

FMCW 레이더의 2차 위상 보정을 통한 근거리 타겟 각도 추정 성능 분석

한여름, 김지혜, 김성철

서울대학교 전기정보공학부, 뉴미디어통신공동연구소

{ell624, jihyekim224, sckim}@maxwell.snu.ac.kr

Performance Analysis of Angle Estimation for Near Targets Using Second-Order Phase Compensation in FMCW Radar

Yeoreum Han, Jihye Kim, Seong-Cheol Kim

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

요 약

기존 레이더 시스템의 각도 추정은 평면과 가정에 기반하여 수행된다. 하지만 근거리 타겟의 경우 구면파 특성이 두드러지게 나타나 위상 정렬 오차로 인한 각도 추정 성능 저하의 문제점을 가진다. 이를 보완하기 위해 본 논문에서는 FMCW(Frequency Modulated Continuous Wave) 레이더에 기반하여 거리 추정값을 이용한 2차 위상 보정 벡터를 설계하고 이를 이용한 각도 추정 성능의 향상을 정량적으로 분석한다. 또한 다양한 파라미터를 이용한 시뮬레이션을 통해 위상 보정이 효과적으로 나타나는 파라미터의 범위를 분석한다.

I. 서론

FMCW(Frequency Modulated Continuous Wave) 레이더는 좋은 펄스 압축(pulse compression) 성능을 가지며, 타겟의 거리, 속도 및 각도 추정이 가능하여 다양한 응용 분야에서 활용되고 있다.[1] 일반적으로, 레이더 시스템에서는 각도 추정을 위해 평면파 기반 모델이 사용되지만, 근거리 상황에서는 구면파 특성으로 인해 위상 정렬 오차가 발생하며, 이는 각도 추정 성능 저하로 이어진다.[2] 또한 최근 이미징 레이더 기술의 발전으로 안테나의 수가 증가함에 따라 이러한 근거리 타겟의 각도 추정 문제가 대두되고 있다.[3]

이를 보완하기 위하여 근거리 타겟에 대한 수신 신호 모델을 정의하고 위상 정렬 오차를 보정하기 위한 기법들이 제안되어 왔지만 이는 추가적인 계산량을 필요로 한다는 문제점이 존재한다. 따라서 레이더 파라미터와 타겟의 정보를 고려하여 보정이 필요한 경우를 구별함으로써 불필요한 계산량을 줄여 시스템의 효율성을 높일 수 있다.

본 연구에서는 수신 안테나의 개수와 타겟의 거리 및 각도 파라미터에 따른 근거리 위상 보정 효과를 정량적으로 분석한다. 위상 보정 전후 각도 스펙트럼의 피크(peak) 전력을 비교하여 3dB 이상의 피크 전력 이득을 달성할 수 있는 파라미터의 범위를 분석한다.

II. 비트 신호 모델 및 근거리 보정 각도 추정

기존의 레이더 시스템에서는 평면파 가정에 기반한 beat signal 모델을 사용하며, 그 수식은 다음과 같다.

$$y_{beat}(t, n, m) \approx a \exp \left\{ j2\pi \left(\frac{2SR}{c} t + \frac{2T_c v}{\lambda} m - \frac{d \sin \theta}{\lambda} n \right) \right\} \quad (1)$$

표 1 식(1)에 사용된 기호 및 정의

기호	정의	기호	정의
R	타겟 거리	n	안테나 인덱스
v	타겟 속도	m	처프 인덱스
θ	타겟 방위각	a	복소 진폭계수
d	안테나 간격	t	시간
T_c	처프 간격	S	처프 슬로프
c	빛의 속도	λ	처프 파장

이때 사용된 기호에 대한 설명은 표 1에 기술하였다.

반면, 타겟이 근거리에 위치한 경우에는 구면파 특성을 고려하여 안테나 요소 별로 타겟까지의 거리 및 각도의 차이가 발생한다. 거리와 각도의 차이를 n 에 대한 1차 식으로 근사한 beat signal은 다음과 같다.

$$y_{beat}(t, n, m) \approx a \exp \left\{ j2\pi \left(\frac{2S}{c} (R - d \sin \theta) t + \frac{2T_c v}{\lambda} m - \left[-\frac{d}{\lambda} \left(\sin \theta - \frac{d \cos^2 \theta}{2R} n \right) n \right] \right) \right\} \quad (2)$$

이로부터 θ 가 0에 가까운 경우, 즉 타겟의 각도가 안테나 배열의 boresight 방향에 근접할수록 근거리 타겟의 안테나 별 거리 차이에 비하여 각도 차이에 의한 영향이 더 우세하게 나타나는 것을 알 수 있다. 따라서 본 논문에서는 n 에 대한 2차 위상 성분으로 나타나는 각도 차이의 영향을 보정하기 위한 기법을 적용한다.

먼저 beat signal $y_{beat}(t, n, m)$ 을 t 와 m 에 대해 2D FFT를 적용함으로써 거리-속도 도메인 상의 맵을 생성할 수 있다.[1] 여기서 피크 전력이 위치한 bin을 탐지하여 해당 거리-속도 조합에 대응하는 안테나 도메인 신호 $y_{beat}(n)$ 를 추출하고 이로부터 각도 스펙트럼을 계산한다.

근거리 타겟의 각도 추정을 위해 설계된 2차 위상 보정 벡터는 다음과 같다.

$$a_{near}(n, \theta) = \exp \left\{ j\pi \frac{(d \cos \theta)^2}{\lambda \hat{R}} n^2 \right\} \quad (3)$$

이때 \hat{R} 은 거리-속도 맵에서 추정된 타겟의 거리이다. 추출된 $y_{beat}(n)$ 에 보정 벡터 $a_{near}^*(n, \theta)$ 을 곱한 후에 θ 에 대한 방향 벡터를 적용함으로써 2차 위상 보정 각도 스펙트럼을 취득할 수 있다.

그림 1은 기존 각도 추정 기법과 2차 위상 보정 벡터를 이용한 기법의 각도 스펙트럼의 예시를 보여준다. $R=1m, \theta=0^\circ$ 의 근거리 타겟의 경우에, 2차 위상 보정을 통해 약 6 dB 이상의 피크 전력 이득이 발생함을 확인할 수 있다.

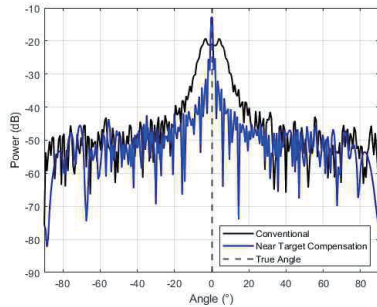


그림 1 각도 스펙트럼($R=1, \theta=0^\circ$)

III. 시뮬레이션 결과 분석

근거리 타겟에 대한 위상 보정 각도 추정 기법의 성능을 정량적으로 평가하기 위해 FMCW 레이다 기반 시뮬레이터를 구현하였으며, 레이다 파라미터는 표 2와 같다. 파라미터 변화에 따른 각도 추정 성능 평가를 위해 안테나 수, 타겟 거리 및 각도를 변화시키며 각도 스펙트럼을 취득하였으며, 위상 보정에 의한 각도 스펙트럼의 피크 전력 이득을 분석하였다.

표 2 시뮬레이션 파라미터 값

기호	파라미터	값
f_c	반송파 주파수	77 GHz
B	대역폭	640 MHz
f_s	샘플링 주파수	10 MHz
N_{sp}	처프당 샘플수	256
N_{di}	처프 개수	128
S	처프 슬로프	25 MHz/ μ s
T_c	처프 간격	35.6 μ s
d	안테나 간격	$\lambda/2$

기본적으로 안테나 개수 N_{ant} 는 96 개, 타겟의 거리 및 각도는 $R=1, \theta=0^\circ$ 을 가정하였으며, 그림 2-4는 그 중 하나의 파라미터를 변화시키며 취득한 그래프들이다. 그림 2에서 안테나 개수를 16 개에서 128 개까지 변화시킨 경우 안테나 개수가 많을수록 위상 보정 효과가 커졌으며, 또한 안테나 수가 64 개 이상일 때 피크 전력 이득이 3 dB 이상의 값을 가졌다. 그림 3에서는 타겟 거리를 1 m에서 5 m까지 변화시켰으며 거리가 작을수록 위상 보정 효과가 크게 나타나는 것을 확인하였다. 또한 타겟 거리가 2 m 이하인 경우에 피크 전력이 3 dB 이상의 이득을 가졌다. 마지막으로 그림 4에서는 타겟 각도를 0° 에서 80° 까지 변화시켰으며, 각도가 0° 에 가까울수록 위상 보정 효과가 크게 나타났다. 또한 타겟 각도가 50° 이하의 조건에서 3 dB 이상의 피크 전력 이득을 가졌다.

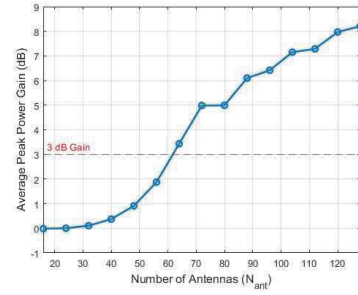


그림 2 안테나 수 변화에 따른 피크 전력 이득

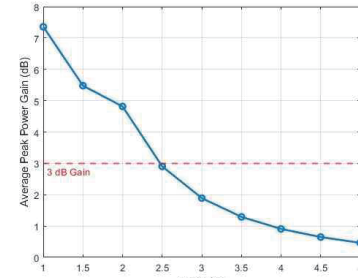


그림 3 타겟 거리 변화에 따른 피크 전력 이득

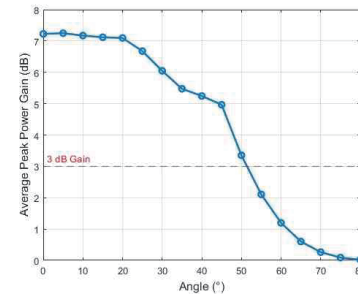


그림 4 타겟 각도 변화에 따른 피크 전력 이득

IV. 결론

본 논문에서는 근거리 타겟의 각도 추정 성능 향상을 위한 2차 위상 보정 벡터를 설계하고, FMCW 레이다 시스템 내에서 해당 기법이 효과적으로 동작하는 파라미터 조건을 분석하였다. 추후 연구에서는 이를 활용하여 효율적인 근거리 타겟 각도 추정 기법에 대한 연구를 진행할 계획이다.

ACKNOWLEDGMENT

이 연구는 2025년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원 (KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임(20014098).

참고 문헌

- [1] A. M. Elbir, K. V. Mishra, and S. Chatzinotas, "Spherical wavefront near-field DoA estimation in THz automotive radar," in *Proc. 18th Eur. Conf. Antennas Propag.*, 2024, pp. 1-5.
- [2] A. Dürr, B. Schneele, D. Schwarz, and C. Waldschmidt, "Range-angle coupling and near-field effects of very large arrays in mm-wave imaging radars," *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, vol. 69, no. 1, pp. 262-270, Jan. 2021.
- [3] H. Jiang, W. Qu, S. Zhang, Y. Dong, P. Wang, and T. Gao, "Near-field 3D imaging technology based on MIMO radar," in *Proc. IEEE 3rd Int. Conf. Frontiers Technol. Inf. Comput.*, IEEE, 2021, pp. 493-499.