

# FMCW 레이더 기반 초기 빔포밍 방향 탐색

권진호, 노송<sup>‡</sup>  
인천대학교

{pppe123, songnoh}@inu.ac.kr

## 요약

본 논문은 효율적인 초기 빔포밍(Beamforming) 방향 탐색을 위해 FMCW(Frequency Modulated Continuous Wave)레이더의 센싱 정보를 기반으로 한 빔탐색 방법을 제안한다. 연구에서는 FMCW 레이더를 설계하여 목표 수신기와의 거리 및 DOA(Direction Of Arrival)를 추정하고 이를 이용했을 때의 빔포밍 이득을 추정한다. 이를 통해 제안된 레이더 지원 빔탐색 방법의 성능 이득과 효율성을 시뮬레이션을 통해 분석한다.

## I. 서론

빔포밍은 밀리미터파 이상 대역에서 송신신호를 목표 수신기 방향으로 집중하여 높은 신호전력을 확보하고 전송용량을 높이기 위해서 사용하는 기술로, 이때 송수신단 간의 빔 정렬을 위한 빔방향 탐색이 필수적이다. 기존의 빔방향 탐색 과정은 수신기 방향 탐지를 위해 서로 다른 빔탐색 벡터를 순차적으로 송신하며 테스트하는 것으로, 이러한 방법을 빔스위핑 (Beam sweeping)이라 한다. 빔스위핑 방식은 최적 빔 방향이 변경될 수 있는 동적 환경에서 비효율적일 뿐 아니라 실제 통신 환경에서 대표적인 빔포밍 수신기가 스마트폰 같은 모바일 수신기임을 고려하였을 때, 모바일 수신기가 짧은 시간동안 많은 양의 빔스위핑을 처리해야 한다는 부분에서 현실성이 떨어진다는 단점이 있다. 이를 보완하기 위해 수신단에서의 빔스위핑 효율을 올려주는 PF(Peak Finding) 알고리즘[1]과 LoS(Line of Sight) 경로와 가까운 빔 먼저 탐색하는[2] 알고리즘 등이 연구되었으나, 수신단에서 빔스위핑을 진행해야 한다는 한계는 여전히 존재한다.

본 논문에서는 빔스위핑 과정 없이 센싱 정보를 통해 최적의 빔 정렬을 달성하는 FMCW 레이더 기반 빔탐색 기법을 제안한다.

## II. FMCW 레이더 모듈 설계

FMCW 레이더는 송신신호의 주파수를 정해진 대역폭 구간만큼 선형으로 변조하여 전송한다. 전송한 송신신호는 탐지된 목표 수신기에 반사되어 다시 레이더의 수신 안테나 배열로 돌아오게 되고, 이때 수신신호에는 송신신호에 지연시간(Time delay)와 도플러편이(Doppler shift) 정보가 추가된다. FMCW 레이더는 각 안테나의 수신신호 위상의 차이를 이용해 DOA (Direction Of Arrival)를 추정하고 송신신호와 수신 신호의 주파수 차이를 이용해 목표 수신기와의 거리를 추정한다.

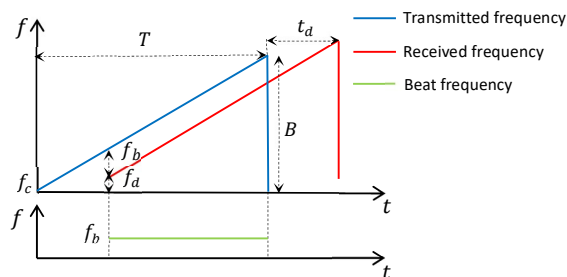


그림 1. FMCW 레이더 주파수 변조

그림 1 에서 FMCW 레이더 신호의 주파수 변조를 나타내었으며, 그림 1 에 포함된 레이더 송·수신 신호의 수식은 다음과 같다.

$$S_t = e^{j2\pi(f_c + \frac{B}{T})t} \quad (1)$$

$$y_t = Ae^{j2\pi(f_c + \frac{B}{T} + f_a)(t - t_d)} + w(t) \quad (2)$$

$S_t$ 는 FMCW 레이더의 송신 신호이고, 반송파 주파수  $f_c$ 와 대역폭  $B$ , 그리고 주파수 변조 구간  $T$ 로 구성된다.  $y_t$ 는 수신 신호이며,  $w(t)$ 는 가산성 백색 잡음(Additive White Gaussian Noise)를 의미한다. 또한  $f_a, t_d$ 는 각각 도플러 편이와 지연 시간을 의미한다.  $A$ 는 감쇄된 진폭으로, 목표 수신기에 반사되어 FMCW 레이더 수신기로 돌아오는 진폭을 의미하는데, 자유공간에서의 레이더 수신 전력 방정식에 기반하여 아래와 같이 계산한다.

$$A = \sqrt{\frac{P_t G^2 \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4}} \quad (3)$$

위의 수식에서  $P_t$ 는 송신신호의 전력,  $G$ 는 안테나 이득,  $\lambda$ 는 송신신호의 파장,  $R$ 은 목표 수신기와의 거리를 의미한다. 안테나 이득  $G$ 의 수식은 개별 안테나 이득  $G_e$ 와 빔포밍 이득  $G_b$ 의 곱( $G = G_e \times G_b$ )으로 구성되며,  $G_e$ 와  $G_b$ 의 수식은 다음과 같다.

$$\begin{cases} G_e = \frac{4\pi}{\lambda^2} \\ G_b = \mathbf{h}^H \mathbf{v} \end{cases} \quad (4)$$

FMCW 레이더의 위상배열 안테나를 ULA(Uniform Linear Array)로 고려하였기에, (4)에서의  $\mathbf{h}$ 와  $\mathbf{v}$ 는 선형 안테나 어레이 응답 벡터(Array response vector)로 다음과 같이 정의된다[3].

$$\begin{cases} \mathbf{h} = \mathbf{u}(\phi) = \begin{bmatrix} e^{j2\pi \frac{d \sin(\phi)}{\lambda} 0} \\ \vdots \\ e^{j2\pi \frac{d \sin(\phi)}{\lambda} (N-1)} \end{bmatrix} \\ \mathbf{v} = \mathbf{u}(\theta) = \frac{1}{\sqrt{N}} \begin{bmatrix} e^{j2\pi \frac{d \sin(\theta)}{\lambda} 0} \\ \vdots \\ e^{j2\pi \frac{d \sin(\theta)}{\lambda} (N-1)} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (5)$$

위의 수식에서  $\phi$ 는 목표 수신기 반사신호의 실제 DOA를 의미하며,  $\theta$ 는 안테나의 초기 설정된 DOA, 혹은 레이더를 통해 추정된 DOA를 의미한다.  $d$ 는 수신 안테나간 거리이며,  $d = \frac{\lambda}{2}$ 로 설정된다. 마지막으로  $N$ 은 수신 안테나의 개수이다.

수식 (2)에서 정의된 수신신호  $y_t$ 는 레이더의 수신 안테나 위치에 따라 신호의 위상이 변하게 되는데,

이러한 위상 변화는 수신 안테나간 거리  $d$  에 따라 다르게 나타난다. FMCW 레이더는 이러한 위상 차이를 이용하여 안테나 영역에서의 FFT 로 목표 수신기의 DOA 를 추정할 수 있다[4].  $k$  번째 안테나의 수신 신호는 아래와 같이 나타난다.

$$y_t^{(k)} = Ae^{j2\pi(f_c + \frac{B}{T} + f_d)(t-t_d)} e^{j2\pi \frac{d \sin(\phi)}{\lambda} (k-1)} + w(t) \quad (6)$$

위의 수식에서 수신한 신호와 수식 (1) 의 송신신호의 주파수 차이를 비트주파수(Beat frequency)로, 비트 주파수 성분을 구하기 위해 시간영역에서 비트신호를  $beat_t = S_t^H y_t^{(k)}$ 로 나타낸다. 비트신호를 구하면 FFT 를 통해 비트주파수  $f_b$  를 특정하고, 이를 통해 목표 수신기와의 거리를 추정할 수 있다.

$$f_b = t_d \frac{B}{T} \quad (7)$$

### III. 시뮬레이션 환경

본 논문에서는 UPA(Uniform Planar Array)를 사용하고 FMCW 레이더 모듈이 탑재된 RSU(Road Side Unit)를 가정한다. 레이더 모듈에서 목표 수신기와의 거리와 DOA를 추정하면, 해당 정보를 기반으로 RSU 는 목표 수신기 방향으로의 빔포밍 이득을 시뮬레이션 한다. 반송파 주파수를 비롯한 시뮬레이션의 주요 설정 값은 아래와 같이 나타내었다.

주요 설정 값	값
반송파 주파수	24 GHz
샘플링 주파수	72 GHz
대역폭	80 MHz
레이더 안테나 개수	10
주파수 변조 구간	1 $\mu$ s
SNR	20 dB
안테나 초기설정 DOA	0°
전파 속도(빛의 속도)	3 $\times$ 10 <sup>8</sup> m/sec
UPA 크기	10 $\times$ 10

표 1. 시뮬레이션 주요 설정 값

### IV. 시뮬레이션 결과 및 결론

II에서 설계한 FMCW 레이더 모듈에서의 센싱 결과를 제시한다. 주파수 변조 구간을 1  $\mu$ s로 설정하였기에, 최대 감지 가능한 거리( $R$ )는 150m이며( $t_d = \frac{2 \times R}{3 \times 10^8}$ ), 유효한 DOA탐지 범위는  $-88^\circ \sim 88^\circ$ 이다. 그림 2와 그림 3에서 레이더 센싱 정보를 나타내었다.

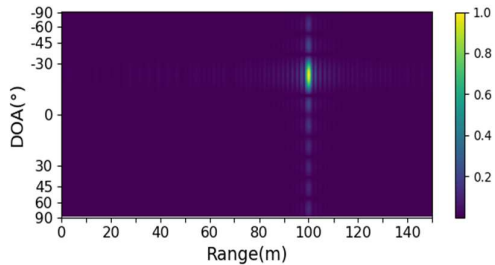


그림 2. FMCW 레이더 센싱 정보 (거리: 100m, DOA:  $-30^\circ$ )

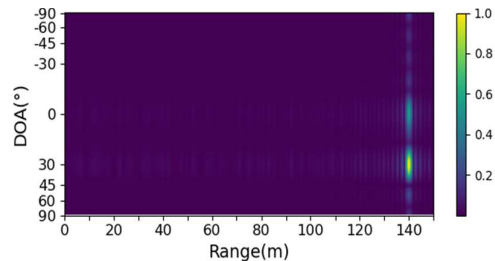


그림 3. FMCW 레이더 센싱 정보 (거리: 140m, DOA:  $30^\circ$ )

그림 2 와 그림 3 의 비교를 통해, 그림 3 에서는 목표 수신기와의 거리 증가에 따른 수신신호의 감쇄가 발생하여 DOA 추정 정확도를 낮추는 것이 보여진다.

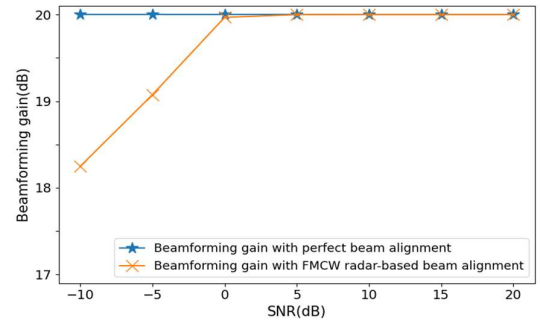


그림 4. SNR 별 빔포밍 이득 (거리: 100m, DOA:  $22.5^\circ$ )

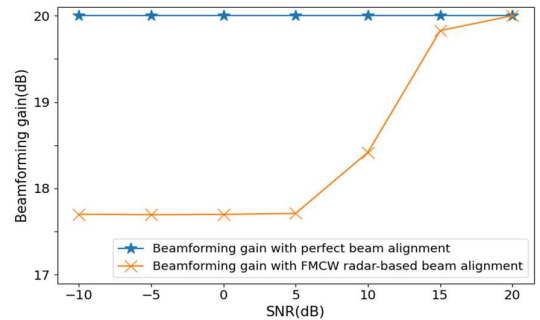


그림 5. SNR 별 빔포밍 이득 (거리: 100m, DOA:  $30^\circ$ )

그림 4 와 그림 5 는 레이더 센싱 정보를 이용하여 RSU 에서 시뮬레이션 한 빔포밍 이득을 검증한다. 대체로 낮은 SNR 에서는 수신신호 감쇄에 따른 DOA 추정의 정확도가 떨어져서 오차가 발생하지만, 15dB 이상 SNR 에서는 실제 수신기 방향으로의 최적 빔포밍 이득과 오차가 크지 않음을 확인하였다. 같은 SNR 임에도 성능에 차이가 있는 것은 수신 안테나의 초기 DOA 에 따른 수신신호 감쇄가 있기 때문이며, 이에 대해서는 상황에 맞는 초기 DOA 설정으로 극복이 가능하다.

본 논문에서는 FMCW 레이더 센싱 정보를 이용한 빔포밍 성능을 분석하며, 이를 통해 빔스위핑 과정이 없는 빔방향 탐색을 검증하였다.

### ACKNOWLEDGEMENT

본 연구는 2022 년도 정부(과학기술정보통신부) 재원으로 한국연구재단의 지원과, 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 대학 ICT 연구센터육성 지원사업의 연구결과로 수행되었음 (과제번호: NRF-2022R1F1A1074 612, IITP-2023-RS-2023\_0025906112182103820101).

### 참고 문헌

- [1] I. Aykin and M. Krunch, "Efficient beam sweeping algorithms and initial access protocols for millimeter-wave networks," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 19, no. 4, pp. 2504-2514, Apr. 2020, doi: 10.1109/TWC.2020.2965926.
- [2] S. Tomasin, C. Mazzucco, D. De Donno and F. Cappellaro, "Beam-sweeping design based on nearest users position and beam in 5G mmwave networks," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 124402-124413, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3006015.
- [3] H. Lee and J. Chun, "Virtual array response vector for angle estimation of MIMO radar with a wide-band interleaved OFDM signal," *IEEE Communications Letters*, vol. 25, no. 5, pp. 1539-1543, May 2021, doi: 10.1109/LCOMM.2021.3049355.
- [4] B.Kim, Y.Jin, J.Lee, S.Kim, "FMCW Radar estimation algorithm with high resolution and low complexity based on reduced search area," *Sensors* 2022, Dec, doi: 10.3390/s22031202