

PMCW 시스템에서 속도 모호성 해결을 위한 개선된 시퀀스 누적 기법

조선민, 이성우

중앙대학교 전자전기공학부

tjsals4514@cau.ac.kr, seongwoolee@cau.ac.kr

Improved Sequence Accumulation for Resolving Velocity Ambiguity in PMCW Systems

Seonmin Cho, Seongwook Lee

Chung-Ang Univ.

요약

기존의 Phase-modulated continuous wave 시스템에서 사용되는 시퀀스 누적 기법은 계산 복잡도를 줄여 실시간 처리를 용이하게 하지만, 최대 탐지 속도의 제한과 속도 모호성 문제를 야기한다. 본 논문에서는 이러한 한계를 극복하기 위해 도플러 보상 기반의 개선된 시퀀스 누적 기법을 제안한다. 제안된 기법은 도플러 보상을 통해 탐색 범위를 조정하고 시퀀스 간 위상 차이를 보정함으로써, 속도 모호성을 해결하고 타깃 탐지 성능을 향상시킨다. 시뮬레이션을 통해 제안된 기법이 기존 기법과 유사한 연산 복잡도를 유지하면서도, 최대 탐지 속도를 초과하는 타깃에 대해 향상된 탐지 성능을 제공함을 검증하였다.

I. 서론

Integrated sensing and communications (ISAC) 시스템은 단일 하드웨어에서 센싱과 통신을 동시에 수행함으로써 주파수 자원을 효율적으로 관리하고 비용 효율적인 시스템이다. Phase-modulated continuous wave (PMCW) 기술은 연속적인 위상 변조 신호를 사용하여 높은 센싱 성능 및 데이터 전송률을 제공하며, ISAC 시스템의 핵심 기술로 주목받고 있다.

PMCW 시스템에서는 타깃의 거리와 속도 정보를 추출하기 위해 상관 관계 분석 및 고속 푸리에 변환에 활용된다. 그러나 이러한 신호처리 방식은 높은 연산량으로 인해 실시간 처리에 제약이 있었고, 이를 해결하기 위한 방안으로 여러 개의 시퀀스를 누적하여 신호를 처리하는 누적 기법이 도입되었다. 기존 시퀀스 누적 기법은 연산량을 줄이는 데는 효과적이었으나, 최대 탐지 속도의 제약과 속도 모호성을 초래하는 새로운 문제를 야기하였다. 따라서, 본 논문에서는 이러한 한계를 극복하기 위한 새로운 시퀀스 누적 기법을 제안한다.

II. 본론

가. PMCW 시스템에서의 타깃 감지를 위한 신호 처리 원리

PMCW 신호는 그림 1과 같이 0과 1로 구성된 이진 시퀀스의 값에 따라 캐리어 신호의 위상을 0° 또는 180° 로 변조하여 송신된다. 송신된 신호는 타깃에 반사되어 수신되며, 수신된 신호에는 타깃의 움직임으로 인한 시간 지연 및 도플러 효과가 포함된다.

수신 신호는 그림 2와 같이 저역통과필터를 거쳐 기저대역 신호로 하

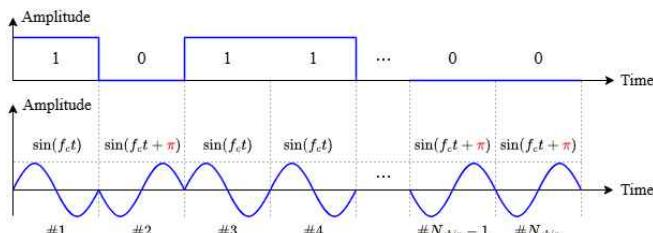


그림 1. PMCW 시스템에서의 송신 신호

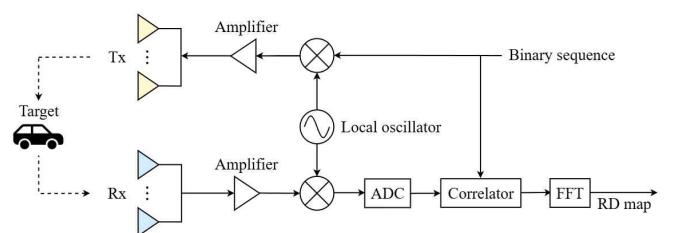
향 변환되며, 이후 아날로그-디지털 변환기를 통해 시간 영역에서 샘플링 된다. 이렇게 샘플링된 2차원 수신 신호는

$$x[m, l] = Ac[m - m_0] \exp\{j2\pi(f_D T_S l + f_D T_C m + \Phi)\} \quad (1)$$

와 같이 표현될 수 있다. 여기서 m 은 칩 인덱스, l 은 시퀀스 인덱스, T_C 는 칩 지속 시간, T_S 는 시퀀스 지속 시간, m_0 는 지연 인덱스, f_D 는 도플러 주파수를 나타내며, A 는 진폭, c 는 이진 시퀀스 값(0 또는 1), Φ 는 초기 위상을 나타낸다. 이때, 수신된 2차원 신호는 칩 축을 기준으로 송신 신호와의 상관 관계 분석을 통해 타깃의 거리를 추정하며, 시퀀스 축을 기준으로 고속 푸리에 변환을 적용하여 타깃의 속도를 추정한다.

나. 기존 시퀀스 누적 기법의 한계

기존 신호처리 방식은 속도 추정을 위해 모든 시퀀스에 대해 고속 푸리에 변환을 적용해야 하며, 이로 인해 $O(M_1 M_2 \log_2(M_1 M_2))$ 의 연산량을 필요로 한다. 여기서 M_1 은 칩의 개수, M_2 는 시퀀스의 개수를 나타낸다. 이러한 높은 연산량은 실시간 처리에 있어 큰 제약으로 작용한다. 이를 개선하기 위해, 단일 시퀀스 간의 위상 차이를 계산함으로써, 고속 푸리에 변환을 적용해야 하는 시퀀스의 수를 줄여 연산량을 $O(M_1 M_2 \log_2(M_2))$ 로 감소시켰다. 이는 기존 방식에 비해 연산량을 크게 줄이는 데는 성공했으나, 다음과 같은 새로운 문제점을 야기하였다. 그림 3은 기존 시퀀스 누적 방식을 적용한 경우의 거리 및 속도



* ADC: Analog-to-digital converter. FFT: Fast Fourier transform. RD: Range-Doppler

그림 2. PMCW 시스템의 개략적인 블록도

프로파일을 보여준다. 누적 기법을 적용하면 시퀀스가 누적됨에 따라 속도 추정을 위한 샘플링 해상도가 감소하고, 이에 따라 최대 탐지 속도가 $1/N$ 로 축소된다. 여기서 N 은 누적된 시퀀스의 개수를 의미한다. 그림 3(a)의 속도 프로파일에서 확인할 수 있듯이, 최대 탐지 속도를 초과하는 타깃의 경우 속도 모호성이 발생한다. 또한, 속도 모호성이 발생한 타깃은 거리 프로파일에서도 낮은 신호 세기를 갖게되며, 이는 타깃 탐지를 어렵게 만드는 주요 요인으로 작용한다. 이에 본 논문은 기존 시퀀스 누적 기법에서 나타나는 속도 모호성 문제를 해결하기 위한 개선된 시퀀스 누적 기법을 제안한다.

다. 제안하는 개선된 시퀀스 누적 기법

본 연구에서 제안하는 개선된 시퀀스 누적 기법은 네 단계로 이루어진다. 첫 번째 단계에서는 도플러 보상을 통해 탐지 범위를 유동적으로 조정한다. 두 번째 단계에서는 도플러 보상을 통해 설정된 조건 하에서 각 시퀀스 그룹에 대해 고속 푸리에 변환을 수행한다. 세 번째 단계에서는 고속 푸리에 변환 결과를 누적하기에 앞서, 도플러 편이에 의해 발생하는 시퀀스 간 위상 차이를 계산하고 이를 보정한다. 마지막으로, 보정된 값을 누적하여 도플러 편이에 의한 오차를 최소화하고 타깃 신호의 세기를 극대화한다. 제안된 기법의 핵심은 고속 푸리에 변환을 적용하기 전 단계에서 도플러 보상을 수행하여 속도 탐지 범위를 조정하는 것이다. 이를 위해 임의로 위상을 부여하여 각 시퀀스에서 나타나는 도플러 이동을 상쇄하거나 보정한다. 이 과정은 탐지 범위를 확장하여, 기존 방식에서 최대 탐지 속도를 벗어나는 타깃도 탐지가 가능하도록 한다. 또한, 시퀀스를 누적하기 전에, 누적하고자 하는 시퀀스 간의 도플러 편이에 의해 발생하는 위상 차이를 계산하고 이를 보정한다. 이 과정은 도플러 편이에 의해 발생하는 오차를 최소화하며, 이후 누적 과정을 통해 타깃 신호의 세기를 더욱 선명하게 한다.

그림 4는 제안된 시퀀스 누적 방법을 적용한 경우의 속도 및 거리 프로파일을 나타낸다. 속도 프로파일에서는 기존 방식에서 발생했던 속도 모호성이 제거되었음을 확인할 수 있다. 또한, 거리 프로파일에서는 속도 모호성이 발생한 타깃 신호의 세기가 기존 방식 대비 크게 증가했음을 확인할 수 있다. 나아가, 그림 5는 그림 4의 거리 프로파일에 Constant false alarm rate (CFAR) 알고리즘과 같은 자동 타깃 탐지 알고리즘을 적용한 결과이다. 이를 통해 기존 방식에서 속도 모호성으로 인해 타깃 신호의 세기가 낮아 탐지가 어려웠던 타깃도 제안된 방식에서는 효과적으로 탐지할 수 있음을 확인할 수 있다.

마지막으로, 연산량 분석을 통해 제안된 방법의 계산 효율성을 확인하

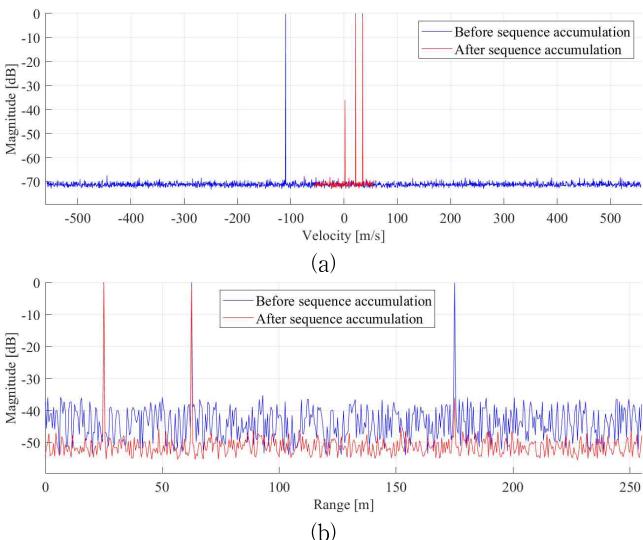


그림 3. 기존 시퀀스 누적 기법의 (a) 속도 및 (b) 거리 프로파일

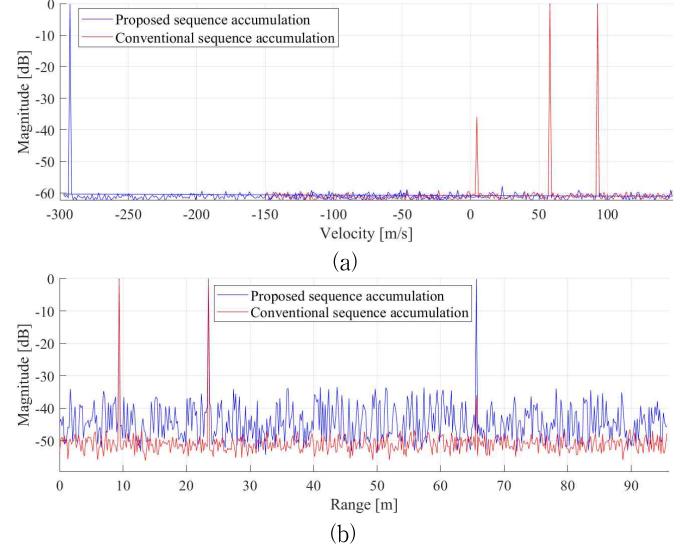


그림 4. 제안한 시퀀스 누적 기법의 (a) 속도 및 (b) 거리 프로파일

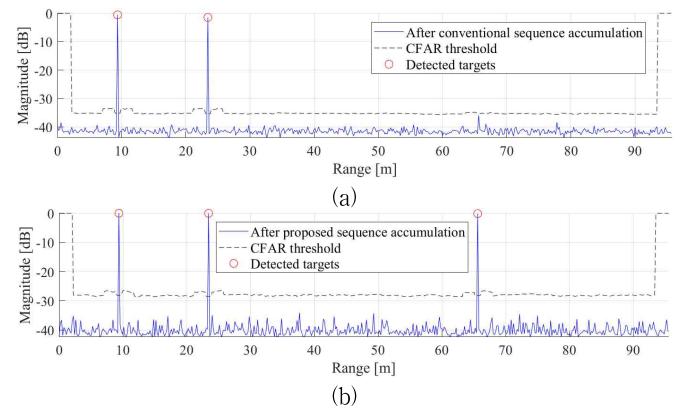


그림 5. 거리 프로파일 기반 타깃 탐지 결과: (a) 기존 시퀀스 누적 기법, (b) 제안된 시퀀스 누적 기법을 활용한 탐지 결과

였다. 거리-속도 맵을 형성하는 과정에서 누적 전, 후, 제안된 기법 각각의 단일 알고리즘 실행 시간은 0.11초, 0.015초, 0.02초로 측정되었다. 제안된 방법은 기존 시퀀스 누적 방식과 유사한 계산량을 유지하면서도, 누적 적용 전과 비교하여 약 80%의 계산량 감소를 달성하였다. 이를 통해, 제안된 방법은 높은 계산 효율성과 속도 모호성 문제 해결이라는 두 가지 목표를 성공적으로 충족시켰음을 확인할 수 있었다.

III. 결론

본 논문에서는 PMCW 시스템에서 발생하는 속도 모호성 문제를 해결하기 위해 개선된 시퀀스 누적 기법을 제안하였다. 제안된 기법은 도플러 보상을 통해 탐지 범위를 유동적으로 조정하고, 시퀀스 간 위상 차이 보정을 통해 타깃 신호의 세기를 향상시킴으로써 기존 방식의 한계를 극복하였다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 지원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. RS-2024-00405510)

참 고 문 헌

- [1] D. Guermandi *et al.*, "A 79-GHz 2×2 MIMO PMCW radar SoC in 28-nm CMOS," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 52, no. 10, pp. 2613–2626, October 2017.