

# Near-target 효과를 고려한 FMCW 레이더 각도 추정 성능 분석

박수민, 박정훈, 김성철

서울대학교 전기정보공학부 뉴미디어 통신 공동 연구소

{s00mn53, hoon0337, sckim}@maxwell.snu.ac.kr

## DoA Estimation Performance Analysis of FMCW Radar Considering Near-target Effect

Su Min Park, Jeong-Hoon Park, Seong-Cheol Kim,

Department of Electrical and Computer Engineering and INMC, Seoul National Univ.

### 요약

본 논문은 다수의 안테나와 광대역 신호를 사용하는 레이더에서 각도 추정 성능의 한계에 대해 분석한다. FMCW 레이더의 각도 해상도를 높이기 위해서는 다수의 안테나를 활용해야 한다. 하지만, 이는 근거리의 타겟으로부터 오는 신호가 plane wave assumption을 위배하게 되어 각도 추정 성능이 열화된다. 이 경우 발생하는 near-target 효과에 대한 새로운 시스템 모델 및 각도 추정 알고리즘의 필요성을 제기한다. 1 GHz의 대역폭을 사용하는 77 GHz 주파수 대역의 frequency modulated continuous wave 레이더 시스템을 기반으로 시뮬레이션을 진행하였으며 수신단의 안테나 개수와 안테나에서 타겟까지의 거리 변화에 따른 각도 추정 성능 변화를 분석하였다. 상대적 피크 파워와 각도 피크에 대한 3dB 빔폭을 각도 추정 성능의 평가 지표로 고려하였으며 near-target 효과에 의해 발생하는 성능 저하를 시뮬레이션을 통해 수치적으로 분석하였다.

### I. 서론

레이더 센서는 날씨와 조명 등 환경적 요인에 안정적이라는 장점 때문에 기상 관측소, 차량, 항공기 등에서 많이 사용되고 있으나 타센서에 비해 해상도가 낮다는 단점이 있다[1]. 이는 넓은 면적의 안테나 배열을 통해 극복하는 추세이다. 하지만 이는 기존의 레이더 신호 모델의 변화를 요하고 특히 plane wave assumption[2]을 위배하여 near-target에 대한 각도 추정 성능이 저하된다. 레이더의 경우 주파수에 따라 감지할 수 있는 거리가 달라진다. 최근 연구에서는 20 m 내의 범위를 탐지하려는 초근거리용 레이더 (Ultra short range radar)의 사용의 증가로, 이를 구현하는 알고리즘이 필요성을 제기한다. 본 논문에는 레이더에서 '근거리' 타겟은 10 m 이내의 거리에 위치한 타겟을 의미한다.

본 논문에서는 frequency-modulated continuous wave (FMCW) 신호 파를 기반으로 하는 레이더 시스템에서의 이상적인 시스템 모델과 near-target 효과를 고려한 시스템 모델을 제시한다. 이를 바탕으로 수신단의 안테나 개수와 안테나로부터 타겟까지의 거리 변화에 따른 각도 추정 성능 변화를 시뮬레이션을 통해 분석한다.

### II. 본론

#### 2.1 Near-target 효과를 고려한 FMCW 레이더 시스템 모델

FMCW 레이더는 전송파의 주파수가 시작 주파수  $f_c$ 에서부터  $\alpha$ 의 기울기로 일정하게 증가하는 신호파를 사용한다. 전송된 신호는 단일 타겟에 반사되어  $\tau$ 시간만큼 지연되어 수신단에 도착하며  $\tau$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\tau = \frac{2R}{c}, \quad (1)$$

여기서  $R$ ,  $c$ 는 각각 안테나에서부터 타겟까지의 거리, 빛의 속력을 나타낸다.

그림 1은 다중 안테나와 근거리 타겟이 위치한 상황에서 안테나 및 타겟

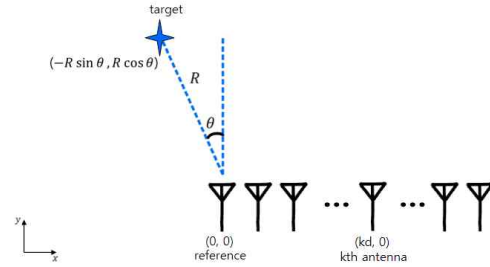


그림 1 안테나 및 타겟의 기하학적 배치

의 기하학적 배치를 나타낸다. 이때 타겟으로부터 반사된 신호는  $k$ 번째 안테나에  $\tau_k$  시간만큼 지연되어 수신되며  $\tau_k$ 는 식 (2)와 같이 표현된다. 이후 수신단에서 혼합된 후 low-pass filter, analog to digital converter를 거친 beat signal은 식 (3)와 같이 표현된다.

$$\tau_k = \frac{\sqrt{(kd - (-R \sin \theta))^2 + (R \cos \theta)^2}}{c}, \quad (2)$$

$$s_b(n, k) = \exp\left\{j2\pi\left(\frac{B\tau_k}{N_s}n + f_c\tau_k - \frac{1}{2}\alpha\tau_k^2\right)\right\}, \quad (0 \leq n \leq N_s), \quad (3)$$

여기서  $\theta$ ,  $n$ ,  $k$ ,  $d$ ,  $B$ ,  $N_s$ 는 각각 기준 안테나와 타겟 사이의 각도, 샘플 인덱스, 안테나 인덱스, 안테나 간 간격, 신호의 대역폭, 한 chirp 내의 샘플 수를 나타내며 안테나는 반파장 거리의 균일한 간격으로 배치되어 있다고 가정한다.

#### 2.2 이상적인 신호 모델을 기반으로 하는 기존 각도 추정

기존 차량용 FMCW 레이더에서는 타겟이 안테나의 총 면적 대비 상대적으로 멀리 있어 ( $\frac{kd}{R} < \frac{Kd}{R} \ll 1$ ) 신호파에 대해 평면파 가정을 만족시

킨다고 가정한다. 이 경우  $\tau_k$ 는 식 (4)과 같이 근사될 수 있다.

$$\tau_k \approx \frac{kd \sin \theta}{c}, \quad (4)$$

이를 (3)에 대입하고, 중심 주파수가 대역폭 대비 충분히 크다고 가정하면 ( $\frac{Bd \sin \theta}{cN_s}nk < \frac{Bd \sin \theta}{c}k \ll \frac{f_c d \sin \theta}{c}k$ ) 이상적인 beat signal은 식 (5)와 같이 표현할 수 있다.

$$s_b[n, k] = \exp\left\{j2\pi\left(\frac{2BR}{cN_s}n + \frac{f_c d \sin \theta}{c}k + \frac{2f_c R}{c}\right)\right\}. \quad (5)$$

이상적인 신호 모델에서  $n, k$ 에 대한 2D-FFT[3]를 통해 타겟의 거리와 각도를 추정할 수 있으며 이때 추정된 각도와 이론적인 각도 분해능은 각각 다음과 같이 계산된다.

$$\hat{\theta} = \begin{cases} \arcsin \frac{\hat{c}k}{Kf_c d}, & \text{if } 0 \leq \hat{k} \leq \lfloor \frac{K}{2} \rfloor \\ \arcsin \frac{c(\hat{k}-K)}{Kf_c d}, & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (6)$$

$$\Delta\theta = \frac{c}{Kf_c d \cos \theta}, \quad (7)$$

안테나 개수가 증가할수록, 중심 주파수가 증가할수록 각도 분해능이 개선되는 것을 수식적으로 확인할 수 있다.

### 2.3 시뮬레이션 및 분석 결과

안테나 개수와 안테나로부터 타겟까지의 거리 변화에 따른 각도 추정 성능 변화 측정 시뮬레이션을 위한 파라미터 설정은 표 1과 같다. 지연 시간과 beat signal은 식 (2), (3)와 같이 설정하였다. 안테나 개수에 따른 각도 추정 성능 변화 시뮬레이션의 경우, 10 m 근방에 있는 타겟에 대해서 40 개부터 300개의 안테나 개수에 따른 각도 추정 성능을 측정하도록 시뮬레이션 하였다. 타겟까지의 거리 변화에 따른 각도 추정 성능 변화 시뮬레이션의 경우, 200개의 반파장에 해당하는 균등한 간격  $d$ 를 가진 안테나 배열에 대해서 안테나로부터 타겟까지의 거리 1 m부터 10 m까지의 상황에서의 각도 추정 성능을 측정하도록 시뮬레이션 하였다.

그림 2은 각각 안테나 개수와 타겟 거리에 따른 상대적 피크 파워, 3 dB 빔폭을 나타낸다. 안테나 개수가 증가함에 따라 relative peak power는 지속적으로 감소하는 양상을 나타냈다. 3dB 빔폭은 안테나 개수가 증가할수록 이상적인 상황 대비 2배 이상의 빔폭을 나타내며, 안테나 개수가 200 개인 상황까지는 감소하여 각도 추정 성능이 향상되는 양상을 보이나 200개를 초과하는 순간 빔폭이 다시 증가하여 각도 추정 성능이 더욱 감소하는 결과를 나타냈다.

타겟 거리가 감소함에 따라 상대적 피크 파워는 감소하며 8.8 m 이하의 타겟거리에서는 0.7 이하의 relative peak power를 나타내어 실질적인 각도 추정이 어려운 상황임을 파악할 수 있다. 타겟 거리가 감소함에 따른 3 dB 빔폭은 이상적인 상황 대비 10배 이상의 값을 가지며 타겟 거리가

파라미터	값
시작 주파수 ( $f_c$ )	77 GHz
대역폭 ( $B$ )	1 GHz
안테나 간격 ( $d$ )	1.935 mm
한 chirp 내 샘플 수 ( $N_s$ )	512

표 1 레이더 파라미터

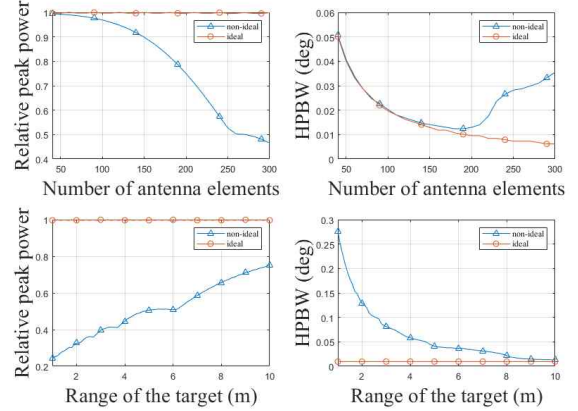


그림 2 안테나 개수, 타겟 거리에 따른 상대적 피크 파워, 3dB 빔폭

감소할수록 빔폭의 증가율도 상승하는 결과를 나타냈다.

### III. 결론

본 논문에서는 1 GHz 대역폭을 가진 77 GHz FMCW 레이더 시스템의 이상적인 상황에서와 near-target 효과를 고려한 시스템 모델을 제시하였다. 각 상황에서 수신단 안테나 개수와 안테나로부터 타겟까지의 거리가 각각 변화함에 따라 변화하는 각도 추정 성능을 시뮬레이션을 통해 수치적으로 분석하였다. 시뮬레이션 결과, 안테나의 개수가 증가할수록, 타겟 거리가 감소할수록 각도 추정 성능은 악화됨을 확인하였다. 추후 연구에서는 기존 연구인 대역폭에 따른 각도 추정 성능 분석과 더불어 near-target 효과로 인해 발생하는 상대적 피크 파워 감소의 원인에 대해 연구하며 이를 보완하기 위한 알고리즘을 제안하고자 한다. 이와 같은 연구는 근거리에 위치한 타겟에 대해 해상도를 높이는 동시에 각도 추정 성능을 높임으로써 레이더의 적용 범위를 더욱 넓힐 수 있을 것으로 기대한다.

### ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by Institute of Information & communications Technology Planning & Evaluation (IITP) under the artificial intelligence semiconductor support program to nurture the best talents (IITP-2023-RS-2023-00256081) grant funded by the Korea government(MSIT)

### 참고 문헌

- [1] S. M. Patole, M. Torlak, D. Wang, and M. Ali, "Automotive radars: A review of signal processing techniques," *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 34, no. 2, pp 22-35, Mar. 2017.
- [2] M. Cui, L. Dai, Z. Wang, S. Zhou and N. Ge, "Near-Field Rainbow: Wideband Beam Training for XL-MIMO," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 22, no. 6, pp. 3899-3912, June 2023,
- [3] Y. Liu, X. Xu and G. Xu, "MIMO Radar Calibration and Imagery for Near-Field Scattering Diagnosis," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 54, no. 1, pp. 442-254, Feb. 2018.