

FM 방송 기반 수동형 레이더 구현 및 표적 탐지 결과 분석

박근호*, 손소영*, 김형남^o

Implementation of FM-Broadcasting-Based Passive Radar and Analysis of Target Detection Results

Geun-Ho Park*, So-Young Son*, Hyoung-Nam Kim^o

요 약

FM 라디오 기반의 수동형 레이더 시스템은 방송 목적으로 활용되는 FM 라디오 신호를 이용하여 이동 표적을 탐지하는 레이더 기술로서, 송신부 설계가 필요하지 않아 수동형 레이더로 분류된다. 본 논문에서는 안테나 어레이를 활용하는 방법에 비해 상대적으로 구현이 간단한 FM 야기 안테나 기반의 수동형 레이더 시스템 구현 방법을 설명하고, 구현한 시스템을 이용하여 획득한 실측 신호를 기반으로 5 대의 항공기 (KAL1002, JJA1451, ABL116, KAL785, TWB227)에 대한 탐지 결과를 제시한다. 또한, 표적 탐지 결과에서 발생한 클러터를 제거하기 위한 후처리 기법을 설명하고 이에 대한 성능을 확인한다.

키워드 : FM 라디오, 수동형 레이더, 표적 탐지, CFAR 탐지, USRP

Key Words : FM radio, passive radar, target detection, CFAR detection, USRP

ABSTRACT

An FM-radio-based passive radar system is a sort of radar technique for detecting moving targets by exploiting FM-radio signal. This radar system does not require to design signal transmission parts, and thus it is classified as a passive radar. In this paper, the implementation details of FM-Yagi-antenna-based passive radar structure, a relatively simpler method than the antenna-array-based one, are explained. We also suggest the detection results of five airliners (KAL1002, JJA1451, ABL116, KAL785, TWB227) from the real-data. In addition, a post-processing technique is suggested to remove the interference detection results and we also analyze the detection performance after removing the interference.

I. 서 론

최근 frequency modulated (FM) 라디오^[1], digital video broadcasting-terrestrial (DVB-T)^[2], digital audio broadcasting (DAB)^[3], Wi-Fi^[4] 등의 상용 방송

및 통신 신호를 활용하여 표적을 탐지하는 수동형 바이스태틱 레이더 시스템에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이 중에서 FM 라디오 송신소에서 송출되는 신호는 레이더의 목적에 활용할만한 적절한 송출 세기를 가지고 있어 수동형 레이더에서 가장 널리 활

※ 이 논문은 2017년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No. 2017R1D1A1B04035230)

♦ First Author : Department of Electrical and Computer Engineering, Pusan National University, fot97311@pusan.ac.kr, 학생회원

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

* Department of Electrical and Computer Engineering, Pusan National University, hello_syoung@pusan.ac.kr, 학생회원

논문번호 : 201902-456-D-RN, Received February 9, 2019; Revised April 17, 2019; Accepted April 17, 2019

용되고 있다⁵⁾. 그리고 FM 라디오 방송은 일반적인 레이더 운용 주파수에 비해 낮은 주파수인 very high frequency (VHF) 대역에서 운용되므로, 저피탐 비행체에 대한 radar cross section (RCS) 확보가 기존의 레이더 시스템에 비해 상대적으로 용이한 것으로 알려져 있다⁵⁾.

이러한 상용 방송 및 통신 목적을 위해 송신기에서 방사된 신호는 이동하는 표적으로부터 반사될 수 있으며, 수동형 레이더 시스템은 이러한 표적 반사 신호를 이용하여 표적의 위치 및 속도를 추정한다⁶⁾. 하지만 표적 신호는 0 dB 이하의 매우 낮은 signal-to-noise ratio (SNR)을 가지고 있어, 표적 신호의 처리 이득을 높일 수 있는 방법이 요구된다.

표적 신호의 처리 이득을 높이는 대표적인 방법은 cross-ambiguity function (CAF)으로서, CAF는 송신기와 수신기의 직선 경로로 전파되는 기준 신호와 표적으로부터 반사된 표적 신호의 time difference of arrival (TDOA) 및 frequency difference of arrival (FDOA)에 대한 상호상관 함수 (cross-correlation function)를 의미한다. 따라서 CAF를 유도하고 표적 신호의 처리 이득을 극대화하기 위해서는 표적 신호와 기준 신호를 분리하여 수신하는 시스템 구성이 필요하다.

FM 기반의 수동형 레이더 시스템에서 표적 신호와 기준 신호를 분리하여 수신하기 위하여 많이 사용하는 방법은, 다수의 안테나로 구성된 배열 안테나를 이용하여 송신기와 표적의 방향으로 빔을 형성하는 것이다¹¹⁾. FM 라디오 송신소와 표적의 방향을 조향한 각 빔의 출력은 기준 채널 (reference channel)과 감시 채널 (surveillance channel)로 정의된다. 하지만, 배열 안테나를 기반으로 기준 채널과 감시 채널을 운용하는 방법은 다수의 안테나를 활용함에 따라 신호 수집 장치의 개수가 증가하여 시스템 구현 비용이 증가하는 문제를 발생시킨다.

본 논문에서는 배열 안테나 구조를 대체할 수 있는 FM 야기 안테나 기반의 수동형 레이더 시스템 구현 방법을 설명하고, 실측 신호 기반의 표적 탐지 수행 결과를 분석한다. 또한, 표적 탐지 결과 중에서 클러터에 의한 탐지 결과를 제거하는 후처리 방식의 알고리즘을 제안하고 이에 대한 성능 분석을 수행한다.

II 장에서는 수동형 레이더 시스템의 개요에 대해 설명하고, III 장에서는 수동형 레이더 시스템 구현 결과를 제시한다. IV 장에서는 구현한 시스템의 신호 실측 결과를 분석하고 클러터 제거를 위한 후처리 기법을 제시한다. 마지막으로 V 장에서는 논문의 결론을

맺는다.

II. 수동형 레이더 기반 표적 탐지 시스템 개요

본 장에서는 수동형 레이더 기반 표적 탐지 시스템을 크게 바이스테틱 기하 구조와 시스템의 블록 다이어그램의 두 가지 내용으로 나누어 설명한다.

2.1 바이스테틱 기하 구조

바이스테틱 기하는 송신기-표적-수신기를 꼭짓점으로 하는 삼각형 구조를 의미하는 것으로서, 그림 1과 같이 바이스테틱 기하 구조에서 송신기-표적-수신기로 이어지는 경로 길이 $r_1 + r_2$ 를 추정하면 송신기와 수신기를 초점으로 하는 타원으로 표적의 위치를 나타낼 수 있다. 다수의 바이스테틱 기하 구조를 활용하거나 표적 신호의 도래각 추정 결과를 활용하면 표적의 위치를 하나의 점으로 추정할 수 있게 된다.

송신기-표적-수신기 경로인 $r_1 + r_2$ 는 기준 신호와 표적 신호의 시간 지연 차이인 TDOA로부터 추정할 수 있다. 본 논문에서 TDOA에 빛의 속도를 곱하여 나타낸 거리 변환 값을 바이스테틱 거리로 정의한다. 또한, 표적이 고속 이동함에 따라 표적 신호에 도플러 주파수 천이가 나타내며, 이로 인해 기준 신호와 표적 신호의 주파수 차이를 의미하는 FDOA가 발생한다. 표적의 위치 및 속도 추정을 위한 TDOA와 FDOA 추정은 다음 절에서 설명하는 시스템 구조에서 수행할 수 있다.

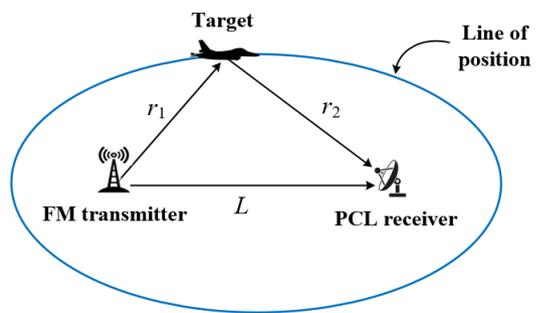


그림 1. 바이스테틱 기하 구조
Fig. 1. Bistatic geometry.

2.2 수동형 레이더 시스템 구조

그림 2는 배열 안테나 구조를 활용하는 수동형 바이스테틱 레이더 시스템의 블록 다이어그램을 나타낸 것으로서, 다수의 안테나에서 수집한 신호에 각각 송신기와 표적의 방향으로 빔 형성을 수행한 결과를 기

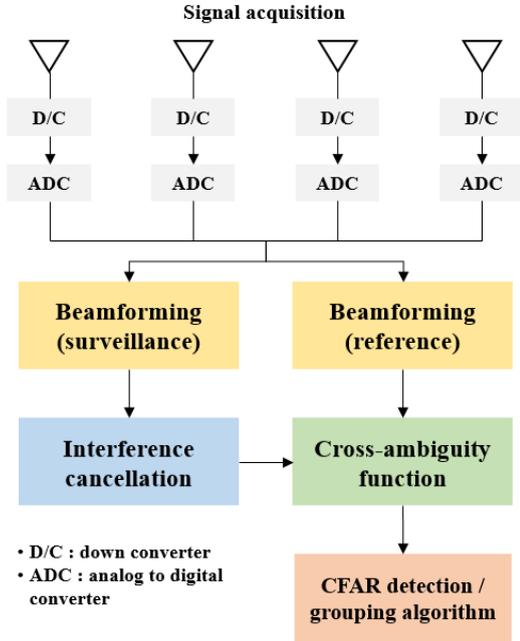


그림 2. 수동형 바이스테틱 레이더의 블록 다이어그램
Fig. 2. Block diagram of passive bistatic radar.

준 채널과 감시 채널 신호로 활용한다. 감시 채널의 빔 형성기 출력에서는 여전히 표적 신호 이외에도 기준 신호 및 클러터의 간섭 신호가 존재하므로 간섭 신호 제거 알고리즘을 통해 이를 제거한다^{7,8)}. 간섭 신호 제거기의 출력과 기준 채널의 출력은 CAF 유도를 위해 사용되며, CAF 결과에서 다중 표적 탐지를 위한 constant false alarm rate (CFAR) 탐지 알고리즘⁹⁾을 적용한다. 최종적으로 CFAR 탐지 결과에서 grouping 알고리즘을 이용하여 표적의 개수를 결정하고 각 표적에 해당하는 TDOA와 FDOA를 추정한다.

2.2.1 Cross-ambiguity function

CAF는 감시 채널 신호 $x_s(t)$ 와 기준 채널 신호 $x_r(t)$ 의 시간 지연 τ 와 도플러 주파수 천이 ν 에 대한 상호 상관함수로 유도할 수 있으며, 이를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$A(\tau, \nu) = \frac{1}{T} \int_0^T x_s(t)x_r(t-\tau)e^{-j2\pi\nu t} dt. \quad (1)$$

이 때, T 는 수집 시간을 나타낸다. CAF 크기의 제곱인 $|A(\tau, \nu)|^2$ 의 극댓값으로부터 표적 탐지 결과를 유도할 수 있다.

그림 3은 음원 파일을 이용하여 표적 신호와 기준

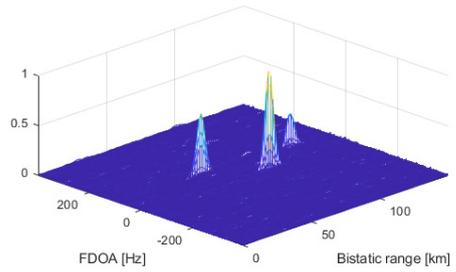


그림 3. 모의실험을 통한 CAF 유도 결과
Fig. 3. CAF derivation result through the simulation.

신호를 생성하고 이러한 신호 생성 결과로부터 CAF를 유도하여 나타낸 것으로서, 세 개의 표적에 대한 CAF의 극댓값 형성 결과를 확인할 수 있다 (신호 수집 시간 1초, 샘플링 율 198.45 kHz). 이와 같은 CAF의 유도 결과에 CFAR 탐지 알고리즘을 적용하면 표적의 존재유무를 CAF 상에서 0과 1로 구분하여 나타낼 수 있다.

2.2.2 Constant false alarm rate

CFAR 탐지 기법은 CAF 상에서 존재하는 극댓값을 검출하는 알고리즘으로서, 고정된 값의 오경보 확률을 유지하는 동시에 최적의 검출 성능을 확보하도록 하는 임계값을 설정하는 것이 CFAR 탐지의 목표이다. CFAR 탐지는 먼저 오경보 확률을 결정하고 오경보 확률에 대한 적절한 임계값을 설정하여 표적의 탐지 유무를 결정한다⁹⁾.

그림 4는 임계값을 설정하고 표적의 존재유무를 판단하기 위한 CFAR 탐지의 윈도우 설정 방법을 나타낸 것으로서, CFAR 탐지의 윈도우는 크게 테스트 셀과 레퍼런스 셀, 가드 셀로 분류한다. 테스트 셀은 표적의 존재유무를 판단하기 위한 셀을 의미하며 레퍼런스 셀은 잡음의 분산을 추정하기 위한 것이며, 가드 셀은 잡음 추정을 위한 레퍼런스 셀에 신호의 성분이 포함되지 않게 한다.

그림 5는 그림 3의 CAF 유도 결과에 CFAR 탐지 결과를 적용한 것으로서, 표적에 의한 CAF의 극댓값 위치에서 탐지 결과가 나타난 것을 확인할 수 있다. 그림 5에서는 임계값 설정을 위해 cell-averaging (CA) CFAR 알고리즘을 사용하였고, 오탐지 확률은

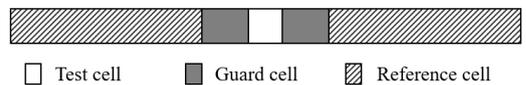


그림 4. CFAR 탐지의 윈도우 셀
Fig. 4. Window cells of CFAR detector.

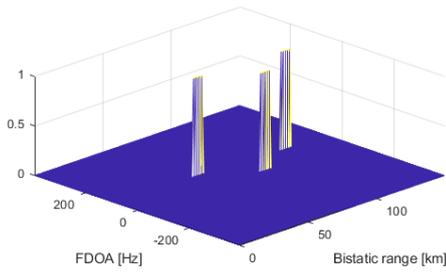


그림 5. 모의실험을 통한 CFAR 탐지 결과
Fig. 5. CFAR detection result through the simulation.

10^{-12} , 가드 셀 크기 10, 레퍼런스 셀 크기를 10으로 설정하였다. 탐지 결과는 윈도우 셀을 FDOA 축의 1차원으로 설정하여 유도하였다.

2.2.3 Grouping 알고리즘

Grouping 알고리즘은 CFAR 탐지 결과에서 바이스태틱 거리 정보와 FDOA 정보를 최종적으로 추출하기 위해 CFAR 탐지 결과에서 표적의 개수를 결정하는 기법으로서, grouping 알고리즘은 검출된 셀 중에서 셀 거리 2 이하의 셀은 모두 같은 표적의 인덱스 값이 부여되도록 한다. 그림 6은 그림 5의 CFAR 탐지 결과에 grouping 알고리즘을 적용한 것으로서 각 표적에 의한 탐지 결과가 각기 다른 인덱스 값으로 분류된 것을 확인할 수 있다. 각 표적 인덱스 값에 해당하는 셀 중에서 가장 최대값을 나타내는 셀의 TDOA와 FDOA를 각 표적의 최종 TDOA와 FDOA 추정값으로 결정한다.

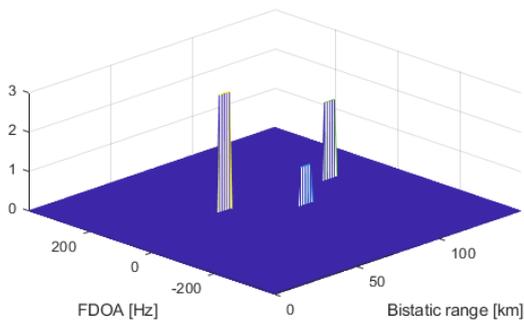


그림 6. 모의실험을 통한 grouping 알고리즘 결과
Fig. 6. Grouping algorithm result through the simulation.

III. FM 기반 수동형 레이더 시스템 구현

그림 2에서 나타낸 것과 같이 수동형 레이더 시스템은 배열 안테나 구조를 활용하는 것이 일반적이지

만, 배열 안테나 구조는 안테나와 신호 수집 장치를 다수 사용해야 하기 때문에 시스템 구현이 복잡해지고 비용이 증가하게 된다. 따라서 본 논문에서는 그림 7의 시스템 구조를 활용하여 FM 라디오 기반의 수동형 바이스태틱 레이더 시스템을 구현하였다.

그림 7은 그림 2의 시스템에서 배열 안테나 구조를 FM 야기 안테나 2 대로 대체한 시스템의 블록 다이어그램을 나타낸 것으로서, FM 야기 안테나의 패턴이 지향성을 가지고 있으므로 기준 채널과 감시 채널에 해당하는 안테나를 각각 FM 라디오 송신소와 감시 영역의 방향으로 지향함으로써 빔 형성의 효과를 얻을 수 있다. 그림 8은 기준 채널의 안테나와 감시 채널의 안테나의 실제 지향 방향과 송신소, 수신기의 위치를 지도상에서 나타낸 것으로서, 기준 채널은 창원의 불모산 송신소 방향을 지향하였고 감시 채널은 김해공항에서 이착륙하는 항공기를 탐지하기 위해 항공기의 주요 항로의 방향으로 지향하였다.

FM 기반 수동형 레이더 시스템 구현을 위한 장비는 (1) FM 야기 안테나 2 대, (2) 아날로그 신호 생성기, (3) USRP N210 2 대, (4) 호스트 PC의 네 가지로 구성되어 있다. FM 야기 안테나는 신호 수신용이며, 아날로그 신호 생성기는 각 USRP의 시간 및 주파수 동기화를 일치시키기 위해 사용한다. 아날로그 신호 생

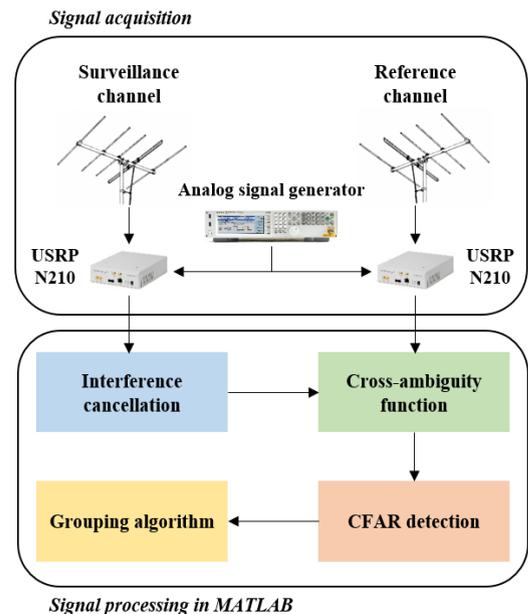


그림 7. FM 야기 안테나를 이용한 수동형 바이스태틱 레이더 시스템 구조
Fig. 7. Passive bistatic radar system structure using FM Yagi antennas.

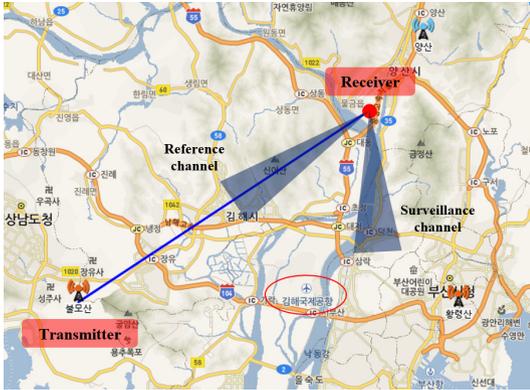


그림 8. FM 라디오 송신소 (불모산)와 수신기 위치 (https://map.kbs.co.kr/map.jsp)
 Fig. 8. Location of FM radio transmitter (Bulmosan) and receiver (https://map.kbs.co.kr/map.jsp).

성기에서는 주파수와 시간 동기 일치를 위해 10 MHz의 클럭 신호와 1 pulse-per-second (PPS)의 구형파 신호를 각 USRP 장비에 입력시킨다. 호스트 PC는 각 USRP로부터 수신한 기저대역 신호를 이용하여 MATLAB에서 신호처리를 수행하도록 한다.

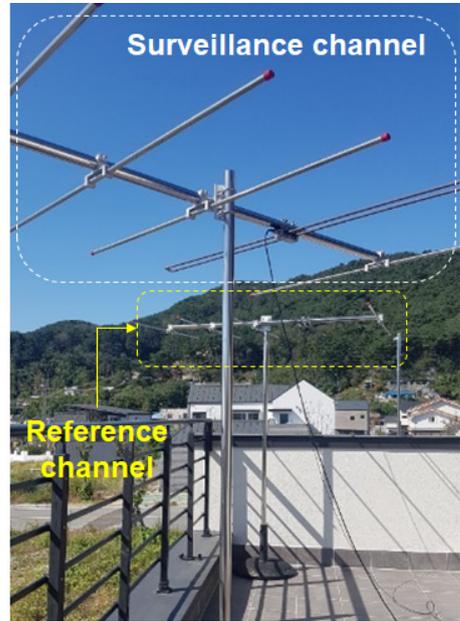
시간 및 주파수 동기가 일치되면 감시 채널과 기준 채널에 대한 복소 기저대역 신호가 호스트 PC에 전송된다. 호스트 PC에 각 채널 신호가 전달되면, 감시 채널의 출력 신호는 간섭 신호 제거 알고리즘을 통해 표적 신호를 추출되고, 추출된 표적 신호와 기준 신호로부터 CAF를 유도할 수 있다. CAF는 많은 연산량이 요구되므로 CAF의 연산량을 감소시키기 위해 Stein's fine mode^[10]를 이용하여 CAF를 연산하였다. CAF 결과에 CFAR 탐지와 grouping 알고리즘을 적용하면 최종적으로 표적에 대한 탐지 결과와 TDOA, FDOA 추정 결과를 획득하게 된다.

그림 9에는 그림 7의 시스템 구조와 그림 8의 안테나 배치 방법에 따른 수동형 레이더 시스템 구축 결과를 나타내었다. 그림 9로부터 FM 야기 안테나 2 대와 USRP N210 2 대, 아날로그 신호 생성기, 호스트 PC로 구성된 시스템 모습을 확인할 수 있다.

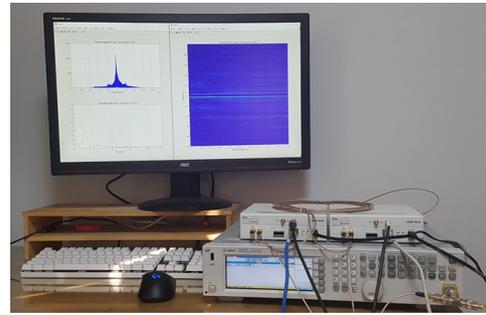
IV. 신호 실측 결과 분석 및 오탐지 제거 알고리즘

4.1 신호 실측 결과

김해공항 일대를 운항하는 항공기를 효과적으로 탐지하기 위해 수신기는 양산 물금읍에 배치하였고 창원 불모산의 송신소로부터 송출되는 91.7 MHz의 라디오 채널 (KBS 창원 제1라디오, 5 kW)을 이용하여 항공기를 탐지하였다. 감시 채널의 간섭 신호 제거 알



(a)

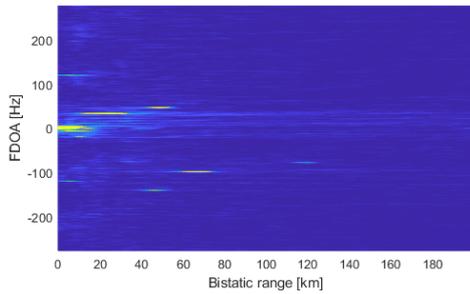


(b)

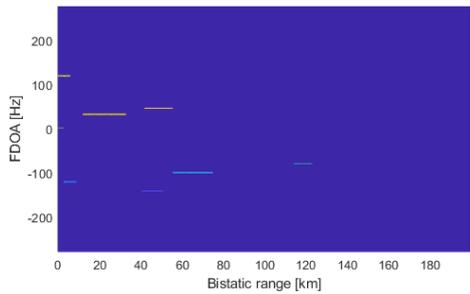
그림 9. FM 라디오 기반 수동형 레이더 시스템 구현, (a) FM 야기 안테나, (b) USRP N210, 아날로그 신호 생성기
 Fig. 9. Implementation of FM-radio-based passive radar system, (a) FM Yagi antennas, (b) USRP N210, analog signal generator.

고리즘은 extensive cancellation algorithm^[7] (ECA) 기법을 사용하였으며 CAF의 연산량 감소를 위해 Stein's fine mode 기법^[10]을 사용하였다. II 장에서 설명한 것과 같이 CFAR 탐지의 윈도우는 FDOA 측으로 설정하여 표적 탐지를 수행하였고, CFAR 탐지 결과로부터 grouping 알고리즘을 적용하였다. 표적 탐지를 위한 신호 처리 알고리즘에 사용된 상세 파라미터는 표 1에 정리하였다.

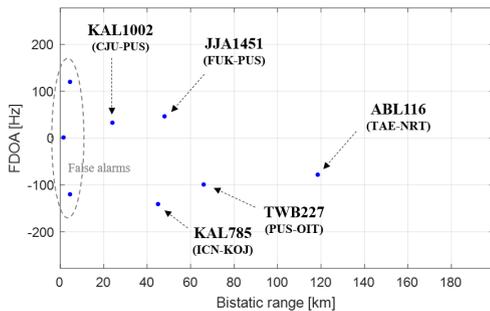
그림 10에는 2019년 1월 8일 오전 9시 37분 15초에 측정된 신호로부터 유도한 CAF, CFAR 탐지 결과 및 grouping 알고리즘 결과, 최종 TDOA와 FDOA 추정 결과를 각각 나타내었다. TDOA와 FDOA 추정 결



(a)



(b)



(c)

그림 10. 실측 데이터 기반 표적 탐지 결과, (a) CAF, (b) CFAR 탐지 및 grouping 알고리즘, (c) TDOA 및 FDOA 추정 결과
 Fig. 10. Real data based target detection result, (a) CAF, (b) CFAR detection and grouping algorithm, (c) TDOA and FDOA estimation results.

과를 확인해 보면 총 5 개의 표적에 대한 탐지 결과와 3 개의 오탐지가 발생한 것으로 판단된다.

그림 10에서 나타낸 표적 탐지 결과의 신뢰성을 확인하기 위해 동일한 시간대의 항공기 운행 정보를 Flightradar24 (<http://flightradar24.com>)에서 확인하여 표적 탐지 결과와 비교하였다. 그림 11은 동일 시간대의 항공기 운항 현황을 나타낸 것으로서, 불모산 송신소와 수신기 부근에서 총 6 대의 항공기가 Flightradar24의 레이더 상에서 나타나는 것을 볼 수 있다. 그 중 항공기 식별번호 ABL8136은 제주공항을

표 1. 실험 파라미터
 Table 1. Experimental parameters.

Signal observation	Observation time	1 [sec]
	Sampling frequency	200 [kHz]
	Carrier frequency	91.7 [MHz]
	FM transmitter	Bulmosan
Interference cancellation	Algorithm	ECA
	Tap size	120
CAF	Computation algorithm	Stein's fine mode
	Decimation factor	360
	Bistatic range interval	1.5 [km]
CFAR detector	FDOA interval	0.27 [Hz]
	Detection algorithm	CA-CFAR
	False alarm rate	10^{-12}
	Reference window length	20
	Guard cell length	10



그림 11. 김해국제공항 부근에서 운행하는 항공기 위치 (2019년 1월 8일 오전 9시 37분) (<http://flightradar24.com>)
 Fig. 11. Location of aircrafts near Gimhae International Airport (8 January 2019, 9:37 AM) (<http://flightradar24.com>).

출발하여 김해공항에 도착하는 항공기로서, Flightradar24에 의하면 이 항공기는 9시 35분경에 김해공항에 도착하였다는 것을 확인할 수 있으며, 레이더 정보에서는 제거되지 않고 항공기 정보가 남아있는 것으로 보인다. 9시 38분이 되는 순간에는

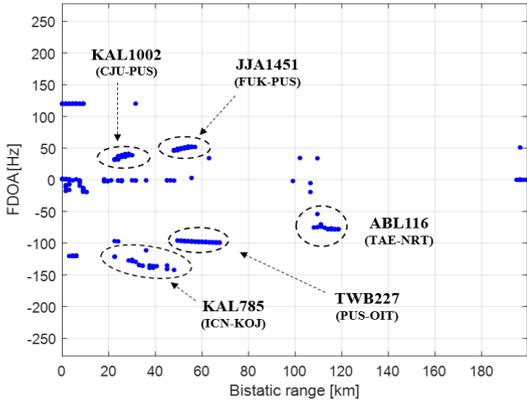


그림 12. 항공기 탐지 결과 (후처리 기법 적용 전)
Fig. 12. Aircraft detection results (before applying post-processing).

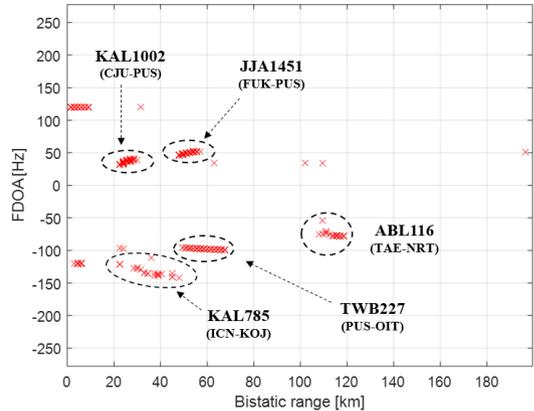


그림 13. 항공기 탐지 결과 (후처리 기법 적용 후)
Fig. 13. Aircraft detection results (after applying post-processing).

ABL8136의 항행기록이 지도상에서는 제거되었다. ABL8136을 제외한 나머지 5 개의 항공기는 그림 10의 탐지 결과에서 모두 나타난 것으로 추측된다. KAL1002와 JJA1451은 수신기를 기준으로 항공기와 의 거리가 감소하고 있기 때문에 FDOA가 양수를 나타내며, TWB227과 KAL785는 수신기로부터 거리가 증가하고 있으므로 FDOA가 음수를 나타내고 있다. 대구국제공항을 출발하여 일본 나리타국제공항으로 운행하는 ABL116도 수신기로부터 거리가 증가하고 있으므로 FDOA는 음수를 나타내는 것으로 보이며, 5 개의 항공기 중에서 수신기로부터의 거리가 최대이므로 바이스테틱 거리 또한 최대값을 나타낸 것으로 보인다.

그림 12는 2019년 1월 8일 오전 9시 36분 21초부터 37분 20초 사이에 측정된 신호를 이용하여 항공기를 탐지한 결과를 모두 나타낸 것으로서, 그림 10과 11에서 설명한 바와 같이 5 개의 항공기에 대한 탐지 결과가 일정한 트랙을 형성하고 있는 것을 확인할 수 있다. 하지만, 탐지 결과에서 클러스터에 의한 탐지 결과가 다수 발생하기 때문에 CFAR 탐지기의 결과에서 클러스터에 의한 탐지 결과를 제거할 수 있는 후처리 기법의 적용이 필요하다.

4.2 오탐지 제거 알고리즘

그림 12에서 5 개의 항공기에 대한 탐지 결과가 일정한 트랙을 형성하고 있는 것을 확인하였다. 하지만, 항공기에 의한 탐지 결과 외에도 다른 탐지 결과가 존재하는 것을 볼 수 있다. 이러한 탐지 결과는 클러스터나 FM 라디오 신호의 사이드로브에 의해 발생한 것으로 판단되며, 클러스터에 의한 탐지 결과는 0 Hz의

FDOA 위치에 바이스테틱 거리 축으로 나타난다. 또한, FM 라디오 신호의 사이드로브는 0 m의 바이스테틱 거리에 대해 FDOA 축으로 발생하는 특징이 있다^[12]. 두 가지 종류의 오탐지 결과를 최소화하기 위해, 최종 탐지 결과에서 오탐지 결과를 제거하는 후처리 기법을 적용하였다.

임의의 표적 탐지 결과에 대한 FDOA와 TDOA를 각각 ν_b , τ_b 라 할 때, 표적 탐지 결과는 다음의 두 가지 조건 중 하나를 만족하면 전체 탐지 결과에서 제거하도록 설정하였다.

$$a. |\nu_b| < \nu_t, \quad \nu_t > 0, \quad b. \tau_b = 0. \quad (2)$$

조건 a에서 ν_t 는 임의의 양수를 나타낸다. 조건 b는 표적 탐지 결과에 대한 FDOA의 크기가 ν_t 이하일 경우에 제거한다는 것을 의미하며, 이러한 조건은 고속으로 이동하는 표적의 FDOA 크기가 대부분의 상황에서 ν_t 이상의 값을 가진다는 점을 고려하여 설계하였다. 본 논문에서 ν_t 는 20 Hz로 설정하였다. 조건 b의 경우에는 바이스테틱 거리가 0 인 탐지 결과를 제거하는 것을 의미하며, 감시 채널에 포함되는 기준 신호가 완벽히 제거되지 않았을 때 바이스테틱 거리가 0인 위치에서 탐지 결과가 발생할 수 있다는 점을 고려하였다. 그림 13은 본 논문에서 사용한 후처리 기법을 그림 12의 결과에 적용한 것으로서, 항공기 탐지 결과를 제외한 많은 오탐지가 제거된 것을 확인할 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 FM 라디오 신호를 이용한 수동형 바이스테틱 레이더 시스템의 구현 방법을 하드웨어와 신호처리 구조의 두 단계로 나누어 설명하고, 구현한 시스템을 기반으로 실측한 신호를 이용하여 항공기를 탐지한 결과를 제시하였다. 2019년 1월 8일 오전 9시 37분경에 측정한 신호로부터 항공기를 탐지한 결과를 분석해보면 총 5 개의 항공기 (KAL1002, JJA1451, ABL116, KAL785, TWB227)가 수동형 레이더 시스템에 의해 탐지된 것으로 추측되며, Flightradar24의 항공기 추적 결과와 비교해볼 때 수동형 레이더 시스템의 탐지 결과가 타당한 것으로 판단된다. 또한, 수동형 바이스테틱 레이더 시스템의 표적 탐지 결과에서는 클러터에 의해 오탐지가 발생할 수 있으므로, 이러한 오탐지를 탐지 결과에서 제거하는 후처리 기법을 제안하였고 이를 적용하여 표적 탐지 결과 이외의 오탐지를 효과적으로 제거하는 것을 확인하였다.

References

[1] G.-H. Park, D.-G. Kim, H.-J. Kim, J.-O. Park, W.-J. Lee, J. H. Ko, and H.-N. Kim, "Performance analysis of interference cancelation algorithms for an FM Based PCL system," *J. KICS*, vol. 42, no. 4, pp. 819-830, Apr. 2017.

[2] S.-H. Seol, Y.-J. Choi, and I.-S. Choi, "Target recognition method of DTV-Based passive radar using multi-channel combining method," *The J. Korean Inst. Electromagnetic Eng. and Sci.*, vol. 28, no. 10, pp. 794-801, Oct. 2017.

[3] S. Choi, D. Crouse, P. Willett, and S. Zhou, "Multistatic target tracking for passive radar in a DAB/DVB network: Initiation," *IEEE Trans. Aerospace and Electron. Syst.*, vol. 51, no. 3, pp. 2460-2469, Jul. 2015.

[4] F. Colone, T. Martelli, C. Bongoanni, D. Pastina, and P. Lombardo, "Wifi-based PCL for monitoring private airfields," *IEEE Trans. Aerospace and Electron. Syst.*, vol. 32, no. 2, pp. 22-29, Feb. 2017.

[5] N. J. Wills and H. D. Griffiths, *Advances in Bistatic Radar*, SciTech Inc., 2007.

[6] H. Ma, M. Antoniou, D. Pastina, F. Santi, F.

Pieralice, M. Bucciarelli, and M. Cherniakov, "Maritime moving target indication using GNSS-Based bistatic radar," *IEEE Trans. Aerospace and Electron. Syst.*, vol. 54, no. 1, pp. 115-130, Feb. 2018.

[7] 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.

[8] F. Colone, C. Palmarini, T. Martelli, and E. Tilli, "Sliding extensive cancellation algorithm for disturbance removal in passive radar," *IEEE Trans. Aerospace and Electron. Syst.*, vol. 52, no. 3, pp. 1309-1326, Jun. 2016.

[9] H. Rohling, "Radar CFAR thresholding in clutter and multiple target situations," *IEEE Trans. Aerospace and Electron. Syst.*, vol. 19, no. 4, pp. 608-621, Jul. 1983.

[10] S. Stein, "Algorithm for ambiguity function processing," *IEEE Trans. Acoust., Speech, and Sign. Process.*, vol. ASSP-29, no. 3, pp. 588-599, Aug. 1981.

[11] M. Villano, F. Colone, and P. Lombardo, "Antenna array for passive radar: Configuration design and adaptive approaches to disturbance cancellation," *Int. J. Antennas and Propag.*, vol. 2013, article ID 920639, p. 16, Sep. 2013.

[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. 52, no. 2, pp. 778-788, Apr. 2017.

박 근 호 (Geun-Ho Park)



2013년 2월 : 부산대학교 전자
전기공학부 학사 졸업
2015년 2월 : 부산대학교 전자
전기컴퓨터공학과 석사 졸업
2015년 3월~현재 : 부산대학교
전기전자컴퓨터공학과 박사
과정

<관심분야> 레이더 신호처리, 배열 신호처리

[ORCID:0000-0002-1919-7048]

손 소 영 (So-Young Son)



2017년 2월 : 부산대학교 해양
학과, 전자공학과 학사 졸업
2019년 2월 : 부산대학교 전자
전기컴퓨터공학과 석사 졸업
2019년 2월~현재 : 국방기술품
질원 연구원

<관심분야> 레이더 신호처리,
소나 신호처리

[ORCID:0000-0001-7311-3952]

김 형 남 (Hyoung-Nam Kim)



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

전자컴퓨터공학부 박사 후 연구원

2000년 5월~2003년 2월 : 한국전자통신연구원 무선
방송연구소 선임 연구원

2003년 3월~2007년 2월 : 부산대학교 전자전기통신
공학부 조교수

2007년 3월~2012년 2월 : 부산대학교 전자전기통신
공학부 부교수

2009년 1월~2010년 1월 : Johns Hopkins Univ.
Visiting Scholar

2015년 9월~2016년 8월 : Univ. of Southampton
Visiting Professor

2012년~현재 : 부산대학교 전자공학과 교수

<관심분야> 적응신호처리, 레이더 및 소나 신호처
리, 디지털 방송 신호처리, 생체 신호처리

[ORCID:0000-0003-3841-448X]