

ISAC 시스템을 위한 다양한 파형 및 변조 방식에 관한 성능 분석

조선민, 박찬울, 이성욱

중앙대학교 전자전기공학과

tjsals4514@cau.ac.kr, qkrcksdnf97@cau.ac.kr, seongwooklee@cau.ac.kr

Performance Analysis of Various Waveforms and Modulation Schemes for ISAC Systems

Seonmin Cho, Chanul Park, Seongwook Lee

Chung-Ang Univ.

요약

본 논문은 Integrated sensing and communications (ISAC) 시스템을 위해 제안된 주요 파형 및 변조 방식들에 대한 성능 분석을 제공한다. 단일 반송파 기반의 Chirp sequence와 Phase-modulated continuous waveform은 다중 반송파 변조 방식에 비해 향상된 거리 추정 성능 및 도플러 강인성을 제공하여 센싱 중심의 ISAC 시스템에 적합하다. 반면, Orthogonal frequency-division multiplexing, Orthogonal chirp-division multiplexing, Orthogonal time-frequency space 기반의 다중 반송파 변조 방식은 높은 데이터 전송률을 제공하므로 통신 중심의 ISAC 시스템에 적합하다.

I. 서론

Integrated sensing and communications (ISAC) 시스템은 단일 파형과 하드웨어 플랫폼을 사용하여 센싱과 통신 기능을 동시에 수행함으로써 주파수 자원의 효율적 활용을 가능하게 한다. ISAC 시스템을 구현하기 위해 다양한 파형 및 변조 방식들이 제안되었으나, 아직까지 표준화된 접근 방식은 확립되지 않았다. 본 논문에서는 ISAC 시스템을 위해 제안된 다섯 가지 대표적인 파형 및 변조 방식을 소개한다. 나아가 각 파형에 대해 센싱 및 통신 측면에서의 이론적 성능을 평가하고, 이를 바탕으로 ISAC 시스템의 파형 설계를 위한 핵심 고려사항을 논의한다.

II. 본론

가. ISAC 시스템을 위한 파형 및 변조 방식

본 절에서는 ISAC 시스템을 위해 제안된 대표적인 파형 및 변조 방식인 Chirp sequence (CS), Phase-modulated continuous waveform (PMCW), Orthogonal frequency-division multiplexing (OFDM), Orthogonal chirp-division multiplexing (OCDM), Orthogonal time-frequency space (OTFS)를 소개한다.

CS 파형은 시간에 따라 주파수가 선형적으로 변화하는 처프 신호를 반복적으로 송신하며, CS 기반 ISAC 시스템에서 m 번째 처프 블록에 해당하는 송신 신호는

$$x^{\text{CS}}(t) = A \sum_{m=0}^{N_{\text{cp}}-1} s_m^{\text{CS}} e^{j(2\pi f_c t + \pi \mu t^2)} p(t - m T_{\text{cp}}) \quad (1)$$

과 같이 표현될 수 있다. 여기서 A , N_{cp} , s_m^{CS} , f_c , T_{cp} , μ , $p(\cdot)$ 는 각각 송신 신호의 진폭, 처프 수, m 번째 데이터 심볼, 반송파 주파수, 처프 지속 시간, 처프 기울기, 사각 펄스 함수를 나타낸다. CS 신호의 복조 과정은 수신 신호를 송신 신호와 혼합한 후 저역 통과 필터를 거쳐 비트 주파수를 추출하는 방식으로 이루어진다. 이때 비트 신호만을 샘플링함으로써 아날로그-디지털 변환기의 샘플링률을 낮출 수 있으며, 이는 광대역 시스템에서의 효율적인 운용을 가능하게 한다.

PMCW는 데이터 심볼을 이진 확산 코드로 변조함으로써 신호를 주파수 영역에서 확산시키는 직접 시퀀스 확산 스펙트럼 방식에 기반한다.

PMCW 기반 ISAC 시스템에서 m 번째 시퀀스 블록에 대한 송신 신호는

$$x^{\text{PMCW}}(t) = A \sum_{m=0}^{N_{\text{seq}}-1} s_m^{\text{PMCW}} \sum_{n=0}^{N_c-1} c_n e^{j2\pi f_c t} p(t - m T_{\text{seq}} - n T_c) \quad (2)$$

와 같이 표현될 수 있다. 여기서 N_{seq} , s_m^{PMCW} , N_c , c_n , T_{seq} , T_c 는 각각 시퀀스 블록 수, m 번째 데이터 심볼, 단일 시퀀스 내 칩 수, 이진 시퀀스의 n 번째 칩 값, 시퀀스 지속 시간, 칩 지속 시간이다. PMCW 시스템은 수신단에서 상관 연산을 통해 원하는 신호 성분만을 효과적으로 분리함으로써 잡음 및 간섭에 대한 강인성을 제공하며, 이를 위해 높은 자기상관과 낮은 상호상관 특성을 갖는 이진 확산 코드의 설계가 요구된다.

OFDM은 전체 대역폭을 다수의 부반송파로 분할하여 전송하는 다중 반송파 변조 방식이다. 각 부반송파는 서로 독립적인 데이터 심볼로 변조되며, 부반송파 간격을 심볼 지속 시간의 역수로 설정함으로써 부반송파 간의 직교성을 확보한다. OFDM 기반 ISAC 시스템에서 m 번째 심볼에 대한 송신 신호는

$$x^{\text{OFDM}}(t) = A \sum_{m=0}^{N_{\text{sb}}-1} \sum_{n=0}^{N_{\text{sc}}-1} s_{n,m}^{\text{OFDM}} e^{j2\pi(f_c + n \Delta f)t} p(t - m T_{\text{sb}}) \quad (3)$$

과 같이 표현된다. 여기서 N_{sb} , n , N_{sc} , $s_{n,m}^{\text{OFDM}}$, Δf , T_{sb} 는 각각 심볼 수, 부반송파 인덱스, 부반송파 수, m 번째 심볼의 n 번째 부반송파에 할당된 데이터 심볼, 부반송파 간격, 심볼 지속 시간이다. 각 부반송파의 대역폭이 채널의 상반 대역폭에 비해 충분히 작으므로, 개별 부반송파는 주파수 평탄 페이딩을 겪는 것으로 근사할 수 있다. 이는 채널 등화를 단순화하며 주파수 선택적 페이딩 환경에서도 안정적인 통신을 가능하게 한다.

OCDM은 동일한 대역폭 내에서 다수의 처프 파형을 사용하는 다중 반송파 변조 방식이다. OCDM에서는 주파수 영역에서 서로 다른 2차 위상 회전을 적용함으로써 각 처프 신호 간의 직교성을 확보한다. OCDM 기반 ISAC 시스템에서 m 번째 심볼에 대한 송신 신호는

$$x^{\text{OCDM}}(t) = A \sum_{m=0}^{N_{\text{sb}}-1} \sum_{n=0}^{N_{\text{sc}}-1} s_{n,m}^{\text{OCDM}} e^{j2\pi f_c t} e^{j\pi \frac{N_{\text{sc}}}{T_{\text{sb}}^2} \left(t + \frac{n}{N_{\text{sc}}} T_{\text{sb}}\right)^2} p(t - m T_{\text{sb}}) \quad (4)$$

와 같이 표현될 수 있다. 여기서 n , N_{sc} , $s_{n,m}^{\text{OCDM}}$ 는 각각 서브 처프 인덱스

스, 서브 처프 수, m 번째 OCDM 심볼의 n 번째 서브 처프에 할당된 데이터 심볼이다. OCDM은 처프 신호의 특성으로 인해 각 데이터 심볼의 에너지가 시간 및 주파수 영역 전반에 걸쳐 분산되어 전송된다. 이로 인해 특정 시간 또는 주파수 성분에서의 채널 왜곡이 개별 심볼에 미치는 영향이 감소하여, 다중경로 페이딩 환경에서 우수한 강인성을 갖는다.

OTFS 변조 방식은 도플러 천이로 인한 기존 OFDM의 성능 저하를 극복하기 위해 제안되었다. 이를 위해 OTFS 변조 방식에서는 먼저 데이터 심볼을 지연-도플러 영역에 매핑한 후, Inverse symplectic finite Fourier transform을 통해 시간-주파수 영역으로 변환하며, 이는

$$s_{n,m}^{\text{OTFS}} = \sum_{k=0}^{N_{\text{del}}-1} \sum_{l=0}^{N_{\text{Dop}}-1} s_{l,k}^{\text{OTFS}} e^{j2\pi \left(\frac{nl}{N_{\text{del}}} - \frac{mk}{N_{\text{Dop}}} \right)} \quad (5)$$

와 같이 표현된다. 여기서 $s_{n,m}^{\text{OTFS}}$, N_{del} , N_{Dop} , $s_{l,k}^{\text{OTFS}}$ 는 각각 시간 인덱스 m 과 주파수 인덱스 n 에 대응하는 시간-주파수 영역의 데이터 심볼, 지연 인덱스 개수, 도플러 인덱스 개수, 지연 인덱스 k 와 도플러 인덱스 l 에 대응하는 지연-도플러 영역의 데이터 심볼을 나타낸다. 변환된 심볼은 OFDM과 동일한 방식으로 변조되며, 이를 통해 각 지연-도플러 심볼은 모든 부반송파와 시간 슬롯에 걸쳐 확산된다. 이러한 구조적 특성으로 인해 OTFS 변조 방식은 다중경로 페이딩 환경뿐만 아니라 도플러 천이가 존재하는 환경에서도 안정적인 성능을 제공한다. 그러나 이러한 장점은 추가적인 영역 변환으로 인한 계산 복잡도 증가를 수반한다.

나. 센싱 및 통신 성능 분석

본 절에서는 다섯 가지 파형 후보에 대해 센싱 및 통신 성능을 분석한다. 센싱 성능을 평가하기 위해 먼저 거리 추정 성능을 비교하였으며, 이는 거리 프로파일에서 관측되는 주엽의 폭과 부엽 레벨을 통해 평가한다. CS는 주엽을 중심으로 양측에 부엽이 주기적으로 나타나는 Sinc 함수의 형태를 보인다. 이에 비해 PMCW는 우수한 상관 특성을 가진 코드를 사용함으로써 거리 프로파일이 Dirac delta 함수에 근접한 형태를 나타내며, 가장 좁은 주엽과 낮은 부엽 레벨을 보인다. 반면, 다중 반송파 기반 변조 방식들은 다수의 부반송파에서 발생하는 부엽 성분이 누적됨에 따라 단일 반송파 파형에 비해 넓은 주엽과 높은 부엽 레벨을 갖는다. 특히 OCDM과 OTFS 변조 방식은 OFDM에 비해 더 높은 부엽 레벨을 보이며, 이로 인해 거리 추정 성능이 가장 크게 저하된다 [1].

다음으로, 고속 이동 환경에서 센싱 성능의 안정성을 평가하기 위해 도플러 천이에 대한 강인성을 분석한다. CS는 도플러 천이에 대해 강인한 특성을 나타내는 반면, PMCW는 도플러 천이로 인해 코드의 상관 특성이 저하되면서 거리 프로파일의 부엽이 증가하는 경향을 보인다. 다만, 이러한 성능 저하는 다중 반송파 변조 방식에서 관측되는 수준에 비해 상대적으로 작게 나타난다. 다중 반송파 변조 방식 중 OFDM과 OCDM은 도플러 천이가 부반송파 간 직교성을 훼손하여 반송파 간 간섭을 유발함에 따라 센싱 성능 저하가 가장 크게 나타난다. 이에 비해, OTFS 변조 방식은 지연-도플러 영역에서 신호 처리를 수행함으로써 단일 반송파 파형보다 도플러 천이에 대해 우수한 강인성을 보인다.

마지막 센싱 성능 평가 지표로서, 다중 안테나 배열 구성 시 발생하는 성능 변화를 분석한다. 동일한 안테나 배열을 사용하는 경우 파형이나 변조 방식과 무관하게 각도 해상도는 동일하나, 송신단에서 사용되는 다중화 방식에 따라 최대 비모호성 거리 또는 속도에 차이가 발생한다. CS는 송신 안테나 간의 직교성을 확보하기 위해 시간 또는 도플러 분할 다중화를 사용하며, 이로 인해 안테나 수에 비례하여 최대 비모호성 속도가 감소한다. 반면, PMCW는 각 안테나에 상호 직교하는 코드를 할당하는 코드 분할 다중화 방식을 사용하며, 사용되는 코드의 우수한 상관 특성으로 인해

안테나 별 송신 신호를 분리하는 과정에서 거리 및 속도 추정 성능의 유의미한 저하 없이 안정적인 센싱이 가능하다. 다중 반송파 변조 방식들은 일반적으로 데이터 변조가 수행되는 영역에서 각 송신 안테나에 직교하는 자원을 할당한다. 예를 들어 OFDM은 주파수 영역에서 서로 직교하는 부반송파를 각 송신 안테나에 할당하는 주파수 분할 다중화 방식을 적용하는데, 이 경우 안테나별로 사용 가능한 유효 대역폭이 감소하여 최대 비모호성 거리가 줄어든다. 한편 OCDM 및 OTFS 변조 방식은 추가적인 영역에서 직교성을 제공할 수 있으나, 다중 안테나 환경에서의 실질적인 송신 구조 및 수신단 처리 기법에 대한 연구는 아직 충분히 이루어지지 않은 상태이다. 종합적으로, 센싱 관점에서 단일 반송파 파형은 다중 반송파 변조 방식에 비해 좁은 주엽과 낮은 부엽 레벨로 인해 우수한 거리 추정 성능을 달성하며, 도플러 천이에 대해서도 높은 강인성을 보인다. 특히 PMCW는 이러한 장점과 더불어 다중 안테나 환경에서도 안정적으로 동작하여 센싱 중심의 ISAC 시스템에 가장 적합한 파형으로 평가된다.

센싱 성능 분석에 이어, 동일한 파형 후보들에 대해 스펙트럼 효율 및 기존 통신 시스템과의 호환성을 주요 지표로 하여 통신 성능을 분석한다. 먼저, 단일 반송파 파형은 하나의 심볼 구간 동안 하나의 데이터 심볼만을 전송하므로 상대적으로 낮은 스펙트럼 효율을 갖는다. 반면, 다중 반송파 변조 방식은 다수의 직교하는 부반송파를 통해 여러 데이터 심볼을 동시에 전송함으로써 높은 스펙트럼 효율을 달성한다. 기존 시스템과의 호환성 측면에서 CS는 LoRa와 같은 저전력 광역 통신 표준에 사용되고 있어, 스마트홈을 포함한 사물인터넷 환경에서의 활용 가능성이 높다. 반면, PMCW는 과거 2G 및 3G 이동통신 시스템에서 사용된 직접 시퀀스 확산 스펙트럼과 동일한 전송 원리를 따르나, 4G 이후 이동통신 표준이 OFDM 기반으로 전환되면서 기존 시스템과의 호환성은 제한된다. 이에 비해 OFDM은 현행 이동통신 표준의 기반 기술로서 기존 인프라와의 호환성이 가장 우수하다. 한편, OCDM과 OTFS 변조 방식은 아직 이동통신 표준에 채택되지는 않았으나, OTFS 변조 방식의 경우 무인항공기 및 도심 항공교통과 같은 고속 이동 환경에서의 적용 가능성이 높아 차세대 통신 기술로서 향후 표준화 가능성이 기대된다. 종합적으로, 통신 측면에서 다중 반송파 변조 방식은 단일 반송파 파형 대비 높은 스펙트럼 효율을 제공하며, 그중에서도 OFDM은 현행 통신 표준과의 뛰어난 호환성으로 인해 통신 중심의 ISAC 시스템에 가장 적합한 기법으로 평가된다.

III. 결론

본 논문에서는 ISAC 시스템에 적용 가능한 다양한 파형 후보들을 분석하였다. 단일 반송파 파형은 데이터 전송률이 제한적이나, 우수한 거리 추정 성능과 도플러 강인성으로 인해 센싱 중심의 ISAC 시스템에 적합하다. 반면, 다중 반송파 변조 방식은 높은 계산 복잡도와 상대적으로 저하된 센싱 성능을 갖지만, 높은 스펙트럼 효율을 제공함으로써 통신 중심의 ISAC 시스템에 적합하다. 이는 ISAC 시스템에서 센싱과 통신 간의 요구사항에 따라 적절한 파형 및 변조 기법을 선택하는 것이 중요함을 시사한다.

ACKNOWLEDGMENT

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. RS-2025-16068888).

참고 문헌

- [1] L. Giroto de Oliveira, B. Nuss, M. B. Alabd, A. Diewald, M. Pauli, and T. Zwick, "Joint radar-communication systems: modulation schemes and system design," IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 70, no. 3, pp. 1521-1551, March 2022.