

# 근거리 타깃 감지를 위한 Massive MIMO 안테나 기반 OFDM 레이더 센싱 시스템

문건휘, 박정훈, 이성욱\*, 김성철

서울대학교 전기정보공학부 뉴미디어 통신 공동 연구소, \*중앙대학교 전자전기공학부

{mgh6325, hoon0337, sckim}@maxwell.snu.ac.kr, \*seongwooklee@cau.ac.kr

## Near-Field Sensing in OFDM Radar Systems Using Massive MIMO Array

Moon Gunhwi, Park Jeong-Hoon, Lee Seongwook\*, Kim Seong-Cheol

Department of Electrical and Computer Engineering and INMC, Seoul National University

\*School of Electrical and Electronics Engineering, Chung-Ang Univ.

### 요약

본 논문은 IEEE 802.11ac LTE 20 기반의 orthogonal frequency division multiplexing 신호를 사용하여 실내에서 타깃의 위치를 추정하는 시스템을 제안한다. Massive multiple-input and multiple-output 안테나들을 통해 수신된 channel state information의 spatial diversity를 이용하여 거리 분해능을 향상시켰다. 시뮬레이션 상에서 64개의 수신 안테나 및 4개의 송신 안테나를 배치하였으며, 총 256개의 채널에서 데이터를 취득하였다. 이후, 성능 평가를 위해서 half-power beamwidth 및 root mean square error(RMSE)를 분석하였다. 실험 결과, RMSE가 0.42 cm의 오차를 가짐을 확인하였고, 장축에 대한 거리 분해능 및 단축에 대한 거리 분해능이 각각 2.87 m, 0.16 m임을 확인하였다.

### I. 서론

효율적인 주파수 사용을 위해서 기존의 통신 신호를 이용한 레이더 센싱 시스템에 대한 많은 연구들이 진행되고 있다[1]. 통신 신호를 기반으로 한 레이더 센싱은 단말기의 위치를 보다 정확하게 추정함으로써 높은 빔포밍 이득 및 향상된 프리코딩 성능을 얻을 수 있으며, 이를 통해 향상된 통신 성능을 기대할 수 있다. 그러나 일반적인 실내는 대부분 IEEE 802.11ac에 기반한 액세스 포인트가 분포되어있으며, 신호의 낮은 대역폭으로 인해 레이더 시스템의 거리 분해능이 낮아서 실내환경에서 레이더 센싱을 적용하기에 어려움이 있다[2].

본 논문에서는 orthogonal frequency division multiplexing(OFDM) 기반 channel state information(CSI)를 생성하고 massive multiple-input and multiple-output (MIMO) 안테나로부터 얻는 spatial diversity를 이용하여 점 타깃의 분해능을 높이는 레이더 센싱 시스템을 제안한다. OFDM 신호는 802.11ac LTE 20 기준으로 생성되었고 해당 시스템에서 신호의 거리 분해능은 대략 16 m이다. 총 256개의 송수신 안테나로부터 취득한 CSI의 spatial diversity를 이용하여 근거리에서 타깃을 센싱하는 레이더 시스템을 제안한다. 장축에 대한 거리 분해능 및 단축에 대한 거리 분해능이 각각 2.87 m, 0.16 m임을 확인하였다.

### II. 본론

#### 가. 시뮬레이션 환경 및 파라미터

그림 1은 시뮬레이션 환경을 보여준다. 송수신 안테나로부터 4 m 떨어진 지점으로부터 가로축으로 8 m, 세로축으로 8 m 안으로 랜덤하게 배치하였다. 4개의 송신 안테나 및 64개의 수신 안테나가 사용되었다. OFDM 신호의 대역폭은 18 MHz 이며, 거리 분해능은 16.6 m 이다. 그 외 관련된 파라미터와 그 값들은 표 1과 같다.

표 1. OFDM 레이더 파라미터 및 값

파라미터	값
반송 주파수	3.5 GHz
대역폭	18 MHz
샘플링 주파수	30.7 MHz
Sub-carrier 수	100
심볼 길이	66.6 $\mu$ s
Cyclic prefix 길이	5.21 $\mu$ s
펄스 반복 주기	0.5 ms

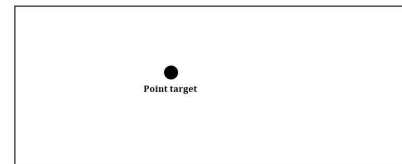


그림 1. 송수신 안테나 및 점 타깃에 대한 배치

#### 나. CSI 신호 모델

수신된 OFDM 신호는 demodulation 과정인 fast Fourier transform (FFT) 과정을 거치고 송신 신호를 나누는 과정인 spectrum division 과정을 통해 CSI 정보를 얻게 된다. 이를 위해선 수신 안테나 단에서 송신 신호를 알고 있다는 가정하며, 이를 수식으로 표현하면 아래와 같다.

$$x(n) = \exp\left(-j\frac{2\pi R}{\lambda}\right) \exp\left(-j2\pi \frac{R\Delta f}{c} n\right) \quad (1)$$

여기서,  $c$ ,  $\lambda$ ,  $T_p$ ,  $\Delta f$ , 그리고  $R$  는 각각 전파속도, 파장, 펄스 반복 주기, sub-carrier 간격 그리고 타깃과 안테나 사이의 거리를 의미한다.  $n = 1, 2, \dots, N$  과  $m = 1, 2, \dots, M$  은 타깃의 거리 및 속도에 해당하는

인덱스를 의미한다.

#### 다. Back-projection 신호 처리

Back-projection은 시간 영역에서 전파 기반 이미지를 생성하는 기법이다. 임의의 위치에 존재하는 타깃과 각 안테나의 거리 식은 아래와 같다.

$$R_{lk}(x, y) = R_k(x, y) + R_l(x, y) \quad (2)$$

여기서,  $R_{lk}$ 은 전파의 이동 경로를 의미하며,  $R_k$ ,  $R_l$ 은 각각  $k$ 번째 송신 안테나와 타깃 사이의 거리 및  $l$ 번째 수신 안테나와 타깃 사이의 거리를 의미하며, 아래와 같이 표현된다.

$$R_k(x, y) = \sqrt{(x - x_k)^2 + (y - y_k)^2} \quad (3)$$

$$R_l(x, y) = \sqrt{(x - x_l)^2 + (y - y_l)^2} \quad (4)$$

여기서,  $x_k$ ,  $y_k$ 은  $k$ 번째 송신 안테나의 위치를 의미하고,  $x_l$ ,  $y_l$ 은  $l$ 번째 수신 안테나의 위치를 의미한다. 식 (2) 좌변을 식(1)에 대입하고, FFT 연산을 통하여 아래와 같은 식을 얻을 수 있다.

$$X_{lk}(i) = \text{sinc}\left(\frac{c}{N\Delta f}i - R_{lk}(x, y)\right) \exp\left(-j\frac{2\pi R_{lk}(x, y)}{\lambda}\right) \quad (5)$$

여기서,  $i = 1, 2, \dots, N$ 는 거리에 대한 인덱스를 의미한다. 이후, 식 (5)의 샘플링 간격을 줄이기 위해서 선형 보간법을 적용하였고, 아래와 같이 표현된다.

$$X_{lk}^q(x^q, y^q) = \text{sinc}\left(\frac{c}{N\Delta f}i - R_{lk}(x^q, y^q)\right) \exp\left(-j\frac{2\pi R_{lk}(x^q, y^q)}{\lambda}\right) \quad (6)$$

여기서,  $x^q$ 와  $y^q$ 는 x, y축에 대해서 선형 보간 된 위치를 의미한다. 아래 이미지는 각 안테나 간에 위치 차이로 발생하는 위상차를 제거하고 모든 채널에 대해서 수신되는 신호를 합하여 구한 이미지이다.

$$I(x^q, y^q) = \left| \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L X_{lk}^q(x^q, y^q) \phi_{lk}(x^q, y^q) \right| \quad (7)$$

여기서,  $\phi_{lk}(x^q, y^q)$ 은 동일한 샘플 간격에 대해서 얻어진 함수이며, 아래와 같이 정의된다.

$$\phi_{lk}(x^q, y^q) = \exp\left(\frac{j2\pi R_{lk}(x^q, y^q)}{\lambda}\right). \quad (8)$$

#### 마. 결과

그림 2는 점 타깃이  $x$ 축으로 -2 m,  $y$ 축으로 8 m 위치하였을 때 얻은 이미지이며, 점 타깃 위치 주변에만 신호가 존재하지 않고 안테나 주변에도 신호가 존재함을 보여준다. 보간 간격은  $x$ ,  $y$ 축에서 각각 0.001 m로 설정하였다. Principal component analysis를 통해 장축과 단축에 대한 회전행렬을 추정 및 곱하여 각 축에 대한 거리 분해능을 추정하였다. 그 결과, 장축에 대한 거리 분해능이 3.01 (m), 단축에 대한 거리 분해능이 0.204 (m)임을 확인하였다. 그림 3은 signal-to-noise ratio(SNR)을 다르게 설정함에 따른 임의의 포지션 오차를 구한 결과이며, SNR이 높을수록 적은 오차를 지니는 것을 보여준다. SNR을 20 dB로 설정하여 10,000번 반복하여 구한 포지션 오차를 확인한 결과, root mean square error(RMSE)가 0.42 cm의 오차를 가짐을 확인하였고, 장축에 대한 거리 분해능이 및 단축에 대한 거리 분해능이 평균 2.87 m 그리고 0.16 m 임을 확인하였다. 해당 결과는 안테나를 공간상에서 다양하게 배치함으로써 근거리에서 향상된 거리 분해능을 얻을 수 있음을 보여준다.

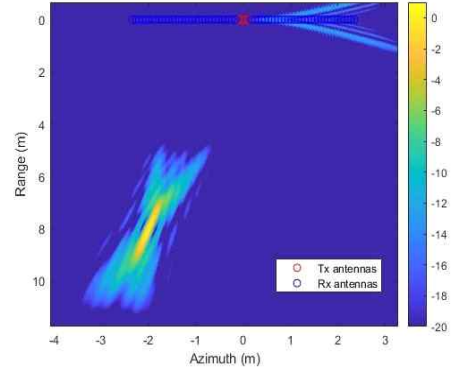


그림 2. 송수신 안테나 및 점 타깃에 대한 이미지

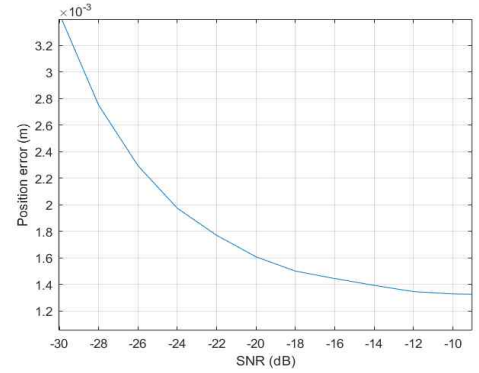


그림 3. SNR에 따른 점 타깃의 추정 위치 오차

#### IV. 결론

본 논문에서는 다수의 안테나 배치 통한 실내 타깃의 위치 추정 기법을 제안한다. 18 MHz 신호의 대역폭을 지니는 OFDM기반 CSI 신호를 이용하여 실내 레이더 센싱을 시뮬레이션으로 구현하였다. 그 결과, RMSE가 0.42 cm의 오차를 가짐을 확인하였고, 장축에 대한 거리 분해능 및 단축에 대한 거리 분해능이 각각 2.87 (m), 0.16 (m)임을 확인하였다. 해당 내용의 신뢰성을 높이기 위해서 다양한 기법을 적용 및 다수의 타깃에 대한 실험을 통해 후속 연구를 진행할 계획이다.

#### ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 삼성전자의 지원(IO210202-08366-01)을 받아 수행된 결과임.

#### 참고 문헌

- [1] Sanson, Jéssica and Gameiro, Atilio, et al. "Comparison of DoA algorithms for MIMO OFDM radar", *IEEE European radar conference*, September, 2018.
- [2] Sakhnini, Adham and De Bast, Sibren, et al. "Near-field coherent radar sensing using a massive MIMO communication testbed" *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 21, 2022.