

FMCW 레이더 기반 실내 사람 탐지를 위한 인체 및 클러터 신호 특성 분석 연구

김지혜, 정재훈, 김성철
서울대학교 전기정보공학부 뉴미디어통신공동연구소
{jihyekim224, jay623, sckim}@maxwell.snu.ac.kr

A Study on the Analysis and Classification of Indoor Clutter Signals For Indoor Human Detection Based on the FMCW Radar

Jihye Kim, Jaehoon Jung, Seong-Cheol Kim
Department of Electrical and Computer Engineering and INMC, Seoul National Univ.

요약

레이더는 사람의 호흡 등에 의해 발생하는 움직임으로 인해 반사 신호가 변동하는 특성을 이용하여 사람을 탐지할 수 있다. 하지만 실내 환경에 다수 존재하는 전자기기 등의 비정적 클러터 또한 반사 신호가 변동하는 특성을 가지므로 오경보를 야기할 수 있으며, 따라서 사람과 비정적 클러터의 반사 신호를 구분하기 위한 기법이 적용되어야 한다. 본 논문에서는 frequency-modulated continuous wave 레이더의 속도 스펙트럼 특성을 정량화하기 위한 지표로 속도 대역폭 파워를 정의하고, 실험을 통해 90% 이상의 정확도로 사람과 비정적 클러터의 반사 신호를 분류할 수 있음을 확인하였다.

I. 서론

실내 사람 탐지는 Internet of Things 기술을 구현하기 위해 필요한 기술로, 레이더, Wi-Fi 등의 다양한 전파 센서를 이용한 연구가 진행되고 있다 [1], [2]. 그 중 레이더는 단일 기기에서 신호를 송수신해 수동적 타겟을 탐지하며, 넓은 대역폭을 사용하여 향상된 탐지 성능을 달성할 수 있는 센서이다 [3].

레이더 기반 사람 탐지는 호흡 등의 불가피한 인체의 움직임으로부터 기인하는 수신 신호의 변동을 이용하여 수행될 수 있다 [1]. 하지만 전자기기와 같이 움직임을 갖는 비정적 클러터가 존재하는 경우, 이를 사람으로 탐지하는 오경보가 발생할 수 있다. 따라서 안정적인 실내 사람 탐지 성능을 달성하기 위해서 비정적 클러터 제거 기법이 적용되어야 한다.

본 논문에서는 FMCW (frequency-modulated continuous wave) 레이더를 이용한 실험을 통해 사람과 비정적 클러터의 반사 신호 데이터를 취득하고, 각 신호의 변동 특성을 분석한다. 그리고 이들을 분리하기 위한 지표를 제시하고 실험 데이터에 기반하여 분리 성능을 평가한다.

II. FMCW 레이더 신호 모델

FMCW 레이더는 주파수가 시간에 따라 선형적으로 증가하는 처프 신호를 송신하고, 타겟에 의해 반사된 신호를 수신한다. 이 수신 신호를 송신 신호와 곱하고 저대역 필터를 적용하여 비트 신호를 생성할 수 있다. 또한 처프 신호를 일정 시간 간격 T_c 를 두고 총 M 개

송수신하여 비트 신호를 생성하였을 때, 비트 신호의 수식은 아래와 같이 근사해 나타낼 수 있다 [3].

$$x(t, m) \approx \sum_{k=0}^{K-1} a_k \exp \left[j2\pi \left\{ \frac{2SR_k t}{c} + \frac{2v_k T_c m}{\lambda} + \frac{2R_k}{\lambda} \right\} \right] \quad (1)$$

이때 t 와 m 은 각각 시간과 처프 인덱스를, K 는 타겟의 수를, a_k 는 k 번째 타겟의 반사 신호 세기를, R_k 와 v_k 는 각각 k 번째 타겟의 레이더에 대한 거리와 속도를, S 와 λ 는 각각 처프 신호의 시간-주파수 기울기와 파장을, c 는 빛의 속도를 의미한다. 식 (1)의 비트 신호의 시간 t 축과 처프 m 축으로의 주파수 성분이 타겟의 거리와 속도에 각각 비례하기 때문에, 2차원 푸리에 변환 기법을 이용하여 거리와 속도에 대한 스펙트럼을 취득할 수 있다 [3].

III. 반사 신호 특성 분석

레이더 신호를 취득하기 위해 Texas Instrument 사의 IWR6843ISK FMCW 레이더를 이용하였으며, 파라미터는 표 1과 같다. 먼저 수신 신호의 변동 정도를 분석하기 위하여 식 (1)의 비트 신호를 50 ms 간격마다 취득하여 여러 프레임 데이터의 분산을 계산하였다. 타겟까지의 거리를 1 m부터 4 m까지 변화시켰을 때의 분산은 그림 1과 같다. 이때 그래프의 마커는 평균을 나타내며 수직 막대의 길이는 표준편차를 나타낸다. 정적 클러터인 책상의 경우 거리에 관계없이 낮은 분산을 가진 반면, 사람의 경우 걷고 있거나 정지해 있는 경우 모두 높은 분산을 가졌다. 또한 선풍기, 데스크탑 컴퓨터와 같은 비정적 클러터의 경우에도 높은 분산을 가졌으며, 따라서

표 1. FMCW 레이더 파라미터

파라미터	값	파라미터	값
반송 주파수	60 GHz	처프 당 샘플 수	256
처프 시간-주파수 기울기	40 MHz/μs	프레임 당 처프 수	32
샘플링 주파수	3 MHz	처프 간 시간 간격	200 μs

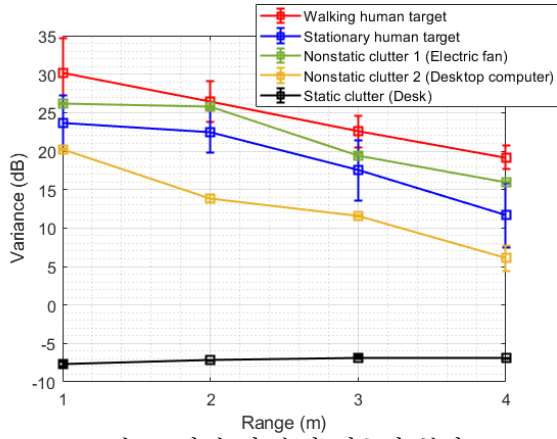


그림 1. 타겟 별 수신 신호의 분산

분산 만으로는 사람과 비정적 클러터가 분리되지 않음을 확인할 수 있다.

비정적 클러터를 구분하기 위해 속도 스펙트럼의 특성을 활용할 수 있다. 사람과 비정적 클러터의 속도 스펙트럼 예시는 그림 2 와 같다. 이때 전체 스펙트럼의 총 파워가 일정하도록 스펙트럼을 정규화하였다. 사람의 속도 스펙트럼인 (a), (b)에 비해 비정적 클러터인 (c), (d)의 속도 스펙트럼이 더 넓게 퍼져서 나타남을 확인할 수 있다. 따라서 이러한 특성을 정량화하기 위한 지표로 속도 대역폭 파워를 정의한다. 임의의 양수 A 에 대해, A m/s 속도 대역폭 파워는 A m/s 의 속도 대역폭에 포함되는 최대 신호 파워를 의미한다. 이는 그림 2 와 같이 정규화된 속도 스펙트럼을 $q(m)$ ($m = 0, 1, \dots, M - 1$)이라고 하고, A m/s 속도 대역폭에 포함되는 속도 샘플의 수가 n 개일 때, 아래의 식과 같이 계산된다.

$$VBP_A = \max_{m_0} \sum_{m=m_0}^{m_0+n-1} q(\text{mod}(m, M)) \quad (2)$$

이때 m_0 는 $0, 1, \dots, M - 1$ 의 값을 가질 수 있으며, $\text{mod}(m, M)$ 은 m 을 M 으로 나눈 나머지를 의미한다.

사람의 반사 신호 파워가 대부분 1.5 m/s 의 속도 대역폭에 포함된다는 분석을 바탕으로 1.5 m/s 속도 대역폭 파워를 사람과 비정적 클러터를 구분하기 위한 지표로 제안한다. 각 타겟에 대해 계산된 지표의 값을 히스토그램으로 나타내면 그림 3 과 같다. 사람과 비정적 클러터를 구분하기 위한 1.5 m/s 속도 대역폭 파워의 임계값을 두 히스토그램이 교차하는 지점인 -0.18 dB 로 설정했을 때, 사람과 비정적 클러터를 각각 약 92.3 %, 90.1 %의 정확도로 분류할 수 있음을 확인하였다.

IV. 결론

본 논문에서는 안정적인 레이더 기반 실내 사람 탐지 성능을 달성하기 위해, 사람과 실내 클러터 신호의 특징을 비교 분석하였다. 오경보를 야기할 수 있는 비정적 클러터와 사람의 신호를 구분하기 위하여 타겟의 속도적 특성을 분석하였으며, 이를 정량화하기 위한 지표로 속도 대역폭 파워를 제안하였다. 또한 실험을 통해 90 %

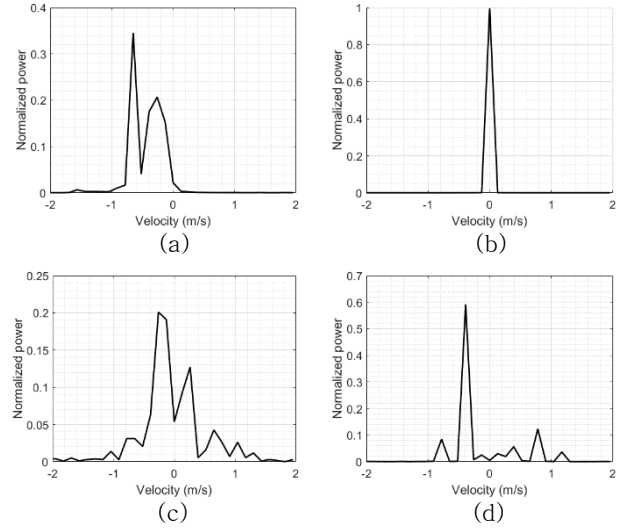


그림 2. 타겟 별 속도 스펙트럼 (a) 걷고 있는 사람, (b) 정지한 사람, (c) 선풍기, (d) 데스크톱 컴퓨터

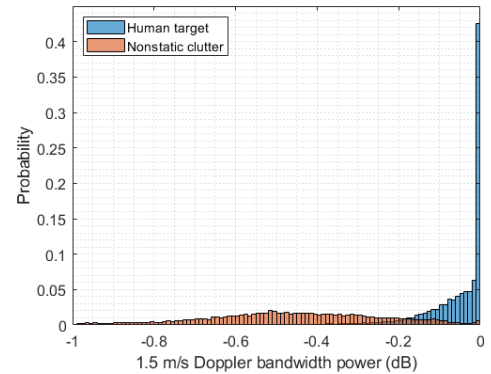


그림 3. 1.5 m/s 속도 대역폭 파워의 히스토그램

이상의 정확도로 신호를 분리할 수 있음을 확인하였다. 추후에는 속도 스펙트럼에서 다양한 지표를 추출하여 머신 러닝 기반 분류를 통해 더욱 향상된 분류 정확도를 달성하고자 한다.

ACKNOWLEDGMENT

이 연구는 2024 년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임(20014098).

참고 문헌

- [1] K. Han and S. Hong, "Detection and localization of multiple humans based on curve length of I/Q signal trajectory using MIMO FMCW radar," *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.*, vol. 31, no. 4, pp. 413-416, 2021.
- [2] C. Wu, Z. Yang, Z. Zhou, X. Liu, Y. Liu, and J. Cao, "Non-invasive detection of moving and stationary human with WiFi," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 33, no. 11, pp. 2329-2342, 2015.
- [3] M. Jankiraman, *FMCW Radar Design*. MA, USA: Artech House, 2018.