

초정밀 센싱을 위한 레이더 기술 개요

김병관

충남대학교

byungkwan.kim@cnu.ac.kr

Overview of Radar Technology for High-Precision Sensing

Byungkwan Kim

Chungnam National University

요약

본 논문은 레이더를 활용한 초정밀 센싱 예시들을 소개한다. 이를 통해 레이더 및 전자파를 통해 현재 달성된 정밀도와 한계점을 파악하고, 6G에서 달성하고자 하는 초정밀 초정밀 센싱을 위해 요구되는 기술적 난이도와 잠재적 문제들에 대해 소개한다.

I. 서론

레이더는 전자기파의 송신과 반사, 수신을 통해 원격으로 물체와의 거리, 속도를 측정하는 시스템으로 알려져 있다. [1] 하지만 레이더는 단순히 물체를 탐지하고 거리를 측정하는 도구를 넘어, 전자기파의 위상 정보를 활용하여 매우 정밀한 측정을 수행할 수 있는 잠재력을 지닌다. 목표물과 레이더 시스템의 위치가 고정되어 있거나 그 상대적 변화가 주요 측정 대상인 고정된 (정적) 환경에서는 위상 기반 레이더 기술이 마이크로미터, 심지어는 서브마이크로미터 수준의 상대 변위 측정 정확도를 달성할 수 있다. 이러한 고정 환경 조건은 초정밀 측정에 있어 제한 요소가 아니라 오히려 가능성을 여는 요소로 작용한다. 목표물의 속도로 인한 도플러 효과의 복잡성이 배제되고, 장시간 측정을 통한 신호 평균화 및 잡음 감소가 용이해지며, 다중 경로와 같은 시스템적 오차가 정적인 특성을 갖게 되어 보정 및 제거가 수월해지기 때문이다.

II. 위상 기반 거리 측정 원리

레이더가 전자기파를 송신하고 목표물로부터 반사된 파를 수신할 때, 파동이 이동한 총 경로는 수신 신호에 송신 신호 대비 위상 변화를 야기한다. 이 기본적인 관계는 정밀 거리 측정의 핵심이다. 레이더에 측정된 목표물까지의 왕복 거리 ($2L$)는 위상차 ($\Delta\phi$)와 레이더 신호의 파장 (λ)에 비례하며, 일반적인 수식은 다음과 같다.

$$L = \left(\frac{\Delta\phi}{2\pi} \right) \cdot \left(\frac{\lambda}{2} \right)$$

여기서 $\lambda=c/f$ (c 는 빛의 속도, f 는 레이더 주파수)이므로, 동일한 위상 측정 정확도 하에서는 더 높은 주파수(더 짧은 파장)가 이론적으로 더 미세한 거리 해상도를 제공할 수 있다. 즉, 고주파(짧은 파장)는 작은 거리 변화에도 큰 위상 변화를 유발하여 민감도를 높이지만, 동시에 비모호 범위 ($\lambda/2$)를 줄여 위상 모호성을 더욱 심화시킬 수 있다.

III. 레이더 기반의 정밀 거리 측정 방식

레이더가 탐지하는 목표물의 위상은 거리 해상도 보다 낮은 정밀한 거리에 의해 결정된다. 이 정밀한 거리의 변화를 통해 레이더는 속도 추정을 진행하며, 위상을 정밀하게 측정할 경우 일반적인 밀리미터파 레이더가 달성할 수 있는 센치미터 정도의 거리 해상도 보다 훨씬 낮은 마이크로

터 수준의 해상도를 달성할 수 있다.

2017년 연구 [2]에서는 위상잡음이 레이더의 주요한 거리 오차의 원인임을 밝혔고, PLL을 통해 위상 잡음 개선을 통해 61GHz 레이더를 통해 10um 미만의 거리 오차를 획득하는 데 성공하였다. 또한, 해당 연구에서는 위상 잡음이 개선되지 않은 122GHz 시스템에서는 같은 방식을 사용하더라도 거리 오차가 100um 가량 발생하는 것을 통해, 위상 잡음의 영향성과 중요성을 확인할 수 있다. 위상 잡음 뿐만 아니라 DC offset도 주된 문제 원인이 될 수 있다. ADC로 수집된 복소수 데이터를 arctangent demodulation을 통해 위상을 추정하게 되는데, DC offset은 위상 정보를 오염시키는 주된 원인이 된다. 이를 보정하지 않을 경우 위상 정보가 오염되어 정밀한 거리 추정이 불가능 하다. [3]

IV. 결론

본 논문은 레이더의 정밀한 거리 추정의 개요를 소개하였다. 레이더의 기본적인 거리 추정은 대역폭에 의해 결정되지만, 정밀한 거리 추정은 정밀한 위상 추정에 의해 가능하다. 하지만 이러한 정밀한 추정 방식은 물체의 움직임, 다중반사 등의 환경적인 요인에 의해 크게 영향을 받기 때문에, 이를 극복하거나 보정할 수 있는 기술이 요구된다고 할 수 있다.

ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by the ICT R&D program of MSIT/IITP. RS-2023-00229541, Development of the next-generation spectrum monitoring platform based on Big-Data & AI technology.

참고 문헌

- [1] Skolnik, M. I. (1962). Introduction to radar. *Radar handbook*, 2, 21.
- [2] Herzel, F., Kissinger, D., & Ng, H. J. (2017). Analysis of ranging precision in an FMCW radar measurement using a phase-locked loop. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 65(2), 783-792.
- [3] Michler, F., Scheiner, B., Reissland, T., Weigel, R., & Koelpin, A. (2021). Micrometer sensing with microwaves: Precise radar systems for innovative measurement applications. *IEEE Journal of Microwaves*, 1(1), 202-217.