation result.

확인할 수 있다.

2.2 CFAR 탐지 및 grouping 알고리즘

CFAR 탐지^[11]는 유도된 CAF에 다중 표적에 대한 탐지를 진행하기 위하여 적용하는 알고리즘이다. 이를 수행하는 CFAR 탐지기는 수신된 신호로부터 잡음 전력을 측정하고 오경보율 (false alarm rate)을 일정하게 유지하기 위해 측정된 잡음 전력에 근거하여 임계값을 결정한다. 이렇게 결정된 임계값을 CAF의 모든 셀에 적용하고, 임계값보다 큰 셀을 표적이 존재하는 셀로 판단함으로써 다중 표적에 대한 탐지를 수행할 수 있다. 이러한 CFAR 탐지기는 그림 3과 같이 트레이닝 셀 (training cells), 가드 셀 (guard cells) 그리고 테스트 진행 셀 (cell under test)로 구성된다. CFAR 탐지기는 트레이닝 셀을 이용하여 잡음의 전력을 측정하고 사용자가 결정한 오경보율에 따라 임계값을 도출한다. 계산된 임계값을 이용하여 테스트 셀에 대해 표적 존재 유무를 판단한다. 이때 트레이닝 셀과 테스트 진행 셀 사이에 가드 셀을 할당하여 테스트 진행 셀에 포함된 신호가 잡음으로 측정되지 않도록 한다. 그림 2의 수동형 레이더에서 유도한 CAF에 CFAR 탐지기를 적용한다면 그림 4와 같이 표적이 탐지되는 것을 볼 수 있다.

CFAR 탐지기를 통해 나타난 탐지 결과에서 하나의 바이스태틱 거리 및 FDOA를 추정해내기 위하여 grouping 알고리즘^[11]을 사용한다. Grouping 알고리즘은 단일 표적에 의한 탐지 셀들은 서로 특정 거리 이내에 존재할 것이라는 전제 하에 동작한다. 따라서 grouping 알고리즘을 적용하면 특정 거리 이내에 존재하는 탐지 결과들에 대하여 하나의 바이스태틱 거리 및 FDOA를 도출한다. 그림 5는 그림 4의 CFAR

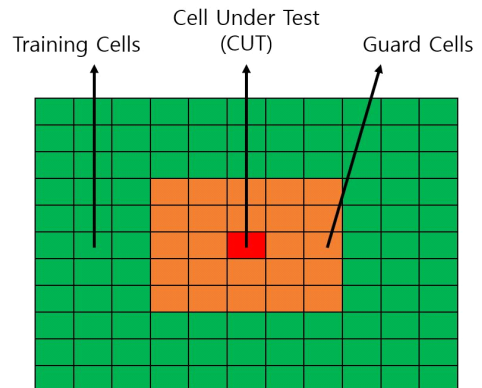


그림 3. CFAR 탐지기의 구성
Fig. 3. Configuration of CFAR detector.

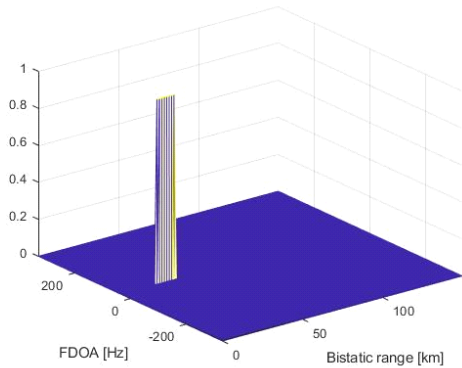


그림 4. CFAR 탐지기 적용 후 결과
Fig. 4. Result after applying CFAR detector.

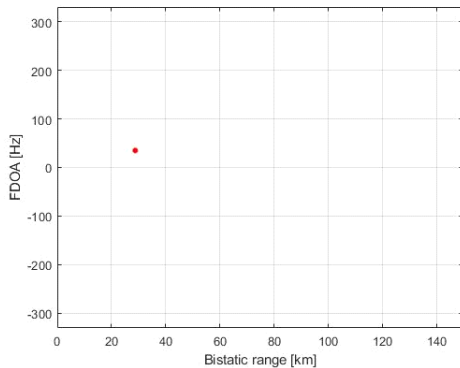


그림 5. Grouping 알고리즘 적용 후 결과
Fig. 5. Result after applying grouping algorithm.

탐지 결과에 grouping 알고리즘을 적용한 결과를 나타낸 것으로서, grouping 알고리즘을 통해 하나의 바이스테틱 거리 및 FDOA를 가지는 탐지 결과를 얻을 수 있다.

III. FM 라디오 기반 수동형 레이더의 FDOA 축 부엽

본 장에서는 먼저 FM 라디오 신호의 구조에 대하여 설명한다. 그리고 FM 라디오 신호를 이용하여 CAF를 유도했을 때, CAF의 FDOA 축으로 부엽이 형성됨을 수식으로 보이고 이러한 부엽들이 가지는 패턴에 대해 분석한다.

FM 스테레오 변조는 좌측과 우측 스피커에 각기 다른 메시지 신호를 출력하여 입체적 음향 서비스를 제공하기 위해 사용되는 변조 방식이다. 좌측과 우측 신호를 각각 보내기 위해 FM 스테레오 방송 송신기는 좌측 신호 (L)와 우측 신호 (R)로부터 합 신호(L+R)

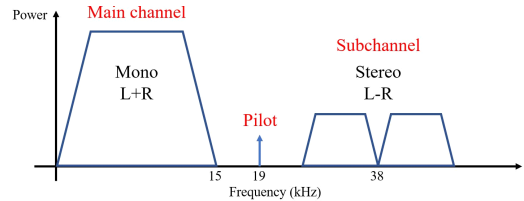


그림 6. FM 스테레오 변조 신호의 스펙트럼
Fig. 6. Spectrum of FM stereo modulated signal.

와 차 신호(L-R)를 생성하고 합 신호를 이용하여 주 채널 (main channel), 차 신호를 이용하여 부 채널 (sub channel)을 구성한다. 그림 6과 같이 주 채널은 기저대역 (baseband), 부 채널은 38 kHz에 위치시키고 두 채널을 구분하기 위한 단일 톤 파일럿 (single tone pilot) 신호를 19 kHz에 배치한다. 이러한 FM 스테레오 변조 방식의 메시지 신호는 아래의 식과 같이 표현된다.

$$M(t) = 0.9 \times \{[L(t) + R(t)] \cos(2\pi \times 2f_p t) + [L(t) - R(t)] \cos(2\pi f_p t)\}. \quad (2)$$

여기서 f_p 는 파일럿 신호가 가지는 단일 톤 주파수인 19 kHz이다. 식 (2)의 스테레오 변조 방식의 메시지 신호를 이용한 FM 스테레오 변조 신호는 다음과 같다.

$$S(t) = \exp[j2\pi k_f \int_0^t M(\tau) d\tau] \quad (3)$$

식 (3)에서 k_f 는 최대 주파수 천이 (maximum frequency deviation)를 의미하고 75 kHz의 값을 가진다. 이러한 FM 스테레오 변조 신호는 다음과 같이 나타낼 수 있다¹²⁾.

$$\begin{aligned} S(t) &\approx \exp\{j2\pi k_f [0.9 \times S_1(t) + a_1 S_2(t) \sin(4\pi f_p t) + a_2 \sin(2\pi f_p t)]\} \\ &= \exp(j2\pi k_f) [0.9 S_1(t)] \\ &\quad \times \exp(j2\pi k_f) [a_1 S_2(t) \sin(4\pi f_p t)] \\ &\quad \times \exp(j2\pi k_f) \times a_2 \sin(2\pi f_p t). \end{aligned} \quad (4)$$

위의 식에서 $S_1(t)$ 와 $S_2(t)$ 는 각각 주 채널 신호인 $\int_0^t [L(\tau) + R(\tau)] d\tau$ 와 부 채널 신호인 $L(t) - R(t)$ 를 의미하고 a_1 과 a_2 는 $0.9/4\pi f_p$, $0.1/2\pi f_p$ 를 의미한

다. 식 (4)에서 첫 번째 항은 주 채널 신호, 두 번째 항은 부 채널 신호, 마지막 항은 파일럿 신호에 의해 생성된다. 이러한 FM 스테레오 변조 신호로부터 CAF를 유도하면, FDOA f_d' 는

$$f_d' = f_d \pm n f_i \pm m f_p \quad (5)$$

와 같이 나타난다. 여기서 f_d 는 표적에 의해 생성되는 FDOA를 나타내고 f_i 는 $S_1(t)$ 가 발생시키는 조화 주파수 값이다. 식 (5)는 표적에 의한 FDOA f_d 를 중심으로 FDOA 측 방향으로 f_i 와 f_p 에 의한 부엽이 형성된다는 것을 의미한다. 이러한 부엽들은 f_d 를 중심으로 f_i 의 배수만큼 그리고 f_p 의 배수만큼 이격된 위치에 형성된다. 그러나 FM 라디오 기반 수동형 레이더가 항공기를 탐지하는 경우 CAF의 FDOA 범위를 -300 ~ 300 Hz로 설정한다^[13]. 따라서 19 kHz 파일럿에 의한 부엽은 표적 신호가 가질 수 있는 최대 FDOA 크기를 초과하는 위치에 존재하므로 표적에 대한 FDOA f_d , 그리고 $S_1(t)$ 가 발생시키는 조화 주파수 f_i 에 의한 부엽만이 CAF에 나타나게 된다. 이는 그림 7의 (a)에서 보이는 것과 같이 CAF 유도 결과에서 표적에 의해 생성되는 주엽을 중심으로 부엽이 형성된다. 이러한 CAF에 CFAR 탐지를 적용할 경우 CFAR 탐지기는 표적에 의한 탐지 결과뿐만 아니라 그림 7의 (b)와 같이 부엽에 의한 오탐지 결과들을 야기할 수 있다.

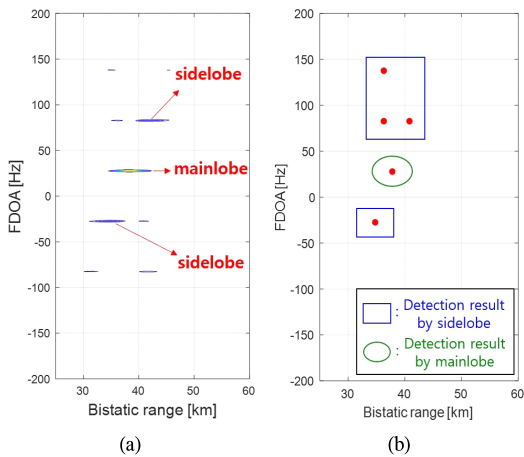


그림 7. CAF 유도 결과, (a) 주엽과 부엽, (b) 주엽과 부엽에 의한 탐지 결과
Fig. 7. CAF derivation result, (a) mainlobe and sidelobes, (b) detection result caused by mainlobe and sidelobes.

IV. 제안하는 FDOA 측 오탐지 결과 제거 방법

III 장에서 FDOA 측으로 형성되는 부엽들은 수신된 신호의 고조파 성분에 의해 생성되고, 표적을 중심으로 조화 주파수만큼 이격된 곳에 오탐지 결과들이 위치함을 도출하였다. 본 논문에서는 그림 8과 같은 오탐지 제거를 통해 표적 탐지 성능을 개선하는 수동형 레이더 시스템을 제안한다. 제안하는 오탐지 제거 방법은 CAF가 바이스태틱 거리 및 FDOA에 대한 AF (ambiguity function)의 평행 이동 함수이기 때문에 AF에서 발생하는 부엽 발생 패턴의 특징이 CAF에도 나타난다는 원리에 기반한다. 즉, CAF에서 나타나는 부엽의 조화 주파수 성분을 AF에서도 관측할 수 있다는 것을 의미한다. AF로부터 관측할 수 있는 조화 주파수는 CAF에서 표적에 의한 탐지 결과를 분류하는 데에 유용하게 활용할 수 있다.

제안하는 오탐지 제거 방법은 크게 두 단계로 구성되어 있다. 첫 번째 단계는 부엽의 발생 패턴을 도출하는 과정으로서, AF를 이용하여 조화 주파수를 추정한다. 두 번째 단계는 첫 번째 단계에서 추정한 조화 주파수를 이용하여 표적에 의한 탐지 결과와 오탐지 결과를 분류하고 오탐지 결과를 제거하는 것으로서, 이를 통해 부엽에 의한 오탐지 결과를 대부분 제거할 수 있다. 각 단계의 구체적인 내용은 본 장의 1 절과 2 절에서 자세히 서술한다.

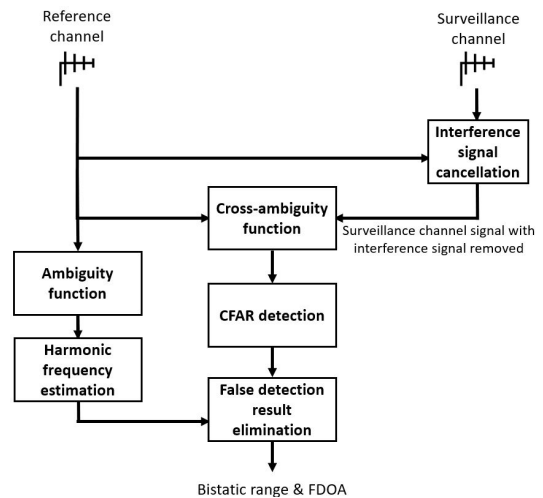


그림 8. FDOA 측 오탐지 결과들을 제거하기 위한 수동형 레이더의 블록도
Fig. 8. Block diagram of a passive radar to eliminate false detection results in the FDOA dimension.

4.1 고조파 성분 추정

탐지 결과에 존재하는 오탐지 결과 제거를 위해 수신 신호에 존재하는 고조파 성분에 대한 추정이 필요하다. 수신 신호에 존재하는 고조파 성분 추정을 위해 수동형 레이더의 기준 채널에 수신된 기준 신호를 이용하여 다음과 같은 AF를 유도할 수 있다.

$$AF(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} s_{ref}(t) s_{ref}(t - \tau) e^{-j2\pi f t} dt \quad (6)$$

AF는 기준 신호만을 이용하여 유도하는 함수이므로 그림 9의 (a)와 같이 바이스테틱 거리와 FDOA가 0인 위치에 첨점이 나타난다. 또한 표적의 바이스테틱 거리 및 FDOA에 대한 AF의 평행 이동된 함수가 CAF이므로, CAF에 존재하는 부엽 발생 패턴과 동일한 패턴을 가지는 부엽이 AF의 바이스테틱 거리와 FDOA가 0인 첨점을 중심으로 형성된다. 이렇게 유도된 AF에 CFAR 탐지기를 적용하면 그림 9의 (b)에서 보이는 것과 같이 바이스테틱 거리와 FDOA가 0인 곳 이외에 부엽에 의한 탐지 결과가 나타난다. 이러한 AF의 탐지 결과에서 나타난 오탐지 결과들의 FDOA 간격을 아래의 식을 이용하여 추정하여 오탐지 제거에 사용될 조화 주파수 값을 구할 수 있다.

$$\Delta \hat{f} = \text{Mode}(f_2 - f_1, f_3 - f_2, \dots, f_N - f_{N-1}). \quad (7)$$

여기서 $\Delta \hat{f}$ 은 조화 주파수 추정 값, N 은 전체 탐지

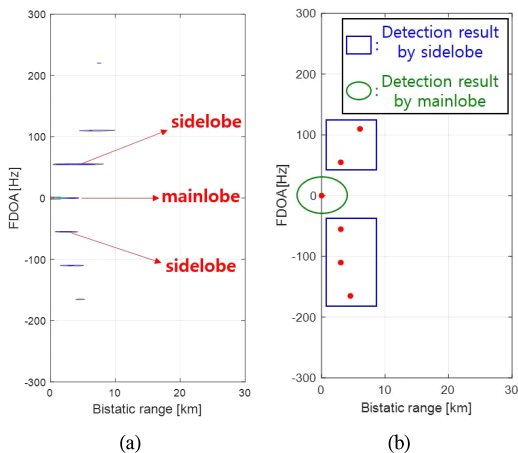


그림 9. AF 유도 결과, (a) 주엽과 부엽, (b) 주엽과 부엽에 의한 탐지 결과
Fig. 9. AF derivation result, (a) mainlobe and sidelobes, (b) detection results by mainlobe and sidelobes.

결과 개수, f_k 는 탐지 결과가 가지는 FDOA를 오름차순으로 정렬했을 때 k 번째 FDOA 값을 의미한다. 고조파 성분에 의한 오탐지 결과뿐만 아니라 잡음에 의한 오탐지 결과 또한 탐지 결과에 존재할 수 있고, 일부 부엽이 임계값 이하의 값을 가져 탐지가 불가능할 수 있으므로 존재하는 탐지 결과에 대한 FDOA 간격에 최빈값을 적용하여 조화 주파수 값을 추정한다.

4.2 오탐지 결과 제거 방법

앞서 추정한 조화 주파수 값을 이용하여 CFAR 탐지 결과에 존재하는 오탐지 결과들을 제거하는 방법은 아래와 같다.

1. CFAR 탐지를 적용한 결과에서 그림 10과 같이 일정 바이스테틱 거리 이내에 존재하는 탐지 결과들은 같은 표적에 의해 생성된 탐지 결과로 판단한다.
2. 앞서 판단된 각각의 표적에 대한 탐지 결과들 내에서 그림 11과 같이 FDOA 축으로 조화 주파수 또는 그 배수만큼 떨어진 곳에 위치한 탐지 결과들을 하나의 그룹으로 묶는다. 그러나 추정한 조화 주파수와 오탐지 결과 간의 FDOA 간격에 오차가 존재할 수 있는

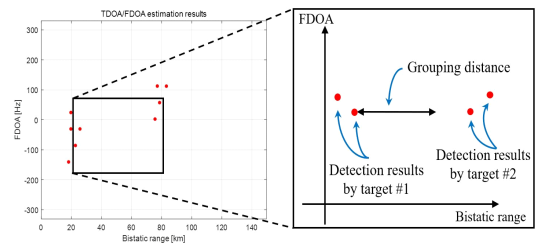


그림 10. 바이스테틱 거리 간격을 이용한 탐지 결과들 그룹화 예시

Fig. 10. Example of grouping detection results using bistatic range intervals.

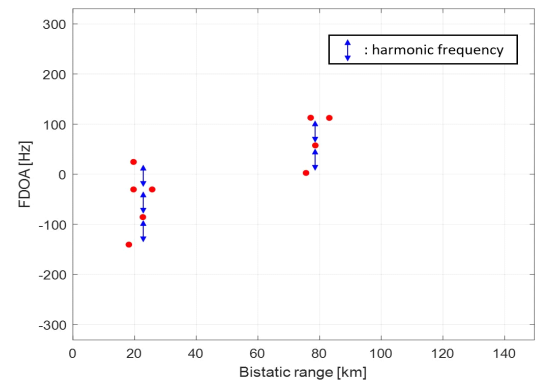


그림 11. FDOA 간격을 이용한 탐지 결과들 그룹화

Fig. 11. Grouping detection results using FDOA intervals.

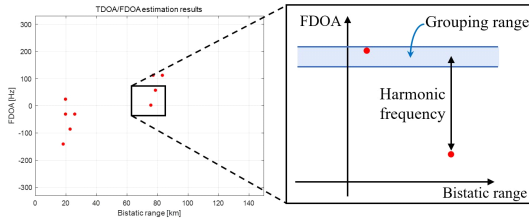


그림 12. FDOA 그룹화 범위 적용 예시
Fig. 12. Application example of FDOA grouping range.

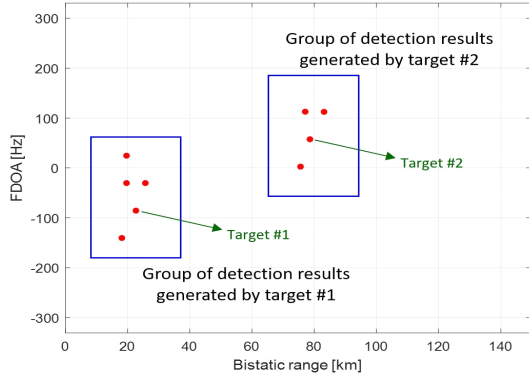


그림 13. 각각의 표적에 대한 탐지 결과들이 알맞은 그룹들로 분류된 결과
Fig. 13. Classification result of all detection results are grouped into the corresponding groups.

므로 그림 12에서 보이는 것과 같은 그룹화 범위를 설정한다. 이러한 그룹화 범위를 설정함으로써 FDOA 축으로 그룹화를 진행할 때, 조화 주파수만큼 이격된 위치로부터 일정 FDOA 범위 이내에 존재하는 탐지 결과들은 같은 그룹으로 판단한다.

3. 같은 방법으로 그림 13과 같이 모든 탐지 결과들을 해당하는 그룹으로 분류한다.

4. 그룹 내에 존재하는 탐지 결과 중 CAF의 크기가 최댓값인 탐지 결과를 제외한 나머지 탐지 결과들을 제거한다.

V. 모의실험

본 장에서는 AF로부터 오탐지 패턴을 추정할 수 있으며 추정한 패턴을 이용하여 부엽에 의한 오탐지 결과를 제거할 수 있음을 모의실험을 통해 보인다. 모의실험에서는 FM 방송 신호의 반송파 주파수가 94.1 MHz를 가진다고 가정하였고, 메시지 신호는 'Coldplay - Everglow' 음원의 3 ~ 4 초 구간을 사용하였다. 수동형 레이더에 수신된 기준 신호의 신호 대 잡음비는 이상적인 수신 환경임을 가정하여 70 dB로

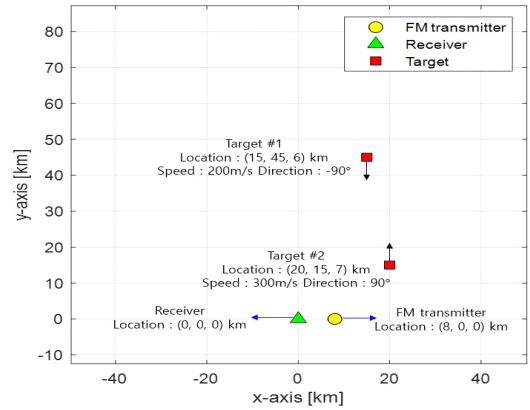


그림 14. 모의실험에 사용된 FM 송신기, 수신기, 표적들의 위치
Fig. 14. Location of FM transmitter, receiver and targets used in simulation.

설정하였다. 그림 14는 수신기, FM 라디오 송신기, 표적의 위치를 나타낸 그림으로서 수신기는 원점인 (0, 0, 0) km, FM 라디오 송신기는 (8, 0, 0) km, 1번 표적은 (15, 45, 6) km에 위치하고 2번 표적은 (20, 15, 7) km에 위치시켰다. 표적 1과 표적 2는 각각 200 m/s, 300 m/s의 속력을 가지고 -90°, 90°의 방향으로 이동하는 상황을 가정하였다. 수동형 레이더를 이용하여 두 표적을 탐지했을 때 CAF에 나타나는 바이스태틱 거리와 FDOA 그리고 수동형 레이더에 수신되는 각각의 표적 반사 신호의 신호 대 잡음비는 표 1과 같도록 설정하였고 다중 표적 탐지를 위한 CFAR 탐지기의 오경보율은 10^{-10} 으로 설정하였다. 탐지 결과들에 대한 그룹화를 수행할 때 바이스태틱 거리 축으로 8 km 이내에 존재하는 탐지 결과들은 동일한 표적에 의한 탐지 결과로 분류하였다. 또한 FDOA 축으로 그룹화를 진행할 때 조화 주파수만큼 이격된 위치로부터 ± 3 Hz 이내에 존재하는 탐지 결과들은 같은 그룹으로 판단하였다.

그림 15는 조화 주파수 추정을 위해 기준 채널에 수신되는 기준 신호를 이용하여 AF를 유도한 후, CFAR 탐지를 적용한 결과이다. AF의 탐지 결과에서 바이스태틱 거리와 FDOA가 0인 곳에 주엽에 의한

표 1. 모의실험에 사용된 표적 반사 신호 정보
Table 1. Target echo signal information used in simulation

Target number	Bistatic range (km)	FDOA (Hz)	SNR (dB)
1	86.17	120.5	-7
2	37.79	-123.4	-10

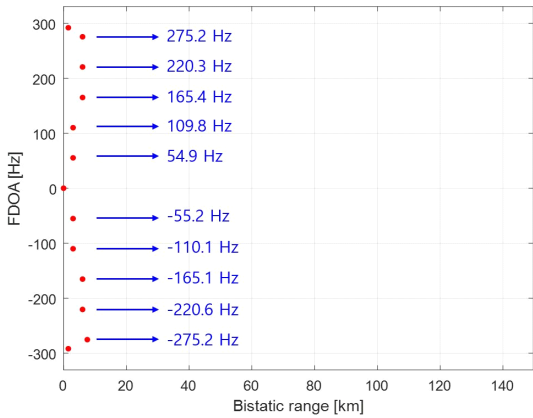


그림 15. AF 유도 결과에 CFAR 탐지 적용 결과
Fig. 15. CFAR detection applied to AF derivation results.

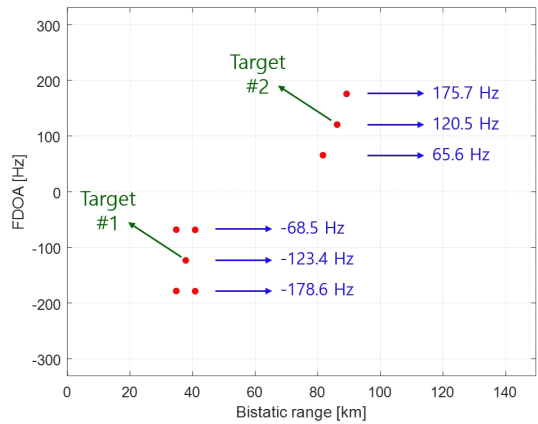


그림 16. CAF 유도 결과에 CFAR 탐지기 적용 결과
Fig. 16. CFAR detector applied to CAF derivation results.

탐지 결과가 위치하고 이외에 부엽에 의한 탐지 결과들이 나타난 것을 확인할 수 있다. 각각의 탐지 결과들의 FDOA 간격에 최빈값을 적용하여 오탐지 제거에 사용될 조화 주파수가 54.9 Hz 임을 계산할 수 있다. 그림 16은 수동형 레이더에 수신된 기준 신호와 간섭 신호가 제거된 감시 신호를 이용하여 유도한 CAF에 CFAR 탐지를 적용한 결과와 탐지 결과들이 가지는 FDOA를 나타낸 것이다. 두 개의 표적에 대한 탐지 결과뿐만 아니라 각각의 표적을 중심으로 부엽으로 인한 오탐지 결과 또한 나타난 것을 확인할 수 있다. 이러한 오탐지 결과들은 표적에 의한 탐지 결과를 중심으로 일정한 FDOA 간격을 가지며 형성되었다. 이는 앞서 기준 신호를 이용하여 추정된 조화 주파수 54.9 Hz와 오탐지 결과들이 가지는 FDOA 간격과의 차이가 설정한 그룹화 범위 이내임을 확인할 수 있다. 이로 인하여 본 논문에서 제안한 방법을 적용한다면 그림 17과 같이 각각의 표적에 해당하는 탐지 결과들끼리 그룹화가 가능하고 그림 18에서 보이는 것처럼 표적에 의한 탐지 결과들 외에 존재하는 오탐지 결과들이 모두 제거된 것을 확인할 수 있다.

본 논문에서 제안한 오탐지 제거 성능을 분석하기 위하여 전체 탐지 결과 개수 중 오탐지 결과 개수를 의미하는 오탐지 비율을 성능 지표로서 새롭게 정의하고 이를 이용하여 오탐지 결과 제거 방법 적용 전과 후를 비교하였다. 오탐지 제거 방법으로 기존에 제안된 오탐지 제거 방법^[12]과 본 논문에서 제안한 오탐지 제거 방법을 사용하였다. 성능 분석을 위한 모의실험은 이전의 모의실험과 같은 음원을 메시지 신호로 설정하였다. 성능 분석에 사용된 오탐지 비율은 아래의 식과 같이 계산하였다.

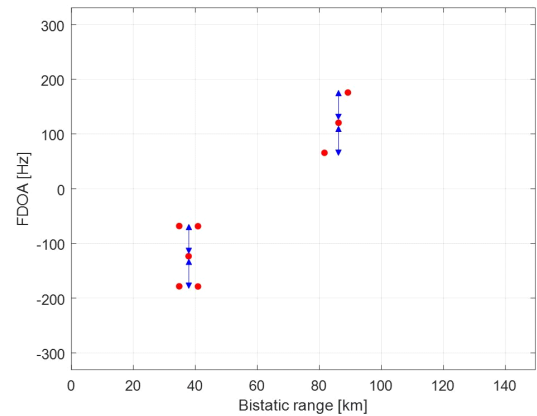


그림 17. 조화 주파수를 이용한 탐지 결과들의 그룹화
Fig. 17. Grouping detection results using harmonic frequency.

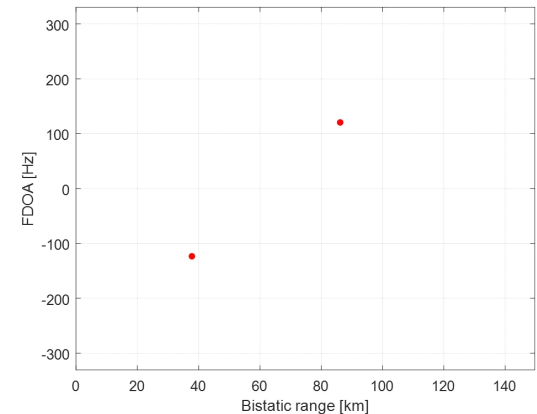


그림 18. 모든 오탐지 결과들이 제거된 표적 탐지 결과
Fig. 18. Target detection results with all false detection results eliminated.

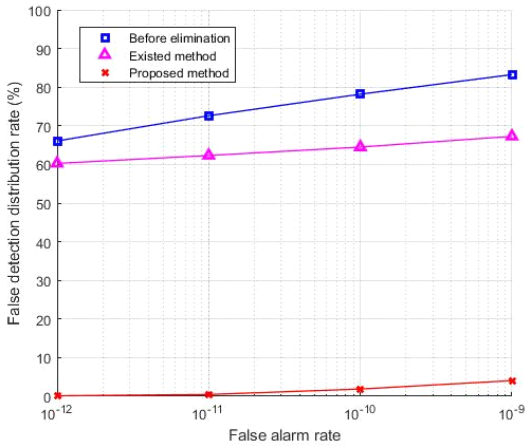


그림 19. 오경보율에 따른 오탐지 비율
Fig. 19. False detection ratio according to false alarm rate.

$$\text{오탐지 비율} = \frac{\text{오탐지 결과 개수}}{\text{전체 탐지 결과 개수}} \times 100(\%). \quad (8)$$

그림 19는 오탐지 제거 방법 적용 전과 적용 후의 오탐지 비율을 비교한 결과이다. 오탐지 비율은 1,000 번의 모의실험 결과를 앙상블 평균하여 나타내었다. 평균적으로 약 75 %의 비율을 가지던 오탐지 결과들이 기존의 제거 방법 적용 후에 약 63 %로 낮아지는 데 비해, 본 논문에서 제안한 제거 방법 적용 후에는 약 2 % 까지 낮아짐을 확인할 수 있다.

기존의 오탐지 제거 방법은 표적을 중심으로 대칭적으로 나타나는 오탐지 결과들의 제거는 가능하지만 비대칭적으로 나타나는 오탐지 결과들의 제거는 불가능하다는 단점을 지니고 있다. 따라서 그림 16 과 같은 탐지 결과에 기존의 오탐지 제거 방법을 적용한다면 2번 표적을 중심으로 비대칭적으로 생성된 오탐지 결과들을 제거할 수 없으므로 비교적 높은 오탐지 비율을 가지게 된다. 하지만 본 논문에서 제안한 방법을 적용한다면 표적을 중심으로 비대칭적으로 형성된 오탐지 결과를 제거할 수 있으므로 제거 방법 적용 후 낮은 오탐지 비율을 가진다. 이러한 결과는 새롭게 제안한 방법이 오탐지 결과 제거에 매우 뛰어난 효과가 있음을 보여주는 것이다.

VI. 결 론

본 논문은 FM 라디오 기반 수동형 레이더의 표적 탐지 성능을 저하시키는 오탐지 결과들의 발생 패턴을 분석하고, 이를 제거하는 방법을 제안하였다. FM 라디오 신호를 이용하여 CAF를 유도할 경우 신호 구

조로 인하여 표적을 중심으로 부엽이 형성될 수 있고, 부엽의 형성 원인이 FM 라디오 신호의 주 채널이 가지는 고조파 성분임을 보였다. 이러한 부엽으로 형성되는 오탐지 결과들을 제거하기 위해 조화 주파수 추정 및 그룹화의 두 가지 단계로 구성된 오탐지 결과 제거 방법을 제안하였고, 모의실험을 통하여 부엽에 의한 오탐지 결과들이 제거가 가능함을 보였다. 또한 오탐지 비율을 이용한 성능 분석을 통하여 제안하는 제거 방법이 오탐지 제거에 효과적임을 증명하였다.

이러한 오탐지 제거 방법은 FM 라디오 기반 수동형 레이더의 표적 탐지 성능을 향상시키고 레이더 시스템의 경량화에 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 하지만 FDOA 측으로 조화 주파수만큼 이격된 탐지 결과들을 묶는 방법은 효과적인 반면, 바이스태틱 거리 측으로 탐지 결과들을 묶는 방법은 매우 인접한 탐지 결과에 대해서는 효과적이지 못한 한계가 있다. 따라서 향후에는 바이스태틱 거리 측으로 인접한 표적에 대한 오탐지 결과들도 제거할 수 있는 강건한 오탐지 제거 방법에 대한 연구를 수행할 예정이다.

References

- [1] G.-H. Park, S.-Y. Son, and H.-N. Kim, "Implementation of fm-broadcasting-based passive radar and analysis of target detection results," *J. KICS*, vol. 44, no. 6, pp. 1201-1209, Jun. 2019.
- [2] 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. Aerospace and Electron. Syst.*, vol. 45, no. 2, pp. 698-722, Apr. 2009.
- [3] R. Tao, Z. Gao, and Y. Wang, "Side peaks interference suppression in DVB-T based passive radar," *IEEE Trans. Aerospace and Electron. Syst.*, vol. 48, no. 4, pp. 3610-3619, Oct. 2012.
- [4] M. Edrich, A. Schroeder, and F. Meyer, "Design performance evaluation of a mature FM/DAB/DVB-T multi-illuminator passive radar system," *IET Radar, Sonar & Navig.*, vol. 8, no. 2, pp. 114-122, Feb. 2014.
- [5] F. Colone, P. Falcon, C. Bongioanni, and P. Lombardo, "WiFi-based passive bistatic radar:

Data processing schemes and experimental results,” *IEEE Trans. Aerospace and Electron. Syst.*, vol. 48, no. 2, pp. 1061-1079, Apr. 2012.

- [6] N. J. Wills and H. D. Griffiths, *Advances in Bistatic Radar*, SciTech Inc., 2007.
- [7] K. S. Kulpa and Z. Czekala, “Masking effect and its removal in PCL radar,” *IEE Proc. Radar, Sonar and Navig.*, vol. 152, no. 3, pp. 174-178, Jun. 2005.
- [8] R. Cardinali, F. Colone, C. Ferreti, and P. Lomboro, “Comparison of clutter and multipath cancellation techniques for passive radar,” *IEEE National Radar Conf.*, pp. 469-474, Apr. 2007.
- [9] S. Haykin, *Adaptive Filter Theory*, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 4th Ed., 2002.
- [10] F. Colone, R. Cardinali and P. Lombardo, “Cancellation of clutter and multipath in passive radar using a sequential approach,” *2006 IEEE Conf. Radar*, pp. 24-27, Verona, USA, Apr. 2006.
- [11] P. P. Gandhi and S. A. Kassam, “Analysis of CFAR processors in non-homogeneous background,” *IEEE Trans. Aerospace and Electron. Syst.*, vol. 24, no. 4, pp. 427-445, Jul. 1988.
- [12] Y. Fu, X. Wan, X. Zhang, G. Fang, and J. Yi, “Side peak interference mitigation in fm-based passive radar via detection identification,” *IEEE Trans. Aerospace and Electron. Syst.*, vol. 53, no. 2, pp. 778-788, Apr. 2017.
- [13] P. E. Howland, D. Maksimiuk, and G. Reitsma, “FM radio based bistatic radar,” *IEE Proc. Radar Sonar Navig.*, vol. 152, no. 3, pp. 107-115, Jun. 2005.

박도현 (Do-Hyun Park)



2019년 2월 : 부산대학교 전자공학과 학사 졸업
 2019년 3월~현재 : 부산대학교 전기전자공학과 석박통합과정 <관심분야> 전자전·레이더 신호처리, 배열 신호처리

[ORCID:0000-0001-9885-1564]

박근호 (Geun-Ho Park)



2013년 2월 : 부산대학교 전자전기공학부 학사 졸업
 2015년 2월 : 부산대학교 전자전기컴퓨터공학과 석사 졸업
 2020년 2월 : 부산대학교 전자전기컴퓨터공학과 박사 졸업
 2020년 3월~현재 : 부산대학교 전자공학과 박사후연구원

<관심분야> 전자전·레이더 신호처리, 배열 신호처리
 [ORCID:0000-0002-1919-7048]

김형남 (Hyoung-Nam Kim)



1993년 2월 : 포항공과대학교 전자전기공학과 학사 졸업
 1995년 2월 : 포항공과대학교 전자전기공학과 석사 졸업
 2000년 2월 : 포항공과대학교 전자전기공학과 박사 졸업
 2000년 5월 : 포항공과대학교 전자

자컴퓨터공학부 박사후연구원
 2000년 5월~2003년 2월 : 한국전자통신연구원 무선방송연구소 선임연구원
 2003년 3월~2007년 2월 : 부산대학교 전자전기통신공학부 조교수
 2007년 3월~2012년 2월 : 부산대학교 전자전기통신공학부 부교수
 2009년 2월~2010년 2월 : Johns Hopkins Univ. Visiting Scholar
 2015년 9월~2016년 8월 : Univ. of Southampton Visiting Professor
 2012년~현재 : 부산대학교 전자공학과 교수
 <관심분야> 적응신호처리, 레이더 및 소나 신호처리, 머신러닝, 생체 신호처리
 [ORCID:0000-0003-3841-448X]