

실내 환경에서 멀티패스 효과 완화를 통한 고해상도 맵 생성 기법 연구

Study on a High-Resolution Map Generation Method by Mitigating Multipath Effects in Indoor Environments

이 정 민 · 김 경 태

Jeong-Min Lee · Kyung-Tae Kim

요 약

본 논문에서는 실내 환경에서 멀티패스 효과를 완화해 표적 정보를 정확히 파악하기 위한 새로운 기법을 제안한다. 우선, 수신 데이터에 2차원 고속 푸리에 변환을 적용해 거리-속도 맵을 생성한 다음, 지수 이동 평균을 통해 정적 멀티패스 효과를 완화한다. 이후, 여러 거리-속도 맵을 그룹화해 거리 축 분산값과 상관 계수를 기반으로 임계값을 설정하고, 이를 이용해 신호 처리할 거리-속도 맵을 그룹 내에서 선택한다. 이후, 선택된 거리-속도 맵들에 고유값 분해를 적용해 투영 행렬을 생성한 다음 이에 투영시켜 동적 멀티패스 효과도 완화한다. 다음으로, 동적 멀티패스 효과가 완화된 거리-속도 맵을 이용, Capon 기법으로 속도-각도 맵을 생성한 다음, 그룹 내에서 비동기적 합성을 하였다. 실측 실험을 통해 제안된 기법의 성능을 검증한 결과, 기존 기법에 비해 신호 대 잡음비가 최대 18.7 dB 향상됐고, 거리-속도 맵에서 탐지 성능이 향상됐고, 부엽이 최대 2.4 dB 감소했으며, 전체 프레임 처리 시간이 최대 12.47 % 줄어들었음을 확인했다.

Abstract

This study proposes a novel method for accurately identifying target information by mitigating multipath effects in indoor environments. First, range - velocity maps were generated by applying a 2D fast Fourier transform to received data. Then, the influence of stationary clutter was decreased using the exponential moving average. Next, multiple range - velocity maps were grouped, and thresholds were set based on the variance along the range axis of the range - velocity maps and correlation coefficients to select the range - velocity maps for signal processing. Then, eigenvalue decomposition was applied to the selected range - velocity maps to create projection matrices, and dynamic multipath effects were mitigated by projecting the previously selected range - velocity maps. Subsequently, velocity - angle maps were produced using the Capon method based on range - velocity maps with reduced dynamic multipath effects. Finally, noncoherent integration was applied within the group. The performance of the proposed method was verified through experimental measurements. The proposed method improved the signal-to-noise ratio by up to 18.7 dB, enhanced detection performance, reduced the sidelobe level by up to 2.4 dB, and decreased the total frame processing time by up to 12.47 %.

Key words: FMCW RADAR, Clutter Suppression, Multipath Mitigation, Target Detection, Eigenvalue Decomposition

포항공과대학교 전자전기공학과(Department of Electrical Engineering, Pohang University of Science and Technology)

· Manuscript received September 2, 2024 ; Revised September 16, 2024 ; Accepted October 19, 2024. (ID No. 20240902-088)

· Corresponding Author: Kyung-Tae Kim (e-mail: kkt@postech.ac.kr)

I. 서 론

FMCW(frequency modulated continuous wave) 레이더는 가격이 저렴하고, 가벼우며, 전력 소모가 적어 인원 계수 추정 시스템 및 비접촉 생체 신호 모니터링과 같은 다양한 분야에서 널리 사용된다. 특히, FMCW 레이더는 사생활 침해 우려가 없고, 시간의 변화에 영향을 받지 않아 실내 인간 위치 추적과 낙하 감지에도 사용되고 있다^{[1]~[4]}.

그러나, 실내에서 FMCW 레이더를 사용할 때 수신 데이터에는 표적의 정보뿐만 아니라 의자, 벽과 같은 정지 클러터와 멀티패스 신호도 포함된다. 이 멀티패스 신호는 정지 클러터에서 반사된 신호가 다른 정지 클러터를 거쳐 수신되는 정적 멀티패스 신호(static multipath signal)와 표적의 미세한 움직임에 의해 발생하는 동적 멀티패스 신호(dynamic multipath signal)로 나눌 수 있다. FMCW 레이더에 수신된 정지 클러터의 속도 성분은 0이고, 이로 인해 정지 클러터에 의해 발생한 정적 멀티패스 신호의 속도 성분도 0으로 볼 수 있다. 따라서 정지 클러터와 정적 멀티패스 신호는 지수 이동 평균(exponential moving average)으로 제거할 수 있다^[5]. 하지만 동적 멀티패스 신호는 호흡이나 떨림처럼 표적의 미세한 움직임에 의해 발생하고, 그에 따라 0이 아닌 도플러 주파수 편이와 속도 성분을 갖게 돼 지수 이동 평균으로는 제거할 수 없는 문제가 있다. 또한, 각 정지 클러터마다 레이더 반사 면적(RCS, radar cross section)이 다르고 전파의 반사, 회절, 굴절이라는 특성으로 인해 동적 멀티패스 신호의 세기와 방향은 프레임마다 무작위로 변화해 표적 탐지 정확도가 떨어지는 문제가 있다^[6].

동적 멀티패스 효과를 완화하기 위해서 지금까지 다양한 연구가 진행되었다^{[7]~[9]}. 그러나 기존 연구는 두 개 이상의 FMCW 레이더를 사용해 추가적인 공간 및 비용이 필요한 한계가 있다. 또한, 동적 멀티패스 신호와 실제 표적을 거리-속도 맵 상에서 일치시키기 위해선 FMCW 레이더를 사용하는 장소의 환경 정보를 사전에 알아야 하는 어려움이 따른다. 그리고, 동적 멀티패스 신호는 프레임마다 그 세기와 방향이 무작위로 변화하기 때문에 동적 멀티패스 신호와 표적 신호의 관계는 비선형적이라고 볼 수 있다. 따라서, 실내 환경에서 단일 FMCW 레이더를

이용해 동적 멀티패스 효과를 효과적으로 완화할 수 있는 새로운 방법이 필요하다.

본 논문은 하나의 FMCW 레이더로 배경 정보 없이 동적 멀티패스 효과를 완화하는 방법을 그림 1과 같이 제안한다. 우선, FMCW 레이더 수신 데이터를 2차원 고속 푸리에 변환해 거리-속도 맵을 생성하고, 지수 이동 평균을 이용해 정지 클러터와 정적 멀티패스 효과를 완화한다.

정지 클러터의 영향이 감소된 전체 거리-속도 맵을 여러 프레임 그룹으로 나눈 뒤, 각 그룹에서 거리 축 분산값이 가장 작은 거리-속도 맵을 기준으로 선택한다. 거리-속도 맵에서 동적 멀티패스 효과가 적게 발생할수록, 표적의 위치에 에너지가 집중돼 거리 축 분산값이 작아지기 때문이다. 이후, 기준 거리-속도 맵과 같은 그룹에 속한 다른 거리-속도 맵들 사이의 상관 계수를 계산하고, 분산값과 상관 계수를 기반으로 임계값을 설정해 동적 멀티패스 효과가 강하게 나타나는 거리-속도 맵을 제외함으로써 신호 처리 효율성을 높인다.

다음으로, 그룹 내 남아있는 거리-속도 맵에 고유값 분해를 적용해 투영 행렬을 생성한 후, 거리-속도 맵들을 투영 행렬에 투영시켜 동적 멀티패스 신호를 완화한다.

만약 여러 표적이 비슷한 거리에 있다면, Capon 기법^[10]을 통해 속도-각도 맵을 생성하면 다수 표적을 탐지할 수 있다. 마지막으로 그룹 내 거리-속도 맵과 속도-각도 맵에 비동기적 합성(non-coherent Integration)을 적용했다^[11]. 제안 기법의 유효성을 검증하기 위해 실내 환경에서 실험을 진행한 결과, 기존 기법에 비해 신호 대 잡음비가 최대 18.7 dB 향상됐으며, 전체 프레임 계산 시간이 최대 12.47 % 감소됐고, 표적 탐지 성능이 개선되었고, 속도-각도 맵에서 부엽이 최대 2.4 dB 감소한 것을 확인하였다.

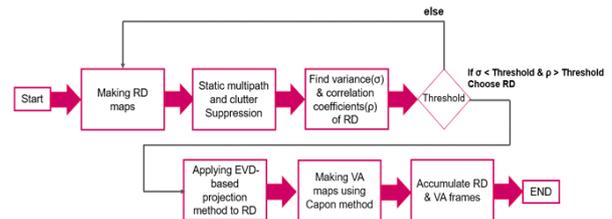


그림 1. 제안 기법의 주요 흐름도
Fig. 1. Flow chart of the suggested method.

II. 제안 기법

2.1 거리-속도 맵 생성

시분할 다중화 FMCW 레이다는 그림 2에 나타난 것처럼 시간에 따라 주파수가 선형적으로 증가하는 처프 신호를 주기적으로 송신한다. 임의의 시간 t 에서 송신 신호 $s(t)$ 는 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$s(t) = \exp\left\{j2\pi\left(f_c t + \frac{B}{2T_c} t^2\right)\right\}, (0 \leq t \leq T_c) \quad (1)$$

이때, f_c 는 중심 주파수, B 는 대역폭, T_c 는 처프 신호의 지속 시간이다. $s(t)$ 는 표적에서 반사돼 FMCW 레이다 수신기로 수신된 후, $s(t)$ 의 쉐레 복소수 신호와 곱하고 저대역 통과 필터를 거쳐 중간 주파수(IF) 신호를 생성한다. 그리고 시간에 따른 연속적인 중간 주파수 신호를 ADC를 통해 이산 IF 신호 행렬 $x[n, l, p]$ 를 만들 수 있으며, 이는 식 (2)로 나타낼 수 있다^[12].

$$x[n, l, p] = \exp\left\{j2\pi\left(\frac{2BR}{T_c} n T_s + \frac{2v}{\lambda} l T_c + \frac{d \sin \theta}{\lambda} p + \phi\right)\right\} \quad (2)$$

$(n = 0, 1, \dots, N-1)$
 $(l = 0, 1, \dots, L-1)$
 $(p = 0, 1, \dots, P-1)$

여기에서 n 은 샘플링 인덱스, l 은 처프 인덱스, p 는 수신기 인덱스, R 은 FMCW 레이다와 표적 사이의 거리, v 는 표적의 속도, T_s 는 샘플링 주기, λ 는 송신 신호의 파장, d 는 FMCW 레이다 안테나 사이의 간격, θ 는 수신 신호

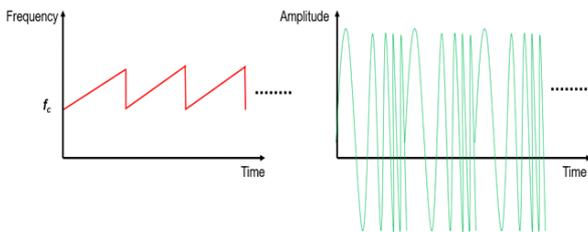


그림 2. 처프(chirp) 신호의 시간-주파수 그래프 및 시간-크기 그래프
 Fig. 2. Time-frequency graph and time-amplitude graph of the chirp signals.

와 FMCW 레이다 수신기 안테나 사이의 각도, 그리고 ϕ 는 여분의 위상 성분을 의미한다.

식 (2)를 통해 표적의 거리, 속도 그리고 각도 성분이 주파수에 비례함을 알 수 있다. 그러므로 수신 데이터의 거리와 속도 축을 따라 2차원 고속 푸리에 변환을 적용하면 거리-속도 맵을 생성할 수 있다. 또한, 각 프레임의 FMCW 레이다 수신 데이터는 서로 다른 $x[n, l, p]$ 를 가지므로, 여러 거리-속도 맵 프레임을 행렬 RD 로 표현하면 식 (3)처럼 나타낼 수 있다.

$$RD = \begin{bmatrix} RD_1^{a \times b}(1) & \dots & RD_1^{a \times b}(i) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ RD_p^{a \times b}(1) & \dots & RD_p^{a \times b}(i) \end{bmatrix} \quad (3)$$

$(p = 1, 2, \dots, P)$
 $(i = 1, 2, \dots, I)$

여기에서 p 는 수신기 인덱스, P 는 전체 수신기 개수, a 와 b 는 각각 거리와 속도 축으로 제로 패딩과 함께 2차원 고속 푸리에 변환을 했을 때 셀의 개수, i 는 프레임 인덱스, I 는 전체 프레임 개수이다.

2.2 정적 멀티패스 효과 완화

RD 는 표적과 정지 클러스터의 거리 및 속도 정보를 함께 갖고 있다. 또한, 정지 클러스터에서 반사된 신호는 전파의 반사, 회절, 굴절 특성에 따라 다른 정지 클러스터로 전달되기도 한다. 그 결과, 여러 정지 클러스터를 거쳐 수신된 신호는 실제 정지 클러스터의 거리보다 더 큰 거리값을 나타낼 수 있다. 이와 같이, FMCW 레이다 수신기에선 정지 클러스터로부터 반사된 신호와 정지 클러스터의 거리값이 왜곡된 신호를 함께 수신하는데, 정지 클러스터의 실제 거리값과 달라진 이 신호를 정적 멀티패스 신호(static multipath signal)라고 정의한다^[6].

그림 3에서 보여지는 바와 같이, 정지 클러스터와 FMCW 레이다 사이의 거리는 d_1 이지만, 다른 정지 클러스터인 벽을 걸쳐서 반사된 결과, FMCW 레이다엔 $d_1+d_2+d_3$ 의 거리값을 갖는 신호도 함께 수신된다. 실내 환경에선 정지 클러스터들 사이의 거리가 실외보다 짧아 정적 멀티패스 효과가 자주 발생하며, 정지 클러스터 신호의 세기가 표적 신호의 세기보다 강한 경우도 존재한다^[13]. 따라서, RD 에서 표적의 거리 및 속도 정보를 정확하게 탐지하기 위해선

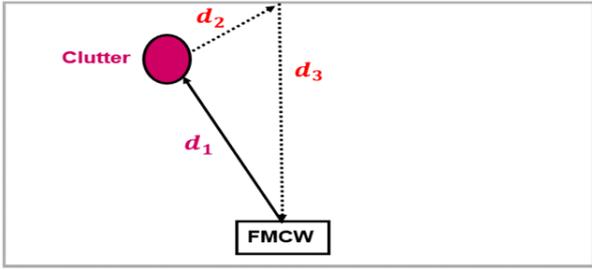


그림 3. 정적 멀티패스 신호의 설명도
Fig. 3. Illustration of the static multipath signal.

정지 클러터와 정적 멀티패스 효과를 줄여야 한다. 정지 클러터는 정지해 있으므로 도플러 주파수 편이가 0이고, 그에 따라 2차원 고속 푸리에 변환을 적용했을 때 거리-속도 맵에서 정지 클러터의 속도 성분은 0으로 나타난다. 또한, 정적 멀티패스 신호는 기존의 정지 클러터의 수신 신호와 비교했을 때 거리 성분은 다르지만, 속도 성분은 동일하다. 하지만, 정지 표적의 맥박이나 호흡으로 발생하는 속도 성분은 거리-속도 맵에서 그 크기가 매우 작아 이동 표적 지시기(MTI, moving target indicator)^[11]를 적용할 경우, 정지 클러터뿐만 아니라 표적의 정보도 함께 제거될 가능성이 있다. 그러므로 정지 클러터의 영향을 최소화하면서 정지 표적만을 남기는 기법이 필요하다.

지수 이동 평균(EMA)^[5]은 이전 거리-속도 맵에 가중치를 반영해 정지 클러터를 제거하는 기법이다. 현재 프레임에서의 정지 클러터 정보는 이전 프레임의 정지 클러터 정보와 현재 프레임에서의 거리-속도 맵을 가중 평균해 지속적으로 업데이트된다. 임의의 p 번째 수신기에서 i 번째 거리-속도 맵 프레임 $RD_p^{a \times b}(i)$ 에 지수 이동 평균을 적용하면 식 (4)처럼 나타낼 수 있다.

$$EMA_p^{a \times b}(i) = \begin{cases} RD_p^{a \times b}(1), & (i = 1) \\ \alpha EMA_p^{a \times b}(i-1) + (1-\alpha)RD_p^{a \times b}(i) & (i > 1) \end{cases} \quad (4)$$

여기에서 $EMA_p^{a \times b}(i)$ 는 $RD_p^{a \times b}(i)$ 에 지수 이동 평균을 적용한 결과이고, α 는 0과 1 사이의 값을 갖는 파라미터다. i 번째 거리-속도 맵 프레임에서 식 (5)를 통해 정지 클러터와 정적 멀티패스가 완화된 거리-속도 맵 프레임 $RD_p^{a \times b}(i)$ 를 얻을 수 있다.

$$RD_p^{a \times b}(i) = RD_p^{a \times b}(i) - EMA_p^{a \times b}(i) \quad (5)$$

이때, 정적 멀티패스 완화 전후의 주파수 전달 함수를 구하기 위해 식 (5)를 정리해 식 (6)처럼 나타낼 수 있고,

$$EMA_p^{a \times b}(i) = RD_p^{a \times b}(i) - RD_p^{a \times b}(i) \quad (6)$$

식 (6)을 식 (4)에 대입하면 식 (7)로 표현할 수 있다.

$$RD_p^{a \times b}(i) - RD_p^{a \times b}(i) = \alpha RD_p^{a \times b}(i-1) - \alpha RD_p^{a \times b}(i-1) + (1-\alpha)RD_p^{a \times b}(i) \quad (7)$$

식 (7)을 정리해 Z 변환을 취하면 식 (8)처럼

$$RD_p^{a \times b}(z)(\alpha z^{-1} - 1) = RD_p^{a \times b}(z)(\alpha z^{-1} - \alpha) \\ H(z) = \frac{RD_p^{a \times b}(z)}{RD_p^{a \times b}(z)} = \frac{\alpha - \alpha z^{-1}}{1 - \alpha z^{-1}} \quad (8)$$

주파수 전달 함수 $H(z)$ 를 구할 수 있다.

이 때, $H(z)$ 는 $z = \alpha$ 에서 극점을, $z = 1$ 에서 영점을 갖는 고대역 통과 필터이다. 따라서, 지수 이동 평균을 사용하면 주파수 성분이 없는 정지 클러터와 정적 멀티패스 효과가 차단되고, 맥박이나 호흡으로 인해 상대적으로 고주파 성분을 갖는 정지 표적의 속도 성분은 남게 된다.

식 (4)를 전체 수신기와 프레임에 적용하면 RD 에서 정지 클러터와 정적 멀티패스 효과를 완화한 RD' 를 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$RD' = \begin{bmatrix} RD_1^{a \times b}(1) & \dots & RD_1^{a \times b}(i) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ RD_p^{a \times b}(1) & \dots & RD_p^{a \times b}(i) \end{bmatrix} \quad (9)$$

2-3 동적 멀티패스 효과와 문제점

표적의 호흡, 맥박, 떨림과 같은 미세한 움직임으로 인해 반사 신호의 진행 경로가 바뀌어 정지 클러터를 거치게 되는 경우가 발생할 수 있다. 그 결과, 반사 신호는 여러 정지 클러터를 거치면서 기존 반사 신호의 거리와 각도 성분이 왜곡된 상태로 FMCW 레이더 수신기로 수신되며, 이렇게 거리와 각도 성분이 왜곡된 신호를 동적 멀티패스 신호(dynamic multipath signal)라고 정의한다. 동적 멀티패스 신호는 정적 멀티패스 신호와 유사하게, 각 정지 클러터마다 서로 다른 RCS와 전파의 특성에 의해 프

레이마다 크기와 방향이 무작위로 변화한다^[11].

그림 4에서 정지 표적과 FMCW 레이더 수신기 사이의 거리와 각도 성분이 각각 d_1 , θ_1 로 나타나며, 표적의 맥박과 호흡으로 인해 속도 v_1 이 발생하는 것을 보여준다. 이러한 미세한 움직임으로 인해 표적으로부터 반사된 신호의 진행 경로가 변하게 되고, 이는 정지 클러스터를 거쳐서 FMCW 레이더로 수신된다. 그 결과, FMCW 레이더는 $d_1+d_2+d_3$ 의 거리와 θ_2 라는 각도 성분을 갖는 동적 멀티패스 신호를 함께 수신하게 된다.

그림 5는 실내에서 정지한 두 표적을 FMCW 레이더로 측정하고 얻은 수신 데이터로 거리-속도 맵을 생성해 동적 멀티패스 효과가 프레임마다 무작위로 발생하는 것을 설명하는 그림이다. 지수 이동 평균을 통해 거리-속도 맵

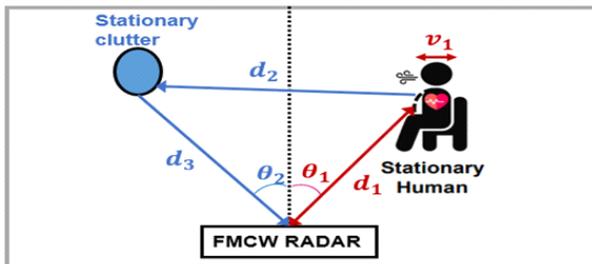


그림 4. 동적 멀티패스 신호의 설명도
Fig. 4. Illustration of the dynamic multipath signal.

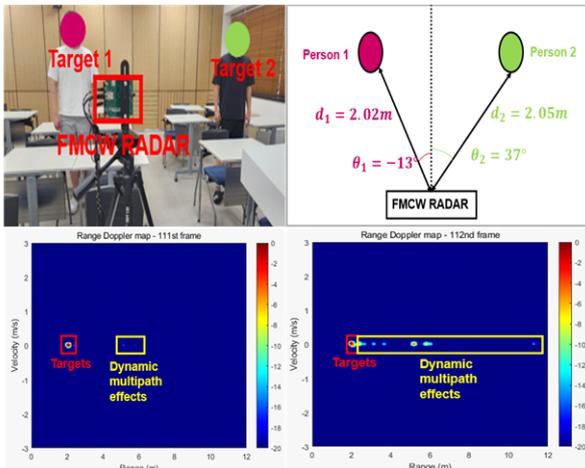


그림 5. 실내에서 정지한 표적과 결과 거리-속도 맵
Fig. 5. Stationary targets in an indoor and resultant range-velocity maps.

의 정지 클러스터와 정적 멀티패스 효과를 완화했지만, 표적의 미세한 움직임으로 인해 0이 아닌 속도 성분을 갖는 동적 멀티패스 효과는 제거되지 않음을 볼 수 있다. 그리고 벽, 의자, 책상과 같은 여러 정지 클러스터로 인해 표적으로부터 반사된 신호의 거리와 방향이 매 프레임마다 무작위로 변화함을 알 수 있다.

동적 멀티패스 효과는 정지 클러스터 간의 거리가 짧은 실내에서 빈발하는 경향이 있고, 그 세기가 표적 신호의 세기보다 강할 때도 있다^[11]. 따라서, 정적 멀티패스 신호 뿐만 아니라 동적 멀티패스 효과의 신호도 완화해야만 표적의 정보를 정확하게 탐지할 수 있다.

기술한 바와 같이, 동적 멀티패스 효과는 프레임마다 발생하는 위치와 크기가 다르므로, 기존 기법들처럼 모든 프레임을 일괄적으로 처리하는 방식엔 한계가 있다. 또한, 불필요한 데이터 처리로 인해 하드웨어에 부담이 가중되며, 처리 시간도 많이 소요되는 단점이 있다.

2.4 거리-속도 맵 그룹화

따라서 본 논문에서는 그림 6과 같이 총 I 개의 프레임으로 이루어진 전체 거리-속도 맵을 N 개의 거리-속도 맵을 단위로 나누어, k 개의 그룹을 형성한다. 그리고 각 그룹마다 임계값을 설정해 그룹 내부에서 선택된 n_k 개의 프레임에 대해서 신호 처리하는 기법을 제안한다. 이를 통해 하드웨어의 부담을 줄일 수 있을 것이다.

RD' 을 임의의 정수 N 개 단위로 그룹화하면 총 k 개의 그룹을 만들 수 있고, 이를 식 (10)처럼 나타낼 수 있다.

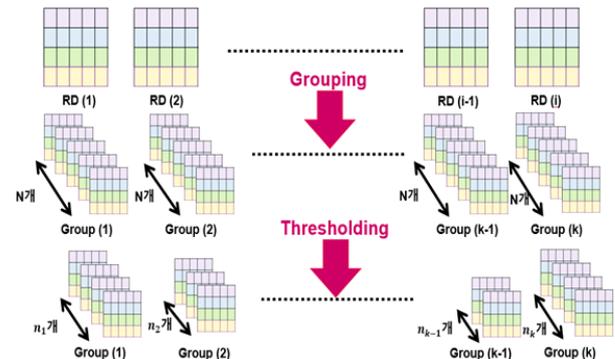


그림 6. 거리-속도 맵 프레임의 그룹화
Fig. 6. Grouping of range-velocity map frames.

다른 거리-속도 맵들과 비교하는 식 (12)의 과정을 거친다. 우측 그림은 동적 멀티패스 효과가 거리 축으로 길게 발생해 σ_d^2 가 높고, 좌측 그림과의 ρ 가 낮아 식 (13)에 따라 해당 맵은 그룹 별로 신호 처리 시 제외한다.

2-6 고유값 분해를 통한 동적 멀티패스 효과 완화

식 (13) 및 식 (14)는 그룹 내에서 동적 멀티패스 효과가 강하게 발생한 거리-속도 맵을 제외하는 역할을 하지만, 이는 동적 멀티패스 효과를 근본적으로 완화하는 방법이 아니다. 그러므로, 본 논문에서는 그룹 내에서 신호 처리할 프레임에 고유값 분해(EVD, eigen value decomposition)^[14]를 적용해 동적 멀티패스 효과를 줄이고자 한다.

고유값 분해란 임의의 $m \times m$ 복소수 정사각 행렬을 고유벡터(S)와 대각선에 고유값을 갖는 고유값 벡터(Λ)로 대각화하는 기법이다. 복소수 정사각 행렬 A 를 식 (15)처럼 대각화할 수 있다.

$$A^{m \times m} = S^{m \times m} \Lambda^{m \times m} (S^{m \times m})^{-1} \quad (15)$$

만약 식 (3)에 거리 축과 도플러 축으로 제로 패딩의 개수를 m 개로 동일하게 설정하면, 그룹 내 신호 처리할 거리-속도 맵에 고유값 분해를 적용할 수 있다. 식 (13)에 의해 각 그룹마다 설정된 임계값이 다르므로, 그룹마다 n_k 개의 열 벡터를 갖고 있다. 임의의 $Group(k)$ 의 첫 번째 열 벡터 a_1 는 식 (16)과 같이 표현되며,

$$a_1 = \begin{bmatrix} RD_1^{m \times m} \{(k-1)N+1\} \\ \vdots \\ RD_p^{m \times m} \{(k-1)N+1\} \end{bmatrix} \quad (16)$$

이는 특정 프레임에서 각 수신기에서의 거리-속도 맵을 나타낸다. a_1 의 거리 축으로 공분산 행렬을 구하고, 공분산 행렬에 대해 고유값 분해를 적용하면 식 (17)처럼 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} COV[RD^{p \times m} \{(k-1)N+1\}] &= SAS^{-1} \\ S &= S^{p \times p} = [S_1 S_2 \dots S_p] \\ \Lambda &= \Lambda^{p \times p} = diag(\lambda_1, \dots, \lambda_p), (\lambda_1 < \dots < \lambda_p) \end{aligned} \quad (17)$$

공분산 행렬의 가장 큰 고유값 λ_p 에 가장 많은 에너지가 담겨 있다고 볼 수 있다^[15]. 식 (11)~식 (14)까지를 이용해 각 그룹에서 동적 멀티패스 효과가 강하게 발생한

프레임을 제외하고, 표적의 세기가 동적 멀티패스 효과보다 강한 프레임만을 그룹에 남겨 놓았다. 즉, 공분산 행렬의 λ_p 와 그에 해당하는 고유 벡터 S_p 에는 거리-속도 맵 상에 있는 표적의 에너지가 집중되어 있다고 예측할 수 있다. 투영 행렬은 식 (18)과 같이 구할 수 있으며, 여기에서 H 는 에르미트 연산자(Hermitian operator)이다.

$$RD_{projection}^{1 \times m} \{(k-1)N+1\} = (S_p)^H RD^{p \times m} \{(k-1)N+1\} \quad (18)$$

그림 8의 좌측은 식 (11)~식 (14)까지를 이용해 그림 5의 결과 그룹 내에서 동적 멀티패스 효과가 상대적으로 약한 거리-속도 맵을 선택한 결과를, 우측은 이 거리-속도 맵에 식 (17) 및 식 (18)을 전체 거리 축과 속도 축에 적용해 생성된 투영 행렬을 시각화한 것이다. 시각화된 투영 행렬에 나타난 것처럼 실제 표적의 위치에 에너지가 집중되어 있고, 동적 멀티패스 효과가 발생한 영역엔 상대적으로 적은 에너지가 분포해 있음을 알 수 있다.

또한, 그림 4에 의해 동적 멀티패스 효과는 실제 표적의 위치보다 먼 거리에서 발생하고, 고유값 분해로 인한 연산 시간을 감소시키기 위해 표적의 에너지가 가장 큰 거리로부터 일정 범위까지 고유값 분해를 적용했다.

이후, $RD^{p \times m} \{(k-1)N+1\}$ 와 식 (18)에서 생성한 투영 행렬 간에 아다마르 곱(Hadamard product)을 적용하면 첫 번째 거리 셀에서 동적 멀티패스 효과가 완화된 $RD^{p \times m} \{(k-1)N+1\}$ 을 만들 수 있고, 이를 거리 축 전체에 적용하면 동적 멀티패스 효과가 완화된 열 벡터 a_1^* 을 식 (19)와 같이 표현할 수 있다.

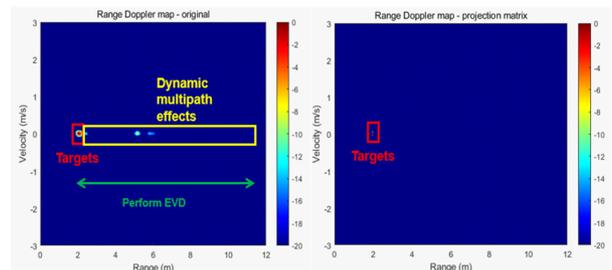


그림 8. 신호 처리할 거리-속도 맵과 시각화된 투영 행렬
Fig. 8. Range-velocity map for signal processing and visualized projection matrix.

이 때, p_m 은 m 번째 속도 셀에서 $VA\{(k-1)N+1\}$ 의 공간 스펙트럼이고, I_m 은 $m \times m$ 단위 행렬, tr 은 대각합 연산자, α 는 상수이다.

이후, 식 (22)를 식 (20)에 적용하면, 각 그룹마다 서로 다른 n_k 개의 속도-각도 맵을 갖는 k 개 그룹의 전체 속도-각도 맵 행렬 VA 를 식(23)과 같이 생성할 수 있다.

$$VA = [Group_{VA}(1) \ Group_{VA}(2) \ \dots \ Group_{VA}(k)]$$

$$Group_{VA}(k) = [VA^{m \times m}\{(k-1)N+1\}$$

$$\dots \ VA^{m \times m}\{(k-1)N+n_k\}] \quad (23)$$

그림 10은 식 (20)에 Capon 기법을 적용해 그림 5의 거리-각도 맵과 속도-각도 맵을 보여준다. FMCW 레이더로부터 두 표적의 거리가 비슷하고, 제한된 대역폭으로 인해 거리 해상도가 좋지 않아 거리 축에서 인접한 두 표적을 거리-각도 맵에서는 구분하기 어렵다. 하지만, 한 프레임당 처프의 개수를 올려 속도 해상도가 향상시킨 결과, 속도-각도 맵을 통해선 두 표적을 명백히 구분할 수 있음을 알 수 있다.

2-8 신호 대 잡음비 향상을 위한 비동기적 합성

FMCW 레이더와 표적 간 거리는 수신기 간 거리보다 훨씬 크므로, 각 수신기에 수신되는 표적의 거리와 속도 값은 유사하다고 볼 수 있다. 따라서, 식 (20)을 수신기 축으로 더하는 비동기적 합성을 취하면 하나의 거리-속도 맵일 때 보다 신호 대 잡음비(SNR, signal to noise ratio)를 향상시킬 수 있다.

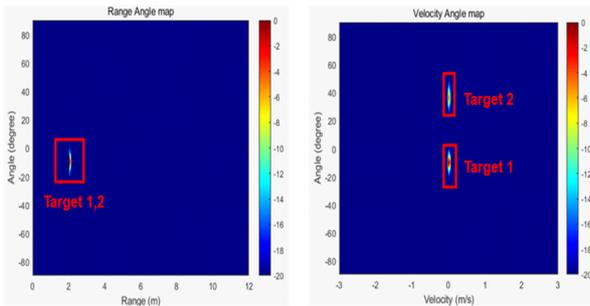


그림 10. Capon 기법을 통해 생성한 거리-각도 맵과 속도-각도 맵
Fig. 10. Range-angle map and velocity-angle map made by Capon method.

또한, 식 (20) 및 식 (23)에 있는 각 그룹 내 서로 다른 n_k 개의 프레임을 그룹별로 비동기적 합성을 적용하면, 신호 대 잡음비를 추가적으로 증가시킬 수 있을 것이다^[11]. 신호 대 잡음비는 식 (24)를 통해 구할 수 있다.

$$SNR(dB) = 10 \log \left(\frac{P_{signal}}{P_{noise}} \right)$$

$$= 10 \log \left(\frac{P_{target}}{P_{total} - P_{target}} \right) \quad (24)$$

그림 11은 그림 5의 결과인 식 (20) 및 식 (23)의 그룹 중 하나를 선택하여, 비동기적 합성 전후의 변화를 비교한 것이다. 처음 룩 내부 프레임의 개수(M)는 10이었지만, 식 (11)~식 (14)까지를 이용해 동적 멀티패스 효과의 세기가 강하면서 거리 축으로 길게 발생한 프레임을 제외한 결과, 그룹 내부 프레임의 개수(n_k)는 6으로 감소했다.

좌측 상단의 거리-속도 맵은 그룹 내 하나의 거리-속도 맵이고, 우측 상단은 거리-속도 맵들을 수신기 축으로 더한 다음, 그룹 내부의 거리-속도 맵들을 더한 비동기적 합성 결과이다. 이로 인해 거리-속도 맵에서 표적 신호의 세기가 강해졌음을 알 수 있고, 신호 대 잡음비는 5.64 dB가

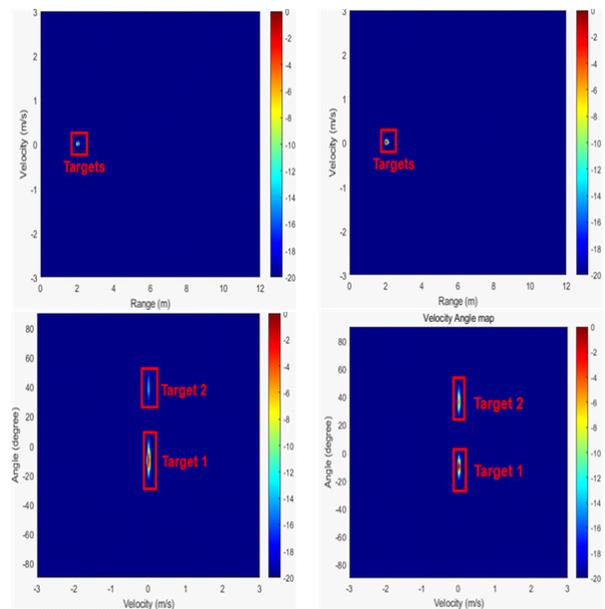


그림 11. 비동기적 합성 전후 비교
Fig. 11. Comparison of maps before and after non-coherent integration.

량 증가했다.

좌측 하단의 속도-각도 맵은 좌측 상단의 거리-속도 맵에 식 (22)를 적용한 결과이고, 우측 하단은 그룹 내부에 있는 거리-속도 맵들에 식 (22)를 적용한 다음, 비동기적 합성을 거친 결과이다. 그 결과, 속도-각도 맵에서 표적 2의 세기가 강해졌음을 파악할 수 있으며, 신호 대 잡음비는 4.91 dB 증가했다. 또한, 비동기적 합성을 거치면서 부엽은 0.56 dB 감소하였다.

III. 실측 실험

제안 기법의 유효성을 검증하기 위해서 두 가지 실험을 진행했다. 첫 번째 시나리오는 한 명의 표적이 실내에 정지해 있는 상태였으며, 두 번째 시나리오는 두 표적이 레이더 피탐 면적이 넓은 벽 바로 앞에 서 있는 상태였다. 두 실험 모두 20초간 측정했으며, 실험에 사용된 FMCW 레이더 구성은 표 1에 나타내었다.

3-1 첫 번째 실험

첫 번째 실험은 실내에서 한 명의 정지 표적을 대상으로 FMCW 레이더로 측정된 실험이었고, 이를 그림 12에 도식화했다. 피측정자는 (1.1 m, -4°)에 정지해 있었으며,

표 1. 실측 실험에 사용된 TI社 IWR 1843 FMCW 레이더 사양

Table 1. The specifications of TI IWR 1843 RADAR used in the measurement experiments.

Parameter (unit)	Value
Start frequency, f_c (GHz)	77
Bandwidth (MHz)	1,789.9
ADC Sample frequency (kHz)	5,000
Slope (MHz/ μ s)	29.982
No. of RX antenna	4
No. of samples per chirp	256
No. of chirps per frame	255
No. of frames	200
Range resolution (meter)	0.0834
Velocity resolution (m/s)	0.0121
Angular resolution (degree)	28.65° at 0°

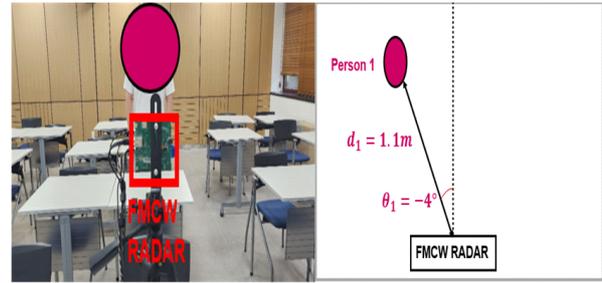


그림 12. 강의실에 정지한 채로 서 있는 한 명의 사람
Fig. 12. A single person standing in a classroom.

정지 클러스터인 책걸상 및 벽으로 인해 정적 및 동적 멀티패스 효과가 발생할 것을 예측할 수 있다.

그림 13은 참고문헌 [11]에서 제안한 기법을 적용한 후, 41번째부터 50번째까지 프레임을 비동기적 합성한 거리-속도 맵과 속도-각도 맵이다. 해당 논문에선 정지 클러스터에 의한 영향을 이동 표적 지시기(moving target indicator)를 통해 최소화한 뒤, 거리-속도 맵과 속도-각도 맵을 비동기적 합성을 취한 다음, MD-CLEAN 알고리즘을 이용해 거리-속도 맵과 속도-각도 맵에서 표적을 탐지하는 기법을 제시했다. 그러나, 동적 멀티패스 효과가 강하게 발생한 프레임까지 비동기적 합성에 포함시킨 결과, 거리-속도 맵에서 오탐지가 발생함을 관찰할 수 있다. 또한, 동적 멀티패스 효과로 인해 수신 신호에선 표적의 실제 각도 값과 각도가 왜곡된 값을 함께 갖기 때문에, 속도-각도 맵에서 표적 주위로 부엽이 길게 발생했음을 알 수 있다.

그림 14는 본 논문에서 제안한 기법을 적용한 거리-속

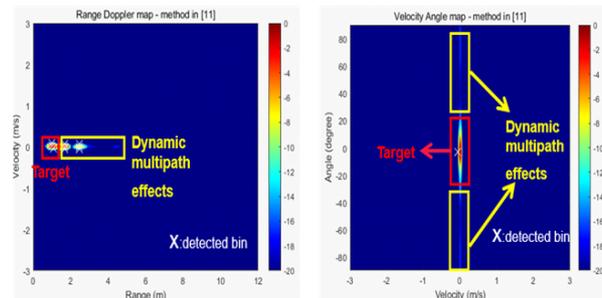


그림 13. 참고문헌 [11]에서 제안한 기법으로 생성한 거리-속도 맵과 속도-각도 맵
Fig. 13. Range-velocity map and velocity-angle map with applying the suggested method in ref. [11].

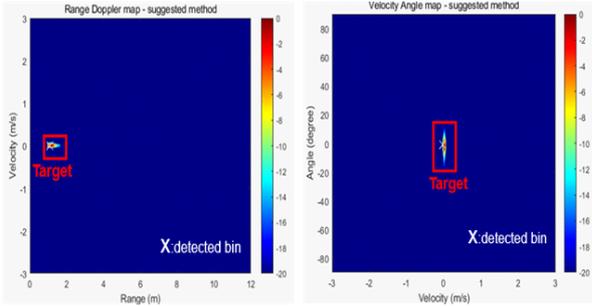


그림 14. 제안 기법을 통해 생성한 거리-속도 맵과 속도-각도 맵
 Fig. 14. Range-velocity map and velocity-angle map after applying the suggested method in this paper.

도 맵과 속도-각도 맵이다. 식 (10)~식 (14)번을 이용해 총 200개의 프레임을 10개의 거리-속도 맵을 갖는 그룹으로 나누고, 임계값을 이용해 동적 멀티패스 효과가 강한 프레임을 그룹에서 제외했다. 그 결과, 이 그룹에 속한 41번째 프레임부터 50번째 프레임까지, 총 6개의 거리-속도 맵이 선택됐고, 식 (16)~식 (24)를 적용한 후, 속도-각도 맵을 생성하고 각 맵에 비동기적 합성을 적용했다. 그 결과, 거리-속도 맵에서 오탐지가 발생하지 않았으며, 속도-각도 맵에서 부엽이 1.72 dB 감소하였다.

3-2 두 번째 실험

두 번째 실험은 실내에 정지해 있는 두 명의 사람을 측정했고, 이를 그림 15에 도식화했다. 이 실험에선 표적과 레이더 사이 거리가 멀어졌으며, 표적 주위에 레이더 피탐 면적이 큰 벽이 있어 정지 클러스터 신호의 세기가 표적

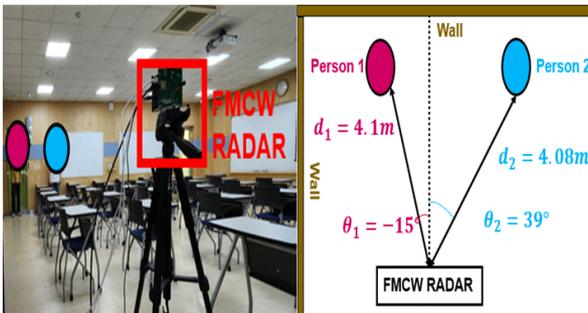


그림 15. 강의실에 정지한 채로 서 있는 두 명의 사람
 Fig. 15. Standing people in the classroom.

의 신호보다 큰 경우가 발생할 수 있다. 또한, 표적과 레이더 사이 더 많은 책상과 의자들을 배치해 첫 번째 실험보다 멀티패스 효과가 빈발하도록 설정했다. 표적들 사이의 거리를 거리 해상도인 0.0834 m보다 짧게 설정했고, 표적은 (4.1 m, -15°)와 (4.08 m, 39°)에 정지해 있었다.

그림 16은 두 번째 실험 결과를 참고문헌 [11]에서 제안한 기법으로 생성한 거리-속도 맵과 속도-각도 맵이다. 71번째 프레임부터 80번째 프레임까지 총 10개의 거리-속도 맵과 속도-각도 맵에 비동기적 합성을 적용한 뒤 MD-CLEAN 알고리즘을 적용했지만, 표적 주위에 레이더 피탐 면적이 큰 벽이 있었고, 첫 번째 실험에 비해 책상과 의자가 많아져 동적 멀티패스 효과의 세기가 표적보다 강해지고, 거리 축으로 빈발한 것을 관찰할 수 있다. 그에 따라 실험 1의 결과에 비해 오탐지가 증가하였다.

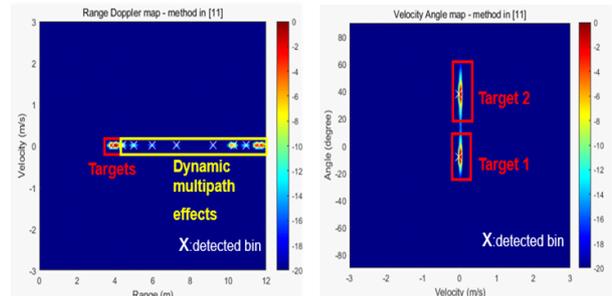


그림 16. 참고문헌 [11]에서 제안한 기법으로 생성한 거리-속도 맵과 속도-각도 맵
 Fig. 16. Range-velocity map and velocity-angle map with applying the suggested method in ref. [11].

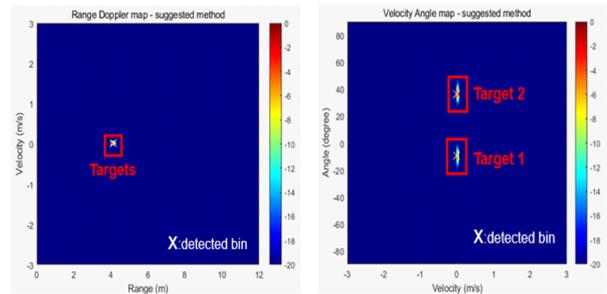


그림 17. 제안 기법을 통해 생성한 거리-속도 맵과 속도-각도 맵
 Fig. 17. Range-velocity map and velocity-angle map after applying the suggested method in this paper.

그림 17은 본 논문에서 제안한 기법을 두 번째 실험에 적용해 생성한 거리-속도 맵과 속도-각도 맵이다. 식 (10)~식 (14)번을 이용해 200개의 전체 프레임을 각 그룹마다 10개의 거리-속도 맵을 갖는 그룹으로 나누었다. 그리고 임계값을 적용한 결과, 이 그룹인 71번째 프레임부터 80번째 프레임까지 총 4개의 거리-속도 맵이 선택됐다. 이후, 식 (16)~식 (24)를 적용해 동적 멀티패스 효과를 완화하고 속도-각도 맵을 생성한 다음, 그룹 내부에서 비동기적 합성을 적용했다. 그 결과, 거리-속도 맵에서 오탐지를 줄이고, 표적을 정확하게 탐지했으며, 속도-각도 맵에서 부엽이 2.21 dB 감소했음을 확인하였다.

3.3 기존 기법과 제안 기법의 성능 비교

그림 18은 참고문헌 [11]에서 제안한 기법과 본 논문에서 제안한 기법의 신호 대 잡음비(SNR)를 비교한 그림이다. 상단의 좌측과 우측 그림은 각각 실험 1의 거리-속도 맵과 속도-각도 맵의 신호 대 잡음비 그래프이다. 그리고

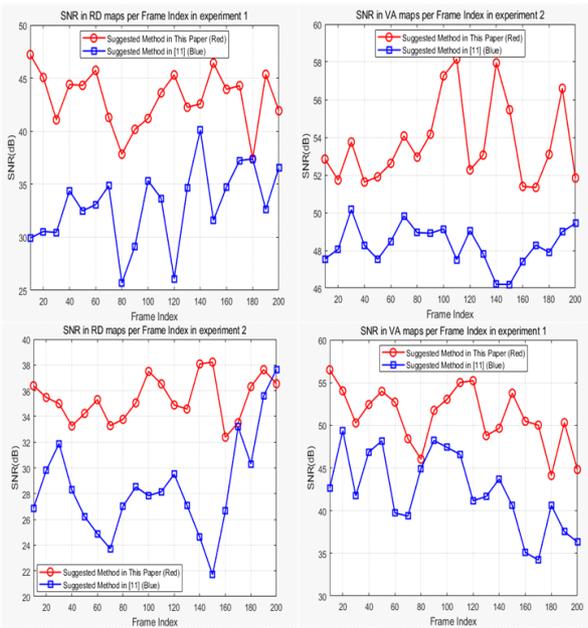


그림 18. 실험 1과 2에서, 참고문헌 [11]의 기법과 본 논문에서 제안한 기법의 신호 대 잡음비 비교
Fig. 18. In experiment 1 and 2, comparison of SNR between the proposed method of ref. [11] and suggested method in this paper.

하단의 좌측과 우측 그림은 각각 실험 2의 거리-속도 맵과 속도-각도 맵의 신호 대 잡음비 그래프이다. 또한, 청색 그래프는 참고문헌 [11]에서 제안한 기법을 적용한 경우의 신호 대 잡음비를 계산했을 때 그래프이고, 적색은 본 논문에서 제안한 기법으로 신호 대 잡음비를 계산했을 때의 그래프이다.

제안 기법을 통해 각 그룹마다 10개의 거리-속도 맵을 갖도록 설정했으며, 그룹별로 임계값을 다르게 설정해 각 그룹에서 서로 다른 개수의 거리-속도 맵이 선택됐다. 각 그룹의 거리-속도 맵에 제안 기법을 적용한 결과, 그룹 내에서 일부 프레임이 제외됐는데도 불구하고 신호 대 잡음비가 대부분 그룹에서 향상됐음을 확인할 수 있다.

그림 19는 참고문헌 [11]의 기법과 본 논문의 기법을 거리-속도 맵에서 MD-CLEAN 알고리즘을 사용했을 때의 탐지 성능과 속도-각도 맵에서 부엽을 비교한 그림이다. 상단의 좌측과 우측 그림은 각각 실험 1의 프레임 그룹마다

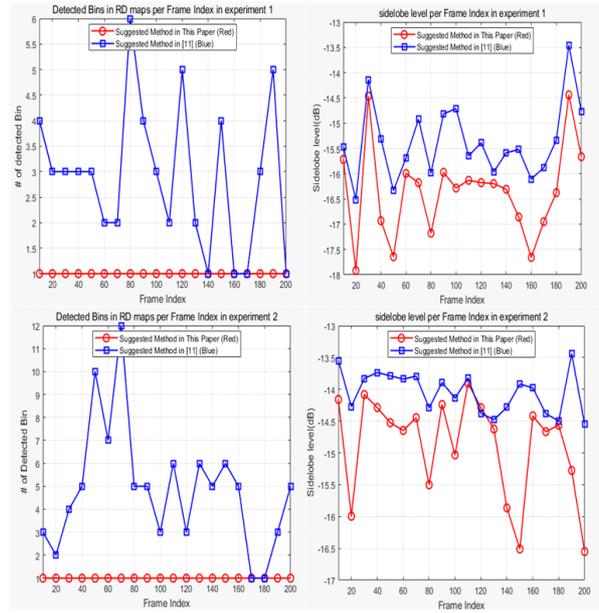


그림 19. 실험 1과 2에서, 참고문헌 [11]의 기법과 본 논문에서 제안한 기법의 MD-CLEAN 알고리즘을 이용한 탐지 성능 및 부엽 비교
Fig. 19. In experiment 1 and 2, comparison of detection performance using MD-CLEAN algorithm and sidelobe between the proposed method in ref. [11] and the suggested method in this paper.

다 거리-속도 맵에서의 탐지 성능과 속도-각도 맵에서의 부엽의 정도를 나타낸다. 그리고 하단의 좌측과 우측 그림은 각각 실험 2의 프레임 그룹마다 거리-속도 맵에서의 탐지 성능과 속도-각도 맵에서의 부엽의 정도를 비교한 그림이다. 또한, 청색 그래프는 참고문헌 [11]에서 제안한 기법의 결과이고, 적색 그래프는 본 논문에서 제안한 기법의 결과이다.

참고문헌 [11]에서 제안한 기법은 그룹 내 거리-속도 맵끼리 비동기적 합성을 적용할 때, 동적 멀티패스 효과도 함께 더해져 전체 프레임에서 오탐지가 빈번하게 발생함을 확인할 수 있다. 반면, 제안 기법은 거리-속도 맵에서 동적 멀티패스 효과를 줄여 표적만을 남겼기 때문에 모든 프레임에서 표적 탐지가 정확하게 이루어진 것을 확인할 수 있다. 또한, 제안 기법을 통해 표적의 각도 정보의 정확성을 향상시켰으므로 속도-각도 맵의 대부분 그룹에서 부엽의 정도가 감소했음을 확인할 수 있다.

그림 20은 참고문헌 [11]에서 제안한 기법과 본 논문에서 제안한 기법의 전체 프레임 계산 시간을 비교한 그래프이다. 실험 1과 2에서 참고문헌 [11]에서 제안한 기법은 전체 프레임을 계산하는 데 각각 93.74초와 118.72초가 소요됐다. 그에 반해, 본 논문에서 제안한 기법은 임계값에 따라 일부 프레임만 계산함으로써, 실험 1과 2에서 각각 82.05초와 105.16초가 소요됐다. 결과적으로 제안한 기법은 기존 기법에 비해 전체 프레임 계산 시간이 최대 12.47%가량 감소시켰고, 이는 실시간 처리나 계산 자원

이 제한된 환경에서 제안 기법이 유용함을 시사한다.

IV. 결 론

본 논문에서는 지수 이동 평균을 통해 정지 클러터의 영향을 줄인 전체 거리-속도 맵을 일정한 개수의 그룹으로 나눈 뒤, 각 그룹에서 거리 축 분산값이 가장 작은 거리-속도 맵을 기준 삼아 그룹 내의 다른 거리-속도 맵들의 거리 축 분산값과 상관 계수를 기반으로 임계값을 설정해 그룹 내에서 신호 처리할 거리-속도 맵을 선택하였다. 이후, 선택된 거리-속도 맵에 고유값 분해를 적용해 투영 행렬을 생성한 다음, 기존 거리-속도 맵을 투영 행렬에 투영시킴으로써 동적 멀티패스 효과를 완화하는 방법을 제안하였다. 또한, 여러 표적이 비슷한 거리에 있는 경우 속도-각도 맵을 생성한 다음, 각 그룹 내부에 비동기적 합성을 적용하는 과정을 거쳤다.

제안 기법을 통해 모든 그룹의 거리-속도 맵에서 동적 멀티패스 효과가 효과적으로 완화되었으며, 기존 기법에 비해 거리-속도 맵에서의 탐지 정확성을 향상시켰고, 속도-각도 맵에서 부엽을 최대 2.4 dB 감소시켰다. 또한, 거리-속도 맵과 속도-각도 맵의 신호 대 잡음비 역시 제안 기법을 통해 각각 최대 18.7 dB 증가시킬 수 있었다. 더불어, 제안 기법을 통해 일부 프레임만을 계산함으로써 전체 프레임 계산 시간도 최대 12.47% 감소시켰다.

따라서, 실내 사람 추적이나 비접촉 생체 신호 측정에 제안 기법을 적용한다면, 기존 기법보다 적은 시간 내에 표적의 정보를 더욱 정확히 파악할 수 있을 것이다. 특히, 동적 멀티패스 효과가 빈번히 발생하는 차량 내부 측정 데이터에 제안 기법을 적용한다면, 탑승자들의 위치 및 생체 신호를 파악하는 데도 도움이 될 것이다.

References

[1] J. Niu, B. Wang, L. Shu, T. Q. Duong, and Y. Chen, "ZIL: An energy-efficient indoor localization system using ZigBee radio to detect WiFi fingerprints," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 33, no. 7, pp. 1431-1442, Jul. 2015.

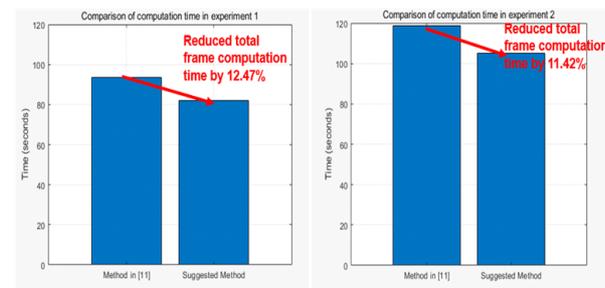


그림 20. 참고문헌 [11]의 기법과 제안 기법의 전체 프레임 계산 시간 비교 그래프

Fig. 20. Comparison of total frame calculation time between proposed method in ref. [11] and suggested method in this paper.

- [2] A. Yassin, Y. Nasser, M. Awad, A. Al-Dubai, R. Liu, and C. Yuen, et al., "Recent advances in indoor localization: A survey on theoretical approaches and applications," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 19, no. 2, pp. 1327-1346, Secondquarter 2017.
- [3] Y. L. Hou, G. K. H. Pang, "People counting and human detection in a challenging situation," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans*, vol. 41, no. 1, pp. 24-33, Jan. 2011.
- [4] R. Igual, C. Medrano, and I. Plaza, "Challenges, issues and trends in fall detection systems," *Biomedical Engineering Online*, vol. 12, p. 66, Jul. 2013.
- [5] P. Nallabolu, L. Zhang, H. Hong, and C. Li, "Human presence sensing and gesture recognition for smart home applications with moving and stationary clutter suppression using a 60-GHz digital beamforming FMCW radar," *IEEE Access*, vol. 9, pp.72857-72866, 2021.
- [6] F. Adib, Z. Kabelac, D. Katabi, and R. C. Miller, "3D tracking via body radio reflections," in *11th USENIX Symposium on Networked Systems Design and Implementation*, Seattle, WA, Apr. 2014, pp. 317-329.
- [7] E. I. P. Copa, K. Aziz, M. Rykunov, E. de Greef, A. Bourdoux, and F. Horlin, "Radar fusion for multipath mitigation in indoor environments," in *2020 IEEE Radar Conference(RadarConf20)*, Florence, Sep. 2020, pp. 1-5.
- [8] P. Setlur, M. Amin, and F. Ahmed, "Multipath model and exploitation in through-the-wall and urban radar sensing," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 49, no. 10, pp. 4021-4034, Oct. 2011.
- [9] R. Feng, E. D. Greef, M. Rykunov, H. Sahli, S. Pollin, and A. Bourdoux, "Multipath ghost recognition for indoor MIMO radar," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 60, p. 5104610, 2022.
- [10] P. Stoica, R. L. Moses, *Spectral Analysis of Signals*, Upper Saddle River, NJ, Pearson Prentice Hall, 2005.
- [11] J. K. Park, J. H. Park, and K. T. Kim, "Multipath signal mitigation for indoor localization based on MIMO FMCW Radar system," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 11, no. 2, pp. 2618-2629, Jan. 2024.
- [12] J. Jung, S. Lim, S. C. Kim, and S. Lee, "Solving doppler-angle ambiguity of BPSK-MIMO FMCW radar system," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 120347-120357, 2021.
- [13] D. Zhang, Y. Hu, and Y. Chen, "MTrack: Tracking multiperson moving trajectories and vital signs with radio signals," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 8, no. 5, pp. 3904-3914, Mar. 2021.
- [14] G. Strang, *Linear Algebra and Its Applications*, 4th ed. Boston, MA, Cengage Learning, 2005.
- [15] J. Renard, L. Lampe, and F. Horlin, "Scaled largest eigenvalue detection for stationary time-series," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 64, no. 5, pp. 1161-1172, Mar. 2016.
- [16] H. Krim, M. Viberg, "Two decades of array signal processing research: The parametric approach," *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 13, no. 4, pp. 67-94, Jul. 1996.
- [17] R. Schmidt, "Multiple emitter location and signal parameter estimation," *IEEE Transactions on Antenna and Propagation*, vol. 34, no. 3, pp. 276-280, Mar. 1986.
- [18] R. Roy, T. Kailath, "ESPRIT-estimation of signal parameters via rotational invariance techniques," *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, vol. 37, no. 7, pp. 984-995, Jul. 1989.
- [19] J. Li, P. Stoica, and Zhisong Wang, "On robust Capon beamforming and diagonal loading," *IEEE Transactions Signal Processing*, vol. 51, no. 7, pp. 1702-1715, Jul. 2003.

이 정 민 [포항공과대학교/석사과정]

<https://orcid.org/0009-0000-6650-1308>



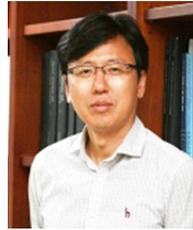
2021년 2월: 인하대학교 전자공학과 (공학사)

2023년 2월 ~ 현재: 포항공과대학교 전자전기공학과 석사과정

[주 관심분야] 레이더 신호처리, 표적 탐지 및 식별, 레이더 이미징

김 경 태 [포항공과대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0003-1200-5282>



1994년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학사)

1996년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학석사)

1999년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학박사)

2002년 3월 ~ 2011년 2월: 영남대학교 전자공학과 교수

2011년 3월 ~ 현재: 포항공과대학교 전자전기공학과 교수

2012년 9월 ~ 2017년 12월: 레이더/IR 표적식별 특화연구실장

2018년 1월 ~ 현재: 무인감시정찰기술연구센터장

2019년 4월 ~ 현재: 차세대 영상레이더시스템 연구센터장

2020년 11월 ~ 현재: 차세대 국방융합기술 연구센터장

[주 관심분야] 레이더 신호처리 및 영상, 레이더 표적 인식 및 패턴 인식, 전자기 수치 해석 및 RCS 측정