

밀리미터파 레이다 기술 동향

김병관

충남대학교

byungkwan.kim@cnu.ac.kr

Millimeter Wave Radar Technology Trends

Byungkwan Kim

Chungnam National University

요약

본 논문은 밀리미터파 레이다를 중심으로 최신 레이다 기술들에 대한 연구 및 개발 동향을 분석한다. 레이다 기술의 기본 이론을 통해 유추할 수 있는 레이다의 장단점과 한계점을 살펴보고, 최근 연구가 집중되고 있는 분산 레이다 시스템에 대해 간략하게 소개한다.

I. 서론

레이다는 눈으로 볼 수 없는 먼 거리에 위치한 물체를 탐지하기 위해 개발된 시스템으로, 무선 송수신기의 반도체 기반 설계기술이 발전되며 차량용 레이다를 시작으로 민간 시장에서의 레이다 응용이 대폭 확대되었다. [1] 전자기파를 송신 및 수신한다는 점에서 무선통신과의 깊은 공통점을 가지지만, 레이다는 무선통신에서의 채널에 의한 원신호의 왜곡에서 정보를 분석하며, 무선통신은 정보를 복원한다는 방향성에서 가장 큰 차이를 지닌다.

II. 레이다 기술의 기초

상기 서술하였듯이, 레이다는 채널에 의한 원신호의 왜곡을 통해 반사되어 돌아오는 신호들의 시간, 주파수, 위상 정보를 통해 처리하는 시스템이다. 통신에서는 비트레이트를 높이고 에러율을 줄이기 위해 다양한 모듈레이션 및 코딩 기법이 적용되는 것처럼, 레이다에서는 거리, 속도, 방향 정보 등을 복원하기 위한 신호의 디자인이 필요하다.

레이다가 거리를 탐지하기 위해 가장 먼저 사용한 기본적인 신호는 사각형 펄스이다. 이는 일반적인 통신 신호 관점에서 보아도 대역폭에 대한 비효율성을 지니고 있듯이, 레이다 관점에서도 물체의 거리 차를 정밀하게 탐지하기 위해서는 짧은 펄스가 필요하게 된다. 레이다는 왕복 경로에 의한 경로손실을 겪기 때문에, 거리에 따른 감쇄가 4제곱을 따라가게 된다. 만약 먼 거리를 사각형 펄스로 탐지하고 싶다면 매우 높은 크기의 신호를 짧은 시간 내에 생성하여야 하는 송수신기가 필요한 것이다. 초기의 레이다 시스템들은 Klystron 등의 Tube형 증폭기를 통해 이를 해결하였지만, 수학적으로 효율적인 방안은 아니라고 할 수 있다. [2]

레이다에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 Pulse Compression 혹은 Linear Frequency Modulation을 도입하였다. 시간에 따라 주파수를 일정하게 변화하는 이 변조방식은 거리에 대한 해상도를 높이면서, 송수신기의 출력 부담을 신호처리단이 거들 수 있게 함으로써 많은 레이다들의 성능 향상에 기여하였다. 레이다에서 이러한 주파수 변조 신호의 복조 방식은 특이하게 두가지 형태로 구현되는데, 첫 번째는 Pulse Compression 이라고 불리는 Matched Filter 형태이다. 일반적인 Convolution 으로 구현

되는 Pulse Compression은 상대적으로 대역폭에 비례한 높은 A/D 컨버터를 필요로 하지만, 그 과정에서 SNR 이득을 취할 수 있어 대부분의 현재 레이다 시스템에서 채택된 방식이다. 두 번째 방식은 FMCW 라고 알려진 레이다의 De-chirp 에 의한 복조 방식이다. FMCW 레이다는 송신 파형의 경우 LFM 레이다와 동일하지만, 복조 과정이 송신 신호의 복제본을 커플러로 통해 생성하고, 그 신호를 믹서를 통해 수신 신호와 합성한다. 즉, 아날로그 수신기 단에서 FMCW는 복조를 수행하기 때문에 SNR 적으로는 펄스 압축에 비해 불리한 점이 있지만, 송수신기의 구조가 간단해지며 매우 낮은 A/D 컨버터를 통해 구현된다는 점이 장점으로 꼽힌다.

현재 운용중인 대부분의 레이다는 상기 소개한 세가지 펄스(사각파), LFM(펄스압축), FMCW 방식의 레이다가 비용과 목적에 맞게 운용되고 있다. 그 외에 근거리 탐지를 목적으로 한 UWB 레이다도 존재하지만, 기본적인 동작 원리는 유사한 부분이 많아 본 논문에서는 생략하고자 한다.

III. 레이다 기술의 최근 동향

기존 방위산업에 적용되는 레이다는 다양한 위치에 있는 목표물을 탐지 및 추적하기 위해 AESA(Active Electronically Scanned Array)를 기반으로 성능이 발전되어 왔다. AESA 레이다는 수천개의 송수신기를 통해 아날로그 빔포밍을 수행하였으며, 수많은 송수신기 간의 동기화 및 검보정, 빔스케줄링, 추적 알고리즘 등의 높은 기술적 난이도를 가지고 있다. 시대가 흐르며 디지털 빔포밍, 하이브리드 빔포밍 등의 빔포밍 기술이 발전함에 따라, 레이다도 AESA 외의 빔포밍 전략이 등장하게 된다. 그 중 대표적인 기술은 무선통신과 유사한 시기에 등장한 MIMO 레이다이다. 레이다에서 MIMO는 통신과 동일하게 송수신기 안테나의 개수가 복수 개라는 점은 동일하지만, 레이다에서는 큰 두가지 분류가 존재한다. 기본적으로 대부분의 레이다는 Monostatic, 즉 송수신기가 같은 위치에 존재하는 경우이지만, 특수 목적으로 설계된 레이다는 여러 위치에 송수신기를 분산 배치할 수 있다. 이러한 레이다는 Multistatic MIMO라고 분류하여 설명하고 있다. [3]

밀리미터파 레이다에서는 Monostatic 혹은 Colocated MIMO를 대부분의 응용기술이 사용하고 있으며, 그 목적은 MIMO를 통해 디지털 빔포밍

을 수행하여 방향을 탐지하기 위함이다. 어떠한 직교성이던 신호에 추가하게 되면, 확보한 직교성의 수 만큼 상대적인 샘플링을 추가로 하게 되어 속도 추정의 샘플링 간격이 늘어나게 되어 속도 추정에서의 불리함을 가지게 된다. 그럼에도 불구하고 MIMO 레이다는 송수신기의 실제 개수에 비해 디지털 빔포밍의 해상도를 훨씬 높일 수 있는 Virtual array 기술을 통해 많은 분야에서 활용되고 있다.

레이다 기술의 초기에도 Code 기반의 신호 활용이 있었지만, MIMO 레이다를 시점으로 통신에서 활용되는 많은 Multiplexing 기법 및 Code 기반의 접근이 활발히 도입되었으며, PRN(Pseudo-random Noise)를 기반으로 하는 PMCW 레이다, OFDM 레이다 등이 등장하였다. 이러한 레이다는 통신에 활용되는 송수신기와 높은 호환성, 레이다 간 간섭에서 적은 영향등의 장점이 존재하지만, FMCW 에 비해 높은 시스템 복잡도 및 높은 신호처리 비용 등이 여전히 존재한다.

어떠한 신호를 사용하던 간에 Monostatic 레이다의 가장 큰 한계점 중 하나는 신호가 반사되어서 다시 레이다로 돌아와야 한다는 것이다. 목표물의 형태 및 재질에 의해 산란현상 등이 발생하게 되면 레이다는 탐지할 수 있는 방법이 없다. 대표적인 예시로 탄두의 머리 등이 있는데, 측면이나 특정 방향으로 반사파가 집중되는 목표물은 Monostatic 레이다로 탐지할 수 없다. 이러한 한계점을 극복하기 위해 등장한 Multistatic 레이다는 현재 분산(Distributed) 레이다로 발전하였으며, 2021년 NRL (Naval Research Laboratory)에서 발표한 FlexDAR를 통해 관심 받기 시작하였다. 분산 레이다는 넓은 영역을 각지에 배치된 송수신기를 통해 탐지할 수 있고, 스텔스기와 같은 특이한 목표물도 탐지할 수 있다는 장점이 있지만, 떨어진 송수신기 간의 높은 동기화 정확도 및 신호처리의 어려움이 존재하여 많은 연구가 필요로 하는 상황이다.

레이다가 반사파가 수신할 수 없는 목표물과 환경에서도 탐지가 가능하다는 분산 레이다는 이 외에도 추가적인 장점을 가지고 있는데, 이는 레이다의 Radial한 특성과 빔포밍의 원리에서 찾을 수 있다. 레이다는 아날로그 혹은 디지털 빔포밍을 통해 거리와 각도(방향)를 탐지하게 되는데, 이 각도는 거리가 멀어질수록 절대적인 직교 좌표계에서의 위치 정확도는 떨어질 수 밖에 없다. 분산레이다는 서로간의 원형 좌표계를 교차하여 합성함으로써 단일 레이다보다 공간적인 해상도를 개선할 수 있으며, 이러한 장점에 힘입어 자율주행과 같은 민간 분야에서도 분산 레이다와 유사한 컨셉의 제품들이 Texas Instruments (AWR2544) 및 NXP (SAF86xx)에서 2024 CES에서 발표되었다. 민간 분야에서는 동기화에 대한 제약이 없으므로 시스템을 간단하게 구성하고, 신호처리를 통해 해상도에 대한 장점만 확보함으로써 기존의 레이다가 제공할 수 없는 탐지 성능을 제공하고자 하고 있다.

IV. 결론

본 논문은 레이다의 기본 원리와 그동안의 기술 발전, 최근 기술 동향을 살펴봄으로써 레이다의 특성, 장단점, 한계점을 요약하였다. 레이다는 전자기파를 송수신하고, 이를 기반으로 신호처리를 수행하는 시스템이므로 ISAC(Integrated Sensing and Communication) 과 같은 형태로 무선통신과 함께 발전이 가능한 기술이다. 레이다의 기술 발전 동향을 분석함으로써 ISAC 및 6G 표준 연구에 참고지표가 될 수 있으리라 생각한다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2024년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (2020-0-00878, 레이다 주파수 이용효율화를 위한 핵심기술 개발)

참 고 문 헌

- [1] Waldschmidt, C., Hasch, J., & Menzel, W. (2021). Automotive radar –From first efforts to future systems.*IEEE Journal of Microwaves,1*(1), 135–148.
- [2] Skolnik, M. I. (1962). Introduction to radar.*Radar handbook,2*, 21.
- [3] Fishler, E., Haimovich, A., Blum, R., Chizhik, D., Cimini, L., & Valenzuela, R. (2004, April). MIMO radar: An idea whose time has come. In*Proceedings of the 2004 IEEE Radar Conference (IEEE Cat. No. 04CH37509)*(pp. 71–78). IEEE.