

논문 2019-56-10-8

FM 라디오 신호를 활용한 수동형 레이더에서의 거리-도플러 맵 기반 도래각 추정 방법

(Range-Doppler-Map-based DOA Estimation Method
for Passive Bistatic Radar using FM-radio Signal)

박근호*, 서영광*, 김형남**

(Geun-Ho Park, YoungKwang Seo, and Hyoung-Nam Kim[©])

요약

최근 AM 라디오 방송을 활용하는 수동형 레이더 시스템을 위한 거리-도플러 도메인 기반 도래각 추정 방법이 제안되었다. 이 방법은 거리-도플러 주파수 축에서 신호원을 분리한 후 도래각을 추정하기 때문에 공간 해상도나 자유도에 제약을 받지 않는 특징을 가진다. 본 논문에서는 이러한 방법을 활용하여 FM 기반 수동형 레이더 시스템에 적합한 거리-도플러 도메인 기반 도래각 추정 방법을 제안하고, 도래각 추정 성능에 대한 모의실험을 통해 제시한 방법이 기존 AM 방송에 적용된 방법에 비해 더욱 효과적임을 입증한다.

Abstract

Recently, a range-Doppler domain based DOA estimation method has been proposed for the AM-radio-broadcasting passive radar system. Since the DOA estimation process is performed after the separation of target signals in the range-Doppler domain, this method is not limited to degree of freedom and spatial resolution. In this paper, by modifying the method we propose a range-Doppler domain based DOA estimation scheme suitable for passive radar systems using FM-radio signals. Through the computer simulations for the analysis of DOA estimation performance, we verify that the proposed method is more effective on the FM-based passive radar systems than AM-based one.

Keywords: FM 라디오, 도래각 추정, 거리-도플러 맵, 수동형 레이더, PCL

I. 서론

수동형 바이스테틱 레이더는 상용 방송 신호를 활용하여 고속으로 이동하는 표적을 탐지 및 추적하는 기술로서, 효과적인 표적 탐지 성능을 확보하기 위해 FM (frequency

modulation) 라디오 방송^[1~4], AM (amplitude modulation) 라디오 방송^[5], DTV (digital television)^[6~9] 방송 신호 등이 주요한 송신원으로서 활용되고 있다. 그 중에서도 FM 라디오 신호 기반 수동형 레이더는 약 300 km 이상의 탐지 거리를 확보할 수 있다는 특징을 가지고 있어 다양한 레이더 시스템 개발이 이루어졌다. 대표적인 FM 기반 수동형 레이더 시스템은 Silent Sentry^[10]와 Homeland Alerter 100 (HA100)^[10], EADS-Cassidian 사의 레이더^[11] 등이 있다.

이러한 FM 라디오 신호 기반의 수동형 레이더 시스템은 각각 다른 송신점에 배치된 다수의 송신기로부터 방사되는 FM 라디오 채널 신호를 단일 수신기로부터 획득한 후 표적의 위치를 추정하는 멀티스테틱 구조에 기반한다^[10]. 예를 들어 부산 황령산 송신소의 92.7 MHz, 울산 무룡산 송신소의 98.7 MHz, 창원 불모산 송신소의

* 학생회원, 부산대학교 전자전기컴퓨터공학과
(Department of Electrical and Computer Engineering,
Pusan National University)

** 평생회원, 부산대학교 전자공학과
(Department of Electronics Engineering, Pusan National
University)

© Corresponding Author (E-mail: hnkim@pusan.ac.kr)

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

Received ; July 2, 2019 Revised ; August 20, 2019

Accepted ; September 17, 2019

98.1 MHz 신호를 하나의 수신점에서 동시에 활용하는 것을 고려할 수 있다. 최소 세 개 이상의 송신소로부터 송신된 신호가 표적으로부터 반사되어 수신기에 측정되면 표적의 위치 추정이 가능해진다.

하지만 수신점의 위치에 따라 표적 신호가 수신되지 않을 수 있으며 이에 따라 표적의 위치 추정이 불가능하거나 표적의 위치 추정 결과에 모호성이 발생할 수 있다. 세 개 이상의 FM 송신소에 대한 표적 신호가 모두 수신되는 고지대의 수신점을 확보하는 것이 이러한 문제의 해결 방법이 될 수 있으나, 레이더 시스템을 운용하는 작전 환경과 레이더 운용 지역에 따라 이러한 방법은 구현이 어려워질 수 있다.

이와 같은 문제를 해결하는 방법 중 하나로써 위상 배열 안테나 구조를 기반으로 표적 신호의 도래각을 추정하여 위치 추정을 수행하는 방법을 고려할 수 있다. 수신기에서 표적 반사 신호의 입사각 추정이 가능하다면 멀티스테틱 구조가 아닌 바이스테틱 구조에서도 표적의 위치 추정에 모호성이 발생하지 않게 된다.

표적 신호의 도래각을 추정하는 방법은 위상 배열 안테나에서 널리 활용되어온 빔 형성 기법 기반의 Bartlett과 Capon, 부공간 기반의 MUSIC (multiple signals classification), MUSIC 알고리즘의 변형된 기법^[12]들을 활용해볼 수 있다. 하지만 표적 신호의 SNR은 -10 dB 이하로 매우 낮게 수신되므로 수 개의 안테나로 구성된 위상 배열 안테나를 이용하는 경우에는 기존의 도래각 추정 기법의 성능이 만족할 수준을 달성하지 못하는 문제가 있다.

또한 기존의 도래각 추정기의 추정 성능을 확보하기 위해서는 각 안테나에 클러터 제거 알고리즘을 적용하여 표적 신호를 제외한 신호 성분을 제거하는 시스템이 필요하다. 각 안테나에 클러터 제거 알고리즘을 적용하는 것은 감시 채널의 빔 형성 출력에 클러터 제거 알고리즘을 적용하는 기존의 시스템과는 별도로 구현해야 하므로, 도래각 추정 시스템 구현을 위해 시스템의 복잡도가 크게 증가하는 문제가 발생한다.

이러한 문제를 개선하기 위해 최근 AM 방송 신호 기반의 수동형 레이더 시스템에서 거리-도플러 도메인에서의 배열 신호처리 (range-Doppler domain array signal processing, RD-ASP)를 활용하는 도래각 추정 기법이 제안되었다^[5]. 이 방법은 거리-도플러 주파수 맵에서 표적 신호의 거리와 도플러 주파수를 추정한 후 표적 신호의 각도 정보를 포함하고 있는 조향 벡터로부터 도래각을 추정하는 방법으로서, 각 안테나와 기존

신호의 CAF (cross-ambiguity function)*를 유도하여 처리이득을 높이기 때문에 추정 성능이 기존의 도래각 추정 방법에 비해 우수한 특징을 가진다. 또한 MUSIC과 같은 초분해능 도래각 추정 기법은 M 개의 안테나를 가지는 위상 배열 안테나에서 $M-1$ 의 자유도 (degree of freedom)를 가지므로 $M-1$ 개의 도래각을 추정할 수 있는 것에 비해 RD-ASP 기반의 도래각 추정 방법은 다른 신호원에 대해 decorrelation을 수행하므로 도래각 추정이 가능한 신호원의 수가 안테나 개수에 영향을 받지 않는 큰 장점이 존재한다. 더욱이 RD-ASP 기반 신호처리 방식은 빔 형성기와 CAF로 이어지는 기존 시스템의 블록 순서를 바꾸어 CAF 연산 후에 배열 신호처리를 수행하기 때문에, 시스템의 복잡도를 크게 높이지 않고도 빔 형성과 도래각 추정이 가능한 이점이 있다.

본 논문에서는 FM 신호 기반의 수동형 레이더에 적합한 RD-ASP 기반 도래각 추정 방법을 고려한다. 참고문헌 [5]에서 제시한 시스템에서는 AM 방송 신호의 매우 낮은 거리 해상도 문제에서도 강건하게 도래각 추정기가 동작하도록 거리 축에 대한 모든 조향 벡터를 활용하는 다중-스냅샷 기반 RD-ASP 도래각 추정 방법을 제안하였다. FM 라디오 방송에서도 메시지 신호에 따라 거리 해상도가 매우 낮아질 수 있지만, 대부분의 방송 콘텐츠에서는 AM에 비해 거리 해상도가 높으므로 다중-스냅샷을 활용하는 방법은 FM 신호에는 적합하지 않다.

따라서 본 논문에서는 다중-스냅샷 기반 RD-ASP 보다는 단일-스냅샷 기반의 도래각 추정 방법에 기반한 도래각 추정기를 제안한다. 단일-스냅샷 기반의 도래각 추정을 수행하기 위해서는 정확한 거리 및 도플러 주파수 추정과 표적 탐지가 우선적으로 수행되어야 하며, 이를 위한 RD-ASP 빔형성 기반 표적 탐지 시스템 구조를 제시한다. 모의실험을 통해 FM 기반 수동형 레이더 시스템에서 RD-ASP 기반의 도래각 추정 성능이 기존의 도래각 추정 방법에 비해 우수함을 보이고, 다중-스냅샷 기반의 도래각 추정기와 단일-스냅샷 기반 도래각 추정기의 성능을 비교함으로써 본 논문에서 제시하는 시스템이 FM 신호에 적합하다는 것을 보인다.

II 장에서는 기존의 수동형 레이더 시스템을 제시하고, III 장에서는 RD-ASP 기반의 도래각 추정 방법의 기본적인 개념과 본 논문에서 제안하는 RD-ASP 기반의 처리 구조를 제안한다. IV 장에서는 제안한 시스템

* 거리-도플러 맵과 CAF는 동일한 개념으로 본 논문에서는 두 용어를 혼용하여 사용하였다.

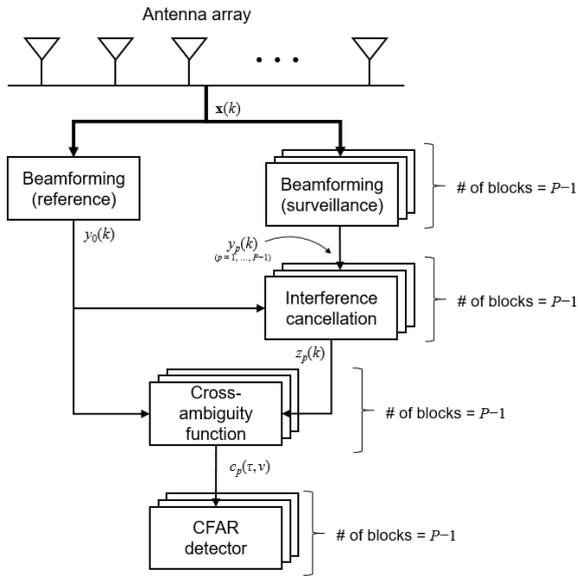


그림 1. FM 방송 기반 수동형 레이더 시스템.
Fig. 1. Passive radar system exploiting FM broadcasting.

의 표적 탐지와 거리 및 도플러 주파수 추정 결과, 표적 신호의 도래각 추정 성능을 모의실험으로 제시하며 V 장에서는 결론으로 마무리를 맺는다.

II. 기존 수동형 레이더 시스템 구조

그림 1은 수동형 레이더 시스템 구조를 블록 다이어그램으로 나타낸 것으로서 위상 배열 안테나를 통한 신호 수신부와 빔 형성, 간섭신호 제거, CAF, CFAR 검출기로 구성된다^[1]. 그림 1에서 감시 채널의 빔 형성기, 간섭신호 제거 알고리즘, CAF와 CFAR 검출기는 감시 채널에 대한 빔 수에 비례하여 연산을 수행하므로 그림 1에서는 이와 같은 특징을 나타내었다. 총 P 개의 빔 형성 채널은 한 개의 기준 채널과 $P-1$ 개의 감시 채널로 구성하였다.

1. 수신 신호 모델

M 개의 안테나로 구성된 균일 원형배열에 수신되는 기저대역 FM 변조 신호는 다음 식과 같이 모델링할 수 있다.

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(k) &= [x_0(k), \dots, x_{M-1}(k)]^T \\ &= \sum_{n=1}^N \eta_n \mathbf{a}(\phi_n, \theta_n) s(k - \tau_n) e^{j2\pi\nu_n k / f_s} \\ &\quad + \eta_0 \mathbf{a}(\phi_0, \theta_0) s(k) + \mathbf{v}(k), \quad k = 0, \dots, K-1. \end{aligned} \quad (1)$$

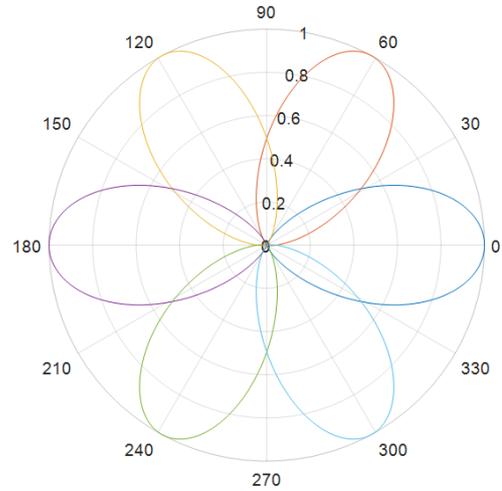


그림 2. 균일 원형 배열 안테나의 빔 패턴
Fig. 2. Beampattern of uniform circular array.

위 식에서 N 은 표적 신호의 개수, K 는 CPI (coherent processing interval)에 해당하는 신호 수집 샘플 수, η_n 은 표적 신호의 복소 진폭, θ_n 과 ϕ_n 은 각각 표적의 고도각과 방위각을 나타내며 τ_n 과 ν_n 은 표적 신호의 시간 지연과 도플러 주파수, f_s 는 샘플링 주파수, $s(k)$ 는 FM 변조 신호, $\mathbf{a}(\phi_n, \theta_n)$ 은 균일 원형배열안테나에서의 조향 벡터, $\mathbf{v}(k)$ 는 백색 가우시안 잡음 프로세스를 의미하며 $E[\mathbf{v}(k)\mathbf{v}^H(k)] = \sigma_v^2 \mathbf{I}_M$ 이 성립한다고 가정하였다. 그리고 0의 아래첨자를 가지는 파라미터는 송신기와 수신기의 직선경로로 전파되는 기준 신호를 의미한다.

2. 빔 형성기

빔 형성기는 위상배열안테나를 이용하여 배열 이득을 확보하기 위한 방법으로서, 공간 필터를 형성함으로써 표적 신호의 SNR을 증가시켜 CFAR 검출기에서 표적 신호의 탐지 확률을 높여 줄 수 있다. 위상 배열 안테나에서의 수신 신호를 $\mathbf{x}(k)$ ($k = 0, 1, \dots, K-1$)이라 하면 빔 가중치 \mathbf{w} 에 대한 빔 형성기의 출력은 $y(k) = \mathbf{w}^H \mathbf{x}(k)$ 로 나타낼 수 있다. 일반적으로 수동형 레이더 시스템에서는 빔 합성을 통해 사이드로브 크기를 낮추는 것이 일반적이다^[13].

수동형 레이더는 송신기로부터 수신기의 직선 경로로 수신되는 기준 신호와 표적으로부터 반사된 표적 신호를 각각 획득한다. 이를 위해서는 빔 형성 단계에서 HPBW (half-power beam width) 간격으로 다수의 빔을 배치 한 후 송신기 방향으로 지향하는 빔을 기준 채널 (reference channel), 나머지 빔을 감시 채널 (surveillance channel)

로 운용한다. 총 P 개의 빔 형성기를 운용한다고 하면 각 빔 출력은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$y_p(k) = \mathbf{w}_p^H \mathbf{x}(k), \quad p = 0, 1, \dots, P-1. \quad (2)$$

그림 2는 다중 빔의 빔 패턴을 나타낸 것으로서, 8 개의 등방성 안테나를 1.5 m 반경의 원에 균일한 간격으로 배치한 균일 원형배열 안테나를 사용하였고 주파수는 96.9 MHz를 기준으로 하였다. 그리고, Phase-mode excitation 방식을 기반으로 Chebychev 가중치를 적용하여 빔 패턴을 계산하였고 각 빔은 60° 의 방위각 간격으로 배치하였다. 송신기 방향에 대한 빔 형성기를 기준 채널, 나머지 $P-1$ 개의 빔을 감시 채널로 할당할 수 있으며, 본 논문에서는 그림 2에 도시한 빔 패턴에 대한 빔 가중치를 활용하여 빔 형성을 수행하였다.

3. 간섭신호 제거 알고리즘

간섭신호 제거 알고리즘은 감시 채널에 수신되는 기준 신호와 클러터를 제거하기 위한 것으로서 기준 채널 신호를 이용하여 감시 채널의 간섭신호 성분을 제거한다. 수동형 레이더에서는 LMS (least mean square), NLMS (normalized LMS), RLS (recursive least squares) 등의 적응 필터 알고리즘^[1]이나 ECA (extensive cancellation algorithm)^[14]와 ECA를 변형한 ECA-B (batch)^[14], ECA-S (sliding)^[15], SCA (sequential cancellation algorithm)^[16~17] 등 다양한 알고리즘이 제안되었다. 간섭신호 제거 알고리즘은 본 논문에서 다루는 내용의 범위에서 벗어나므로 구체적인 내용은 참고문헌으로 대체한다. 위의 간섭신호 제거 알고리즘은 그림 1의 블록 다이어그램에서 나타낸 것과 같이 기준 채널을 제외한 $P-1$ 개의 감시 채널에 모두 각각 적용되어 표적 신호를 추출한다. 간섭신호 제거 알고리즘의 출력 $z_p(k)$ ($p = 1, \dots, P-1$)는 CAF의 입력으로 활용된다.

4. Cross-ambiguity function (CAF)

CAF는 표적을 탐지하고 기준 신호와 표적 신호 사이의 시간 지연과 도플러 주파수를 추정하기 위한 것으로서, CAF를 다음 식으로부터 유도할 수 있다.

$$c_p(\tau, \nu) = \sum_{k=0}^{K-1} z_p(k) y_0^*(k-\tau) e^{-j2\pi\nu k/f_s} \quad (3)$$

$$(p = 1, \dots, P-1).$$

위 식에서 $y_0(k)$ 는 기준 채널 출력을 나타내며, τ 와 ν 는 각각 시간 지연과 도플러 주파수, f_s 는 샘플링율을

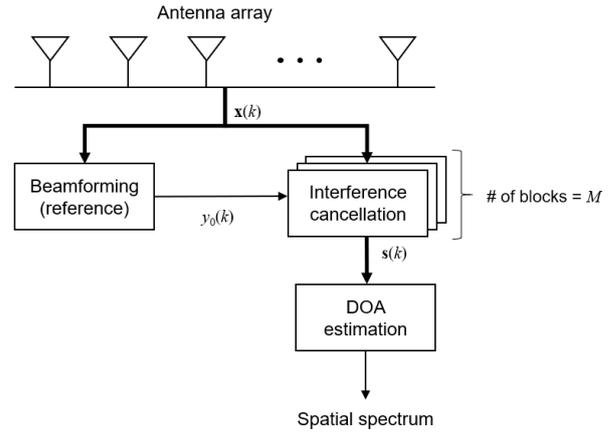


그림 3. 간섭 신호 제거 알고리즘을 포함하는 안테나 어레이 기반의 도래각 추정 방법

Fig. 3. Antenna array based DOA estimation method including interference cancellation algorithm.

의미한다. CFAR 검출기를 적용하면 다중 표적에 대한 탐지를 수행할 수 있다.

5. Constant false alarm (CFAR) 검출기

CFAR 검출기는 CAF의 square law detector로부터 다중 표적을 탐지하여 표적 거리 및 도플러 주파수를 추정하는 방법으로서, 오탐지 확률을 일정하게 고정하여 임계값을 도출한 후 임계값과 테스트 셀의 크기를 비교하여 표적의 유무를 결정한다. 임계값 도출에는 잡음 분산 추정이 요구되므로 테스트 셀을 제외한 나머지 일부의 셀을 윈도우 셀로 설정하고 윈도우 셀에 표적에 대한 CAF 값이 포함되지 않도록 적절히 가드셀을 설정한다. FM 라디오를 활용한 수동형 레이더 시스템의 CFAR 검출기 설정은 참고문헌 [18~19]에서 확인할 수 있다.

6. 도래각 추정 알고리즘 - Bartlett

그림 3은 표적 신호의 도래각 추정 시스템을 나타낸 것으로서, 수동형 레이더는 M 개의 안테나 수신 신호에 간섭신호 제거 알고리즘을 적용한 후 도래각 추정 알고리즘을 적용하는 것이 일반적이다. 도래각 추정 알고리즘으로는 Bartlett, Capon, MUSIC 알고리즘 등을 적용할 수 있지만, 다중 표적 신호에 대한 decorrelation을 통해 단일 표적이 존재하는 상황으로 가정할 수 있기 때문에 모든 도래각 추정 알고리즘의 성능이 최대 우도 도래각 추정 성능과 CRLB (Cramer-Rao lower bound)에 점근적으로 근사한다. 따라서, 본 논문에서는 가장 구현이 간단한 Bartlett 기법을 적용하여 성능을

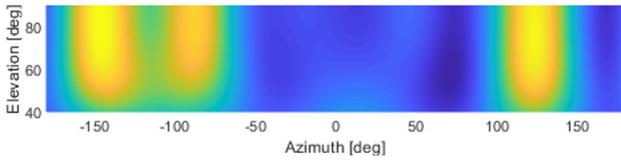


그림 4. Bartlett 도래각 추정 알고리즘의 공간 스펙트럼
Fig. 4. Spatial spectrum of Bartlett DOA estimation algorithm.

분석하기로 한다.

Bartlett 도래각 추정기는 delay-and-sum 빔 형성기의 빔 가중치를 이용하여 공간 스펙트럼을 유도하는 방법으로서, Bartlett 도래각 추정기의 공간 스펙트럼 $Q_B(\phi, \theta)$ 는 방위각 ϕ 와 고도각 θ 에 대해 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_B(\phi, \theta) = \mathbf{a}^H(\phi, \theta) \mathbf{R}_s \mathbf{a}(\phi, \theta). \quad (4)$$

위 식에서 \mathbf{R}_s 는 각 안테나의 간섭신호 제거 출력 신호에 대한 공분산 행렬을 의미하며, 이는 다음 식으로 구할 수 있다.

$$\mathbf{R}_s = E[\mathbf{s}(k)\mathbf{s}^H(k)] \approx \frac{1}{K} \sum_{k=0}^{K-1} \mathbf{s}(k)\mathbf{s}^H(k). \quad (5)$$

단일 표적에 대해서는 공간 스펙트럼의 최대값을 나타내는 각도를 방위각과 고도각으로 추정하며 다중 표적에 대해서는 peak detection을 통해 각도를 추정한다. 그림 4는 Bartlett 알고리즘의 공간 스펙트럼을 각각 나타낸 것으로서, 세 개 표적의 방위각과 고도각을 각각 $(-90^\circ, 85^\circ)$, $(122^\circ, 87^\circ)$, $(-141.3^\circ, 84^\circ)$ 로 설정하였으며, 다른 모의실험 파라미터는 IV 장에서 제시한다.

III. RD-ASP 기반 표적 탐지 및 도래각 추정 시스템 구조

II장 6 절에서 설명한 바와 같이 도래각 추정을 위해서는 간섭신호 제거 알고리즘을 각 안테나의 수신 신호에 적용해야 한다. 이와 같은 방법은 다중 빔의 출력에 간섭신호 제거 알고리즘을 적용하는 기존의 수동형 레이더 시스템과 별개로 운용되기 때문에 시스템의 복잡도가 매우 커지는 문제를 야기한다. 구체적으로, $P-1$ 개의 빔 형성과 M 개의 안테나 수신 신호에 모두 간섭신호 제거 알고리즘을 적용해야 하므로 총 $M+P-1$ 번의 간섭신호 제거 알고리즘이 수행된다. 본 장에서는 표적 탐지와 거리 및 도플러 추정, 도래각 추정을

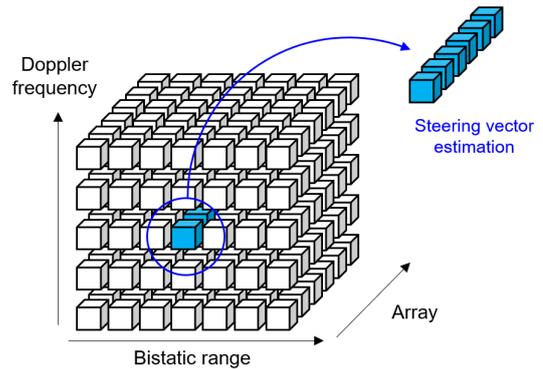


그림 5. 거리-도플러-어레이 데이터 큐브
Fig. 5. Range-Doppler-Array data cube.

모두 수행할 수 있는 수동형 레이더 시스템을 구현하고 이 시스템의 복잡도를 낮추기 위해 RD-ASP 기반 빔 형성과 도래각 추정 방법을 도입하였다.

1. RD-ASP 기반 빔 형성

각 안테나의 출력 신호에 간섭신호 제거 알고리즘을 적용한 후 CAF를 유도하면 그림 5와 같이 3 차원 형태의 데이터 구조를 만들 수 있다. RD-ASP 기반 신호처리 방법은 이 데이터 구조를 활용하는 것으로서, array 축에 대한 벡터는 공간 도메인에 해당하는 벡터가 된다. 특정 거리 및 도플러 주파수에 대한 array 축의 벡터는 가상의 배열 신호처럼 다룰 수 있으므로 virtual array signal이나 조향 벡터 추정치라는 이름으로 정의된다.

기본적인 빔 형성 기법은 배열 신호에 빔 가중치 벡터를 내적하여 빔 출력 신호를 획득하지만, 그림 5의 데이터 구조를 활용하는 RD-ASP 기반 빔 형성 기법은 모든 거리 및 도플러 주파수에 대해 array 축으로 빔 형성을 수행한다. 각 안테나 출력 신호에 대한 CAF는 식 (3)과 유사하게 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$c_m(\tau, \nu) = \sum_{k=0}^{K-1} s_m(k) y_0^*(k-\tau) e^{-j2\pi\nu k/f_s} \quad (8)$$

$$(m = 0, \dots, M-1).$$

여기에서 $s_m(k)$ 는 m 번째 안테나에서 수신된 신호에 간섭신호 제거 알고리즘을 적용한 결과이다. RD-ASP 기반 빔 형성은 식 (8)의 CAF $c_m(\tau, \nu)$ 에 바로 빔 형성을 적용하는 것으로서, 식 (3)에서 안테나의 수신 신호에 빔 형성을 적용하는 것과 차이가 있다. $\mathbf{c}(\tau, \nu) = [c_0(\tau, \nu), c_1(\tau, \nu), \dots, c_{M-1}(\tau, \nu)]^T$ 로 정의할 때, RD-ASP 기반 빔 형성은 다음 식으로 유도할 수 있다.

$$B_p(\tau, \nu) = \mathbf{w}_p^H \mathbf{c}(\tau, \nu), \quad p = 1, 2, \dots, P-1. \quad (9)$$

식 (9)의 빔 형성 결과는 위상 배열 안테나의 수신 신호에 빔 형성을 수행한 후 CAF를 유도한 결과와 동일한 과정이 되므로, CFAR 검출기를 식 (9)의 빔 형성 결과에 바로 적용할 수 있다.

2. RD-ASP 기반 도래각 추정

(1) 단일-스냅샷 기반 도래각 추정 방법

RD-ASP 기반 도래각 추정은 CAF에서 표적 신호의 바이스테틱 거리 및 도플러 주파수를 나타내는 위치에서 입사각에 대한 위상 성분을 추정할 수 있다는 특징을 활용한다. n 번째 표적의 시간 지연 및 도플러 주파수가 각각 τ_n 과 ν_n 이라고 하면 다음 식이 성립한다.

$$\mathbf{c}(\tau_n, \nu_n) \approx \eta_n \mathbf{a}(\phi_n, \theta_n) + \epsilon. \quad (10)$$

이 때 ϵ 은 조향 벡터 추정 시의 오차를 의미한다. 위의 식은 표적의 시간 지연 및 도플러 주파수에 해당하는 array 축 벡터로부터 조향 벡터를 추정할 수 있다는 것을 의미한다.

단일-스냅샷 기반 도래각 추정 방법은 하나의 거리 및 도플러 주파수 값에 대한 조향 벡터 추정 결과를 이용하여 공간 스펙트럼을 유도하는 것으로서, 단일-스냅샷 기반 도래각 추정 방법의 공간 공분산 행렬은 다음 식과 같이 구할 수 있다.

$$\hat{\mathbf{R}}_s = \mathbf{c}(\tau_n, \nu_n) \mathbf{c}^H(\tau_n, \nu_n). \quad (11)$$

식 (11)의 공분산 행렬은 Bartlett 기반 공간 스펙트럼을 유도하는 데에 활용되며, 이는 다음과 같다.

$$E_s(\phi, \theta) = \mathbf{a}^H(\phi, \theta) \hat{\mathbf{R}}_s \mathbf{a}(\phi, \theta). \quad (12)$$

RD-ASP 기반 도래각 추정 알고리즘에는 공간 스펙트럼의 유도 과정에서 Bartlett 이외에도 Capon, MUSIC 알고리즘을 적용할 수 있으나, 조향 벡터의 추정 과정에서 다른 표적 신호에 대한 decorrelation이 수행되므로 단일 표적이 존재하는 상황으로 가정할 수 있다. 이 경우에는 모든 도래각 추정 알고리즘의 성능이 최대 우도 도래각 추정 성능과 CRLB (Cramer-Rao lower bound) 에 접근적으로 근사하므로, 본 논문에서는 RD-ASP 기반의 Bartlett 알고리즘만을 다루었다.

(2) 다중-스냅샷 기반 도래각 추정 방법

다중-스냅샷 기반 도래각 추정 방법은 다수의 조향 벡터 추정치를 동시에 활용하여 공간 스펙트럼을 도출하는 것으로서, CAF에서 표적 신호에 의해 발생하는

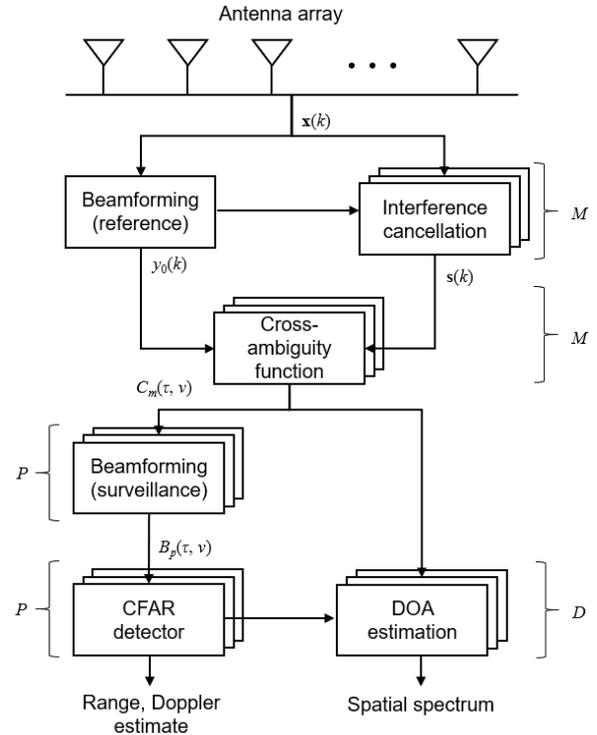


그림 6. 바이스테틱 거리 및 도플러 주파수, 도래각 추정을 위한 RD-ASP 기반의 수동형 레이더 시스템
Fig. 6. RD-ASP based passive radar system for estimation of bistatic range, Doppler frequency, and target direction.

극댓값의 조향 벡터 추정치를 다수 활용하여 공간 공분산 행렬을 추정한다. 다중-스냅샷 기반 도래각 추정에 활용되는 공간 공분산 행렬 $\hat{\mathbf{R}}_m$ 은 다음 식으로 유도할 수 있다.

$$\hat{\mathbf{R}}_m = \frac{1}{L} \sum_{n=0}^{L-1} \mathbf{c}(\tau_n, \nu) \mathbf{c}^H(\tau_n, \nu). \quad (13)$$

위 식은 일정한 도플러 주파수 ν 에 대한 다수의 조향 벡터를 바이스테틱 거리 축으로 추출한 후 공간 공분산 행렬을 구한 것으로, FM 라디오 신호는 메시지 신호가 묵음일 때 위 방법을 통해 조향벡터를 추정할 수 있을 것으로 판단된다^[5]. 식 (13)을 이용한 Bartlett 공간 스펙트럼은 $E_m(\phi, \theta) = \mathbf{a}^H(\phi, \theta) \hat{\mathbf{R}}_m \mathbf{a}(\phi, \theta)$ 로 유도할 수 있고, 각 공간 스펙트럼의 최대값의 위치로부터 방위각과 고도각을 추정할 수 있다.

3. 제안하는 시스템 구조

본 논문에서 제안하는 시스템 구조는 그림 6에서 나타낸 것과 같이 총 6 단계로 구성되어 있다.

- 송신기 방향의 빔 형성을 통해 기준 신호 획득
- 각 안테나 수신신호에 간섭신호 제거
- 기준 신호와 간섭신호 제거기 출력의 CAF 유도
- 각 안테나에 대한 CAF로부터 빔 형성(감시 채널)
- 감시 채널에 대한 CFAR 검출 및 거리/도플러 주파수 추정
- 거리/도플러 주파수 추정 결과와 각 안테나에 대한 CAF를 이용하여 공간 스펙트럼 유도 및 도래각 추정

표 1. 모의실험 파라미터

Table1. Simulation parameters.

Antenna array	Placement	Uniform circular array
	# of antennas	8
Radius	1.5 [m]	
FM transmitter	Carrier frequency	96.9 [MHz]
	Location	(8,0,0) km
Receiver	Location	(0,0,0) km
	Observation time	1 [sec]
	Sampling rate	198.45 [kHz]
Target	# of targets	3
	Speed	340 [m/s]
	Direction	180°, -140°, 225°
	Location (x,y,z)	(0,-100,9), (-50,80,5), (-50,-40,7) [km]
	Angle (azimuth, elevation)	(90°,85°), (122°,87°), (-141°,84°)
	Bistatic range	193, 185.4, 127.2 [km]
	Doppler frequency	-8.7, 23, -216 [Hz]
SNR	-10 [dB]	
Beamforming	# of beams (P)	6
	HPBW (azimuth)	60°
	Spectral weighting	Chebyshev, SLL = -32 [dB]
CFAR detector	False alarm rate	10^{-12}

간섭 신호를 제거한 각 안테나의 수신 신호는 기준 신호와 CAF 연산에 입력되며, 각 안테나에 대한 CAF로부터 RD-ASP 기반의 빔 형성과 도래각 추정을 수행한다. 빔 형성 적용 후에는 CFAR 검출기를 이용하여 표적의 바이스택 거리와 도플러 주파수, 표적의 개수를 추정하며 이 추정값을 도래각 추정 시스템에 활용하여 공간 스펙트럼을 유도한다. 표적의 개수가 D 개이므로, D 개의 공간 스펙트럼을 유도한 후 각각의 공간 스펙트럼에서 최대값을 나타내는 위치에서 표적의 도래각을 추정할 수 있다.

본 논문에서는 RD-ASP 기반의 도래각 추정 기법에

다중-스냅샷 기반 도래각 추정 방법이 아닌 단일-스냅샷 기반 도래각 추정 방법을 선택하였다. FM 라디오 신호에 대한 CAF는 메시지 신호에 따라 거리 해상도가 낮아지는 경우가 발생할 수 있어 다수의 조향 벡터 추정값을 얻어낼 수 있지만 이러한 경우에도 도래각 추정 오차가 단일-스냅샷 기반의 도래각 추정 방법과 거의 유사한 RMSE를 나타내거나 FM 라디오 신호의 해상도가 높아질 경우에는 다중-스냅샷 기반의 도래각 추정기의 성능이 열화되는 것을 모의실험에서 증명한다.

IV. 모의 실험

본 장에서는 III 장에서 제안한 도래각 추정 방법의 과정을 모의실험의 결과로서 제시하고, 기존의 도래각 추정 알고리즘과 RD-ASP 기반의 도래각 추정 알고리즘의 추정 오차를 RMSE를 통해 분석한다. 또한, 단일-스냅샷과 다중-스냅샷 RD-ASP 기반 도래각 추정 알고리즘의 성능을 모의실험으로 비교한다. 레이더 시스템의 성능 분석을 위한 모의실험 파라미터는 표 1에 정리하였고, 수신기와 FM 라디오 송신소의 위치, 표적의 위치 및 속도는 그림 7에 나타내었다.

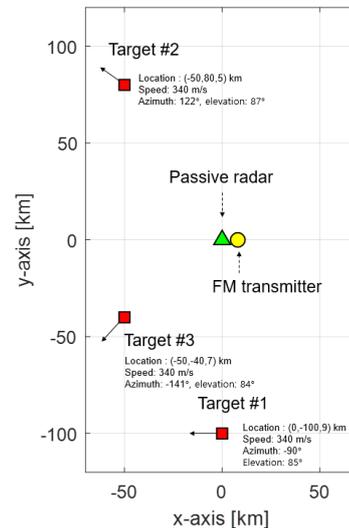


그림 7. 송신기, 수신기, 표적의 위치 및 속도

Fig. 7. Transmitter, receiver and target location/velocity.

그림 8은 $m = 0$ 의 안테나에 대한 수신 신호 $x_0(k)$ 를 이용하여 유도한 CAF를 나타낸 것으로서, 3 개의 표적 신호에 대한 극댓값을 확인할 수 있다. 모의실험에서는 간섭 신호는 존재하지 않는 것으로 가정하고 진행하였다. M 개의 안테나에 대한 수신 신호로부터 CAF를 유도하면 이를 이용하여 RD-ASP 기반 빔 형

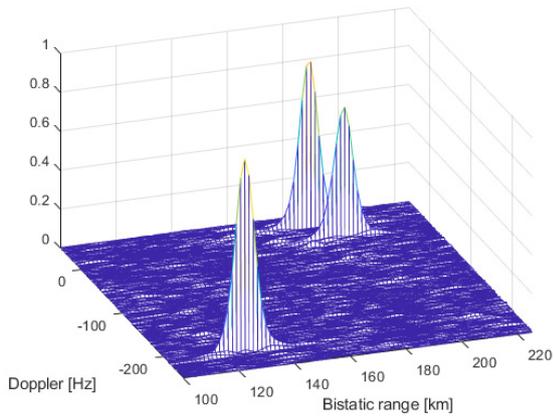


그림 8. CAF 유도 결과
Fig. 8. CAF derivation result.

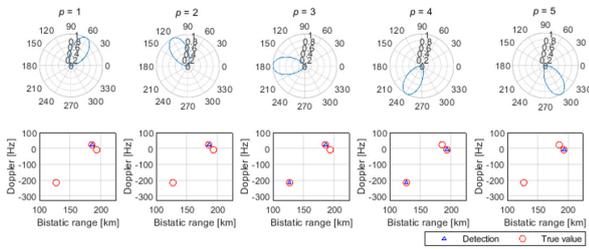


그림 9. RD-ASP 기반 빔 형성기를 이용한 감시 채널에서의 표적 탐지 결과
Fig. 9. Target detection results of surveillance channels using RD-ASP based beamformer.

성 및 도래각 추정을 수행할 수 있다.

그림 9는 RD-ASP 기반 빔 형성 수행 후의 CFAR 검출 결과와 바이스테틱 거리 및 도플러 주파수 추정 결과를 나타낸 것으로서, 방위각 0도를 지향하는 기준 채널을 제외한 나머지 5 개의 감시 채널에 대한 표적 검출 결과를 도출하였다. 그림 9에서 확인할 수 있듯이, 표적의 방위각이 각각 다르기 때문에 감시 채널의 지향각에 따라 다른 표적이 검출되는 것을 확인할 수 있다. 각 표적의 검출 결과로부터 바이스테틱 거리 및 도플러 주파수를 획득할 수 있으며, RD-ASP 기반의 도래각 추정 알고리즘은 이 추정값을 도래각 추정에 활용한다.

그림 10은 RD-ASP 기반 도래각 추정기의 공간 스펙트럼을 나타낸 것으로서, 세 개의 표적에 대한 공간 스펙트럼을 각각 도시하였다. 그림 4의 기존 도래각 추정 방법과 달리 RD-ASP 기반 도래각 추정기의 공간 스펙트럼은 다른 신호원에 의한 왜곡 요소가 없는 장점이 있으며 이를 그림 10으로부터 확인할 수 있다.

그림 11은 RD-ASP 기반의 도래각 추정 알고리즘 (단일-스냅샷)과 기존 Bartlett 기법의 RMSE를 표적 신호의 SNR에 따라 나타낸 것으로서, 표적 #1만 존재

한다고 가정하였다. 그리고 RMSE 결과는 100 번의 추정 결과를 앙상블 평균하여 나타내었다. IV 장에서 언급한 것과 마찬가지로 단일 표적 상황에서는 도래각 추정기의 성능이 최대 우도 추정기에 근사하므로 Capon과 MUSIC 알고리즘의 성능 분석은 생략하였다. 그림 11에서 확인할 수 있듯이, RD-ASP 기반의 도래각 추정 알고리즘의 도래각 추정 성능이 더 우수한 것을 확인할 수 있다. 특히 표적 신호가 -30 dB 정도의 매우 낮은 SNR을 가질 때, 방위각과 고도각의 RMSE 차이가

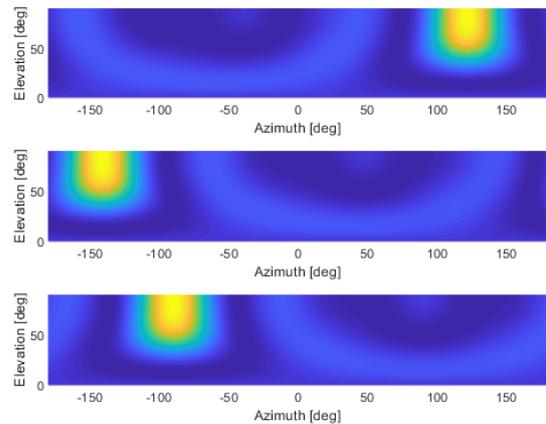


그림 10. RD-ASP 기반 도래각 추정기의 공간 스펙트럼
Fig. 10. Spatial spectrum of RD-ASP-based DOA estimator.

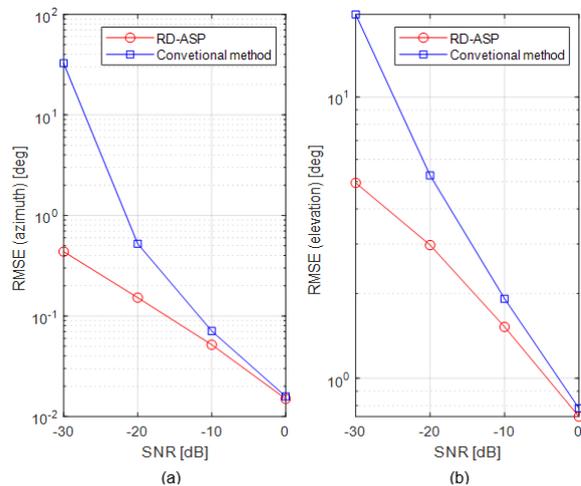


그림 11. RD-ASP와 기본적인 Bartlett 도래각 추정기의 RMSE 비교, (a) 방위각, (b) 고도각
Fig. 11. Comparison of RMSE between RD-ASP and conventional Bartlett DOA estimator.

크게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 기존 도래각 추정 기법과 RD-ASP 기법 공간 스펙트럼의 특징을 고려할 때, 다중 표적 상황에서는 더 큰 성능 차이가 발생할 것으로 예상된다.

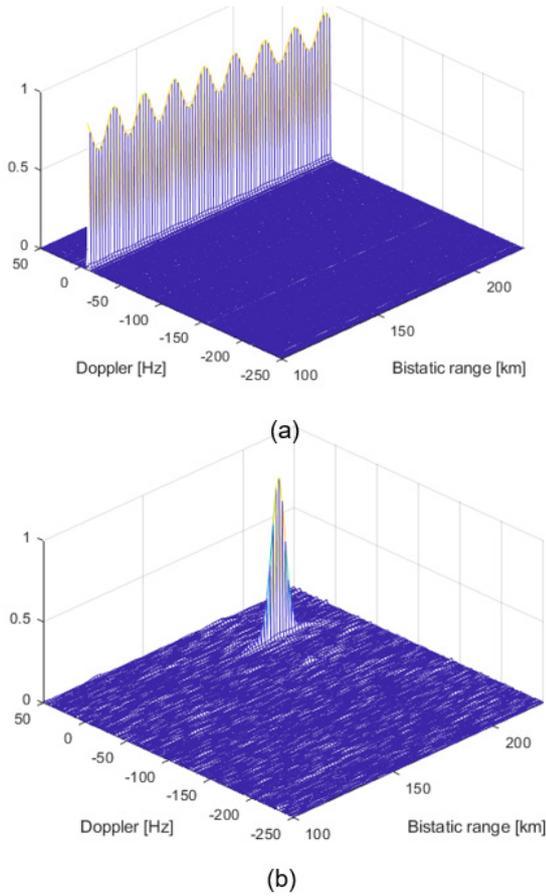


그림 12. CAF 유도 결과: (a) 스테레오 메시지가 묵음일 때의 CAF, (b) 음원일 때의 CAF
Fig. 12. CAF derivation result: (a) CAF when the stereo message signal is silent, (b) CAF when message signal is music.

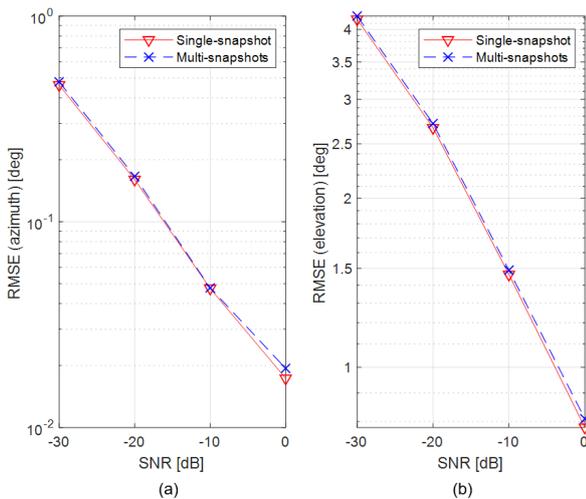


그림 13. 단일-스냅샷과 다중-스냅샷 기반 RD-ASP 도래각 추정기의 RMSE 비교 (묵음 스테레오 메시지), (a) 방위각, (b) 고도각
Fig. 13. Comparison of RMSE between single-snapshot and multi-snapshot-based RD-ASP DOA estimator (silent stereo message), (a) azimuth, (b) elevation.

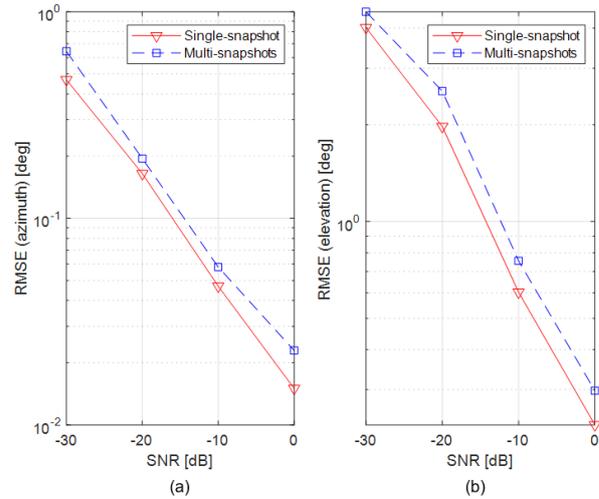


그림 14. 단일-스냅샷과 다중-스냅샷 기반 RD-ASP 도래각 추정기의 RMSE 비교 (음원), (a) 방위각, (b) 고도각
Fig. 14. Comparison of RMSE between single-snapshot and multi-snapshot-based RD-ASP DOA estimator (music), (a) azimuth, (b) elevation.

그림 12(a)는 라디오 방송의 메시지 신호가 묵음인 경우의 CAF를 나타낸 것으로서, 거리 해상도가 ∞ 인 것을 확인할 수 있다. 그림 13은 그림 12(a)의 CAF를 기반으로 단일-스냅샷과 다중-스냅샷 도래각 추정기의 성능을 RMSE로 나타낸 것으로서, 그림 12(a)의 CAF에서 다중-스냅샷 기반 도래각 추정기는 거리 축의 모든 조향 벡터를 이용하여 공간 공분산 행렬을 유도하였다 (300 개의 조향 벡터 평균을 사용). 그림 13에서 확인할 수 있듯이, 두 방법의 도래각 추정 성능은 큰 차이를 나타내지 않는 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 거리 축에 대한 다수의 조향 벡터로부터 추정 과정에서 조향 벡터 추정 오차가 크게 감소하지 않는 것에 기인하는 것으로 보인다.

그림 14는 그림 12(b)의 CAF에 대한 단일- 및 다중-스냅샷 기반 도래각 추정기의 성능을 나타낸 것으로서, FM 라디오 신호의 대역폭에 따라 다중-스냅샷 기반 도래각 추정기는 성능 열화가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이에 반해 단일-스냅샷 기반의 기법은 다중-스냅샷 방법에 비해 낮은 추정 오차를 가지는 것을 확인할 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 표적에 대한 도래각 추정이 가능한 FM 라디오 신호 기반의 수동형 레이더를 설계하는 동시에 도래각 추정기로 인해 발생하는 시스템의 복잡도

증가를 최소화하기 위해 RD-ASP 기반의 배열 신호 처리 방법을 도입하였다. 기존 수동형 레이더 시스템에서는 다수의 빔 출력에 간섭신호 제거 알고리즘을 각각 적용하여 표적 탐지를 수행하는 방법과 다수의 안테나에 간섭신호 제거 알고리즘을 각각 적용한 후 도래각 추정을 수행하는 시스템이 별개로 운용되어야 했지만, RD-ASP 기반의 처리 방법은 각 안테나에 대한 수신 신호로부터 간섭 신호 제거 알고리즘을 적용한 후 CAF를 유도하면 이 결과로부터 빔 형성과 도래각 추정 모두 수행할 수 있다는 이점을 가진다. 시스템의 복잡도 증가를 최소화한 것 외에도 RD-ASP 기반의 도래각 추정 방법은 기존의 도래각 추정 방법에 비해 도래각 추정 성능이 우수하다는 점을 모의실험을 통해 입증하였다. 또한, RD-ASP 기반의 도래각 추정 방법인 단일-스냅샷과 다중-스냅샷 기반 공분산 행렬 추정 방식의 성능 비교를 수행하였고, 이를 바탕으로 FM 신호 기반의 시스템에서는 단일-스냅샷 방법이 다중-스냅샷 방법에 비해 더욱 적합하다는 것을 보였다.

REFERENCES

- [1] Geun-Ho Park, Dong-Gyu Kim, Ho-Jae Kim, Jin-Oh Park, Won-Jin Lee, Jae Heon Ko, and Hyoung-Nam Kim, "Performance Analysis of Interference Cancellation algorithms for an FM Based PCL system," *The Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences*, vol. 42, no. 4, pp. 819-830, April, 2017.
- [2] Y. Fu, X. Wan, X. Zhung, G. Fang, and J. Yi, "Side Peak Interference Mitigation in FM-Based Passive Radar Via Detection Identification," *IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems*, vol. 53, no. 2, pp. 778-788, 2017.
- [3] B. Tuysuz, J. V. Urbina, and J. D. Mathews, "Effects of Equatorial Electrojet on FM-Based Passive Radar Systems," *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, vol. 55, no. 7, pp. 4082-4088, 2017.
- [4] Geun-Ho Park, Dong-Gyu Kim, Ho Jae Kim, and Hyoung-Nam Kim, "Maximum-likelihood angle estimator for multi-channel FM-radio-based passive coherent location," *IET Radar, Sonar & Navigation*, vol. 12, no. 6, pp. 617-625, 2018.
- [5] Y. Li, H. Ma, Y. Wu, L. Cheng, and D. Yu, "DOA Estimation for Echo Signals and Experimental Results in the AM Radio-Based Passive Radar," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 73316-73327, 2018.
- [6] Seung-Hwan Seol, Young-Jae Choi, and In-Sik Choi, "Target Recognition Method of DTV-Based Passive Radar Using Multi-Channel Combining Method," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 28, no. 10, pp. 794-801, Oct. 2017.
- [7] G. Bournaka, M. Ummenhofer, D. Cristallini, J. Palmer, and A. Summers, "Experimental Study for Transmitter Imperfections in DVB-T Based Passive Radar," *IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems*, vol. 54, no. 3, pp. 1341-1354, 2018.
- [8] 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 Electronic Systems*, vol. 51, no. 3, pp. 2460-2469, Jul. 2015.
- [9] H. Bolvardi, M. Derakhtia, and A. Sheiki, "Dynamic Clutter Suppression and Multitarget Detection in a DVB-T-Based Passive Radar," *IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems*, vol. 53, no. 4, pp. 1812-1825, 2017.
- [10] Nicholas J. Wills and Hugh D. Griffiths, *Advances in Bistatic Radar*, SciTech Inc, 2007.
- [11] M. Edrich, A. Schroeder, "Multiband Multistatic Passive Radar Systems for Airspace Surveillance: A Step towards Mature PCL Implementations," *Radar Conference*, 2013.
- [12] H. Krim, and M. Viberg, "Two decades of array signal processing research: the parametric approach," *IEEE Signal Processing Mag.*, vol. 13, no. 4, pp. 67-94, Jul. 1996.
- [13] F. Belfiori, S. Monni, W. V. Rossum, and P. Hoogeboom, "Side-Lobe Suppression Techniques for a Uniform Circular Array," *Proceedings of the 7th European Radar Conference*, pp. 113-116, Paris, France, Oct. 2010.
- [14] 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 Electronic Systems*, vol. 45, no. 2, pp. 698-722, Apr. 2009.
- [15] F. Colone, C. Palmarini, and T. Martelli, "Sliding Extensive Cancellation Algorithm for Disturbance Removal in Passive Radar," *IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems*, vol. 52, no. 3, pp. 698-722, Jun. 2016.
- [16] F. Colone, R. Cardinali, and P. Lombardo, "Cancellation of clutter and multipath in passive radar using a sequential approach," *2006 IEEE Conference on Radar*, pp. 24-27, Verona, USA, Apr. 2006.
- [17] F. Ansari, and M. R. Taban, "Implementation of

Sequential Algorithm in Batch Processing for Clutter and Direct Signal Cancellation in Passive Bistatic Radars,” 2013 21st Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE), pp. 14-16, Mashhad, Iran, May 2013.

- [18] Geun-Ho Park, So-Young Son, and Hyoung-Nam Kim, “Implementation of FM-broadcasting-based Passive Radar and Analysis of Target Detection Results,” The Journal of Korean Institute of

Communications and Information Sciences, vol. 44, no. 6, pp. 1201-1209, Jun. 2019.

- [19] So-Young Son, Geun-Ho Park, Junil Ahn, Kyu-Ha Song and Hyoung-Nam Kim, “A Bistatic Range Sidelobe Suppression Method for Improving Target Detection Performance in an FM-based PCL System,” The Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences, vol. 44, no. 6, pp. 1128-1139, Jun. 2019.

저 자 소 개



박 근 호(학생회원)
2013년 부산대학교 전자전기공학부 학사 졸업.
2015년 부산대학교 전자전기 컴퓨터공학과 석사 졸업.
2015년~현재 부산대학교 전자전기 컴퓨터공학과 박사과정.

<주관심분야: 배열 신호처리, 전자전 및 레이더 신호처리>



서 영 광(학생회원)
2013년 부산대학교 전자전기공학부 학사 졸업.
2014년 부산대학교 전자전기공학부 석사 졸업.
2019년 부산대학교 전기전자 컴퓨터공학과 박사 졸업.

2019년~현재 부산대학교 전기전자컴퓨터공학과 박사후 연구원.

<주관심분야: 소나 및 레이더 신호처리, 배열 신호처리, 압축 센싱>



김 형 남(평생회원)
1993년 포항공과대학교 전자전기 공학과 학사 졸업.
1995년 포항공과대학교 전자전기 공학과 석사 졸업.
2000년 포항공과대학교 전자전기 공학과 박사 졸업.

2000년 포항공과대학교 전자컴퓨터공학부 박사후 연구원.

2000년~2003년 한국전자통신연구원 무선방송 연구소 선임연구원.

2003년~2007년 부산대학교 전자전기통신공학부 조교수.

2007년~2012년 부산대학교 전자전기통신공학부 부교수.

2009년~2010년 Johns Hopkins Univ. Visiting Scholar.

2015년~2016년 Univ. of Southampton Visiting Professor

2012년~현재 부산대학교 전자공학과 교수.

<주관심분야: 적응신호처리, 레이더 및 소나 신호처리, 디지털 방송 신호처리, 생체 신호처리>