

밀리미터파 Bistatic ISAC 테스트베드를 활용한 MUSIC 기반 거리 추정 알고리즘

백승우, 이나경, 김선우
한양대학교 융합전자공학과

{swbaek, nageong2379, remero}@hanyang.ac.kr

MUSIC-based Range Estimation with mmWave Bistatic ISAC Testbed

Seungwoo Baek, Nakyung Lee, and Sunwoo Kim

Department of Electronic Engineering, Hanyang University

요약

본 논문에서는 밀리미터파 OFDM 레이더 기반 고해상도 센싱 및 통신 융합 테스트베드에 대하여 제안한다. 센싱 및 통신 융합 기술에서 제한된 주파수 자원으로 정확한 측위 성능과 높은 통신 성능을 동시에 달성하는 과제를 해결해야 한다. 이를 위하여 본 연구는 밀리미터파 OFDM 레이더를 기반으로 MUSIC 알고리즘을 적용하여 고해상도 센싱 및 통신 융합 테스트베드를 구축하였다. 통신과 센싱에 필요한 주파수를 구분하지 않고, 동일한 OFDM 신호로 통신과 센싱 기능을 동시에 구현하여 기존의 연구와 비교하여 주파수 자원을 효율적으로 활용하였다. 또한, 밀리미터파 대역의 64QAM OFDM 신호를 활용하여 측위 성능과 함께 2 Gbps 이상의 높은 throughput의 통신 성능을 구현하였으며, 미터 단위 이내의 거리 추정 정확도를 달성하였다.

I. 서론

센싱 및 통신 융합 기술, ISAC (Integrated Sensing and Communication)는 군집 드론을 포함한 무인이동체에 활용되어 무선 통신과 레이더 기능을 동일한 장비에 구현하여 설계 비용과 면적을 축소시키는 장점이 있다 [1]. 기존에는 센싱 및 통신 융합 기술의 구현을 위해 통신을 위한 자원과 센싱을 위한 자원을 분리하여 사용하였지만, 본 논문에서는 MUSIC (Multiple Signal Classification)을 적용하여 동일한 자원을 이용하여 통신과 센싱 기능을 모두 구현하였다 [2]. 또한, 제안하는 초해상도 기반의 거리 추정 알고리즘을 적용하여 밀리미터파 대역의 64QAM OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 신호를 기반으로 미터 단위 이내의 센싱 성능과 동시에 2 Gbps 이상의 데이터 속도를 구현하였으며, BPSK와 QPSK 기반으로 OFDM 레이더를 구현한 기존 연구와 비교하여 더 높은 데이터 속도를 달성하였다 [3-5].

II. 시스템 모델

본 논문에서는 송신부와 수신부가 아날로그 빔포밍을 기반으로 동작하는 바이스태틱 OFDM 레이더를 고려하였으며, 밀리미터파 대역에서 동일한 OFDM 신호를 기반으로 센싱과 통신 기능을 동시에 구현하였다. OFDM 신호 심볼의 수 N , 부반송파의 수 L , 다중경로의 수 M 에 대하여 기저대역에서의 OFDM 신호는 식(1)과 같이 표현할 수 있다.

$$x_{\text{OFDM}}(t) = \frac{1}{\sqrt{L}} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{l=0}^{L-1} v_{n,l} w_{n,l} s_{n,l} e^{j2\pi l \Delta f (t - \tau_m)} \quad (1)$$

이 때, v 는 송신부의 빔포밍 벡터이며, w 는 수신부의 빔포밍 벡터, s 는 OFDM에서 변조된 복소수 데이터 신호이며, τ 는 ToA (Time of Arrival)를 의미한다. OFDM 신호에서 심볼의 길이를 T , cyclic prefix의 길이를 T_{CP} 라 할 때 $T_{\text{OFDM}} = T + T_{CP}$ 를 만족한다. 식(2)를 통해 cyclic prefix를 제거하며, 최종적으로 수신신호 x_{RF} 는 중심주파수 f_c 에 대해 식(3)과 같이 표현한다.

$$\text{rect}\left(\frac{t}{T}\right) = \begin{cases} 1, & (0 \leq t < T), \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (2)$$

$$x_{\text{RF}}(t) = x_{\text{OFDM}}(t) \text{rect}\left(\frac{t}{T}\right) e^{j2\pi f_c t} \quad (3)$$



그림 1. 테스트베드 구축 환경

III. 거리 추정 알고리즘

테스트베드에 적용된 MUSIC 기반의 거리 추정 알고리즘은 다중반송파를 이용한 거리 추정 기법을 활용하였다. OFDM 신호에서는 다중반송파 간 주파수 간격이 일정하므로 l 번째 반송파에 대하여 수신 신호를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$x_{\text{Rx}}(l) = \sum_{k=0}^{L_p-1} \alpha_k e^{-j2\pi(f + l\Delta f)\tau_k} + w \quad (4)$$

이 때, L_p 는 다중 경로의 수, α 는 신호 감쇄, τ 는 신호의 ToA, w 는 가우시안 잡음을 의미한다. 데이터 성분을 제거하기 위하여 식 (2)와 같이 수신 신호를 송신 신호 x_{Tx} 로 나눈 뒤 공분산을 구하여 MUSIC 알고리즘을 적용하여 거리를 추정한다 [4].

$$\mathbf{D} = \frac{\mathbf{x}_{\text{Rx}}}{\mathbf{x}_{\text{Tx}}} \quad (5)$$

공분산에 대하여 eigenvalue decomposition을 취한 뒤 eigenvalue가 가장 높은 L_p 개의 vector에 대하여 signal subspace $\mathbf{v}(\tau)$, 그 외의 vector에 대하여 noise subspace \mathbf{P}_w 로 정의한다. Noise subspace와 signal subspace의 성질을 이용하여 $\mathbf{P}_w \mathbf{v}(\tau) = 0$ 을 만족하는 τ 를 OFDM 레이더의 ToA로 추정한다. 이를 위하여 식 (3)과 같이 스펙트럼 함수 $S(\tau)$ 를 정의하여 첨두값을 구한다.

$$S(\tau) = \frac{1}{\mathbf{P}_w \mathbf{v}(\tau)} \quad (6)$$

표 1. 실험 환경 및 변수

변수명	값
중심 주파수 [GHz]	28 GHz
대역폭 [MHz]	800 MHz
FFT 크기	2048
변조 방식	64QAM
샘플링 주기 [GHz]	3.072
송신부 배열 안테나 크기	4 × 4
수신부 배열 안테나 크기	4 × 1
부반송파간 간격[kHz]	75
반전력범폭 [deg]	25

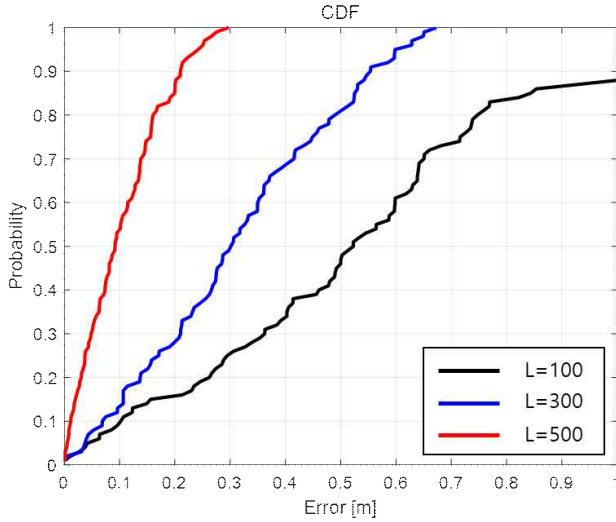


그림 2. 시뮬레이션을 통한 부반송파 수에 따른 거리 추정 결과

IV. 실험 결과

본 테스트베드는 거리 추정을 위하여 MUSIC 알고리즘을 적용하였으며, 실험과 동일한 환경에서 시뮬레이션을 진행한 결과 그림 2와 같은 결과를 도출하였다. 시뮬레이션 결과, 부반송파 수가 300개일 때, 0.3902 [m], 500개일 때, 0.1115 [m]의 MAE (mean absolute error)를 달성하였다. 이를 통해 사용되는 부반송파의 개수를 증가시킨다면, 더욱 정확한 ToA 추정 성능을 구현할 수 있음을 알 수 있다. 실험을 위하여 그림 1과 같이 송신부와 수신부가 구분된 바이스태틱 ISAC 실험 환경을 구축하였으며, 표 1의 조건에서 실험을 진행하였다. 그림 3은 실험을 통하여 MUSIC 알고리즘을 적용해 거리를 추정한 결과이다. 2.1 [m]의 거리에서 송수신부 간의 거리를 측정하였으며, 55개의 부반송파를 적용하였을 때 1.2 [m]로 거리를 추정하여 0.9 [m]의 정확도를 나타내었고, 3.95 [m]의 거리에서 35개의 부반송파로 2.7 [m]로 추정하여 1.25[m]의 오차를 나타내었다.

제안하는 ISAC 테스트베드는 MUSIC 기반으로 통신 신호를 이용하여 통신과 센싱을 위하여 동일한 주파수 자원을 사용하였다. 이로 인해 센싱을 위해 할당했던 주파수로 인해 통신에 할당된 주파수에서 발생하는 ICI (Inter Carrier Interference)가 발생하지 않았다. 또한, 기존의 연구와 달리 주파수축에서 수집한 부반송파 신호만을 이용하여 거리를 추정하였으므로, 시간 축의 심볼 데이터를 요구하지 않아 지연 시간을 개선하였다. 또한, ToA 추정의 편의를 위해 BPSK와 QPSK의 OFDM 신호를 이용했던 기존의 연구와 달리 64QAM의 밀리미터파 신호를 이용함으로써 2 Gbps 이상의 높은 throughput을 구현하였다. [5]와 비교하여 동일한 대역폭을 가졌다고 가정하였을 때, 5.78배 더 높은 throughput을 달성하였다.

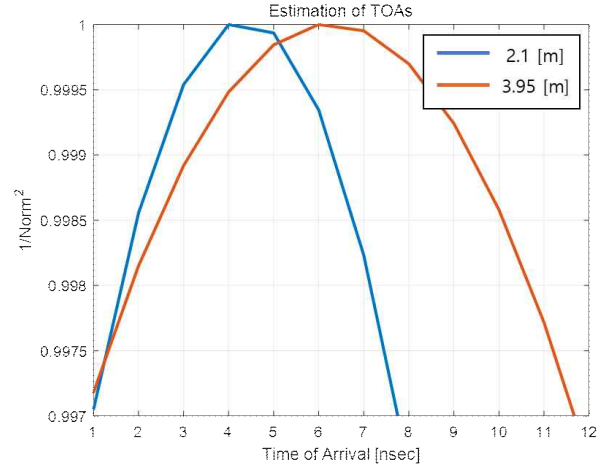


그림 3. MUSIC 기반 OFDM 레이더의 거리 추정 실험 결과

V. 결론

본 논문에서는 IMT-2030의 6G 후보 기술인 센싱 및 통합 기술에 대해 테스트베드를 구현하였으며, 초해상도 기술 기반의 거리 추정 기술을 적용한 고해상도 OFDM 레이더를 제안하였다. 64QAM의 OFDM 신호를 이용하여 미터 단위 이내의 거리 추정하였으며, 동시에 2 Gbps 이상의 높은 데이터 속도를 구현하였는데, 이는 기존의 OFDM 레이더 연구보다 5.78배 높은 결과이다. 향후 송신부에서 조항하는 빔 방향을 변화시키며 송수신부 간의 최단 거리에 대한 거리와 각도뿐 아니라 주변 사물과 지형지물에 대해서도 거리와 각도를 구할 수 있으며, 이를 활용하여 OFDM 레이더 기반의 SLAM (Simultaneous Localization and Mapping)을 구현할 수 있다.

ACKNOWLEDGMENT

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. NRF-2023R1A2C3002890).

참고 문헌

- [1] H. Noh, H. Lee and H. J. Yang, "ICI robust transceiver design for integration of MIMO-OFDM radar and MU-MIMO communication," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 72, no. 1, pp. 821-838, Jan. 2023.
- [2] J. Choi, J. Park, N. Lee and A. Alkhateeb, "Joint and robust beamforming framework for integrated sensing and communication systems," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 23, no. 11, pp. 17602-17618, Nov. 2024.
- [3] E. Rastorgueva-Foi et al., "Millimeter-wave radio SLAM: end-to-end processing methods and experimental validation," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 42, no. 9, pp. 2550-2567, Sept. 2024.
- [4] C. D. Ozkaptan, H. Zhu, E. Ekici and O. Altintas, "A mmWave MIMO joint radar-communication testbed with radar-assisted precoding," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 23, no. 7, pp. 7079-7094, July 2024.
- [5] R. Zhang, B. Shim, W. Yuan, M. D. Renzo, X. Dang and W. Wu, "Integrated sensing and communication waveform design with sparse vector coding: low sidelobes and ultra reliability," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 71, no. 4, pp. 4489-4494, April 2022.