

FM-OFDM 파형 기반 ISAC 시스템의 성능 분석

송찬빈, 노고산

국립한밭대학교

cksqsls247@naver.com, gsnoh@hanbat.ac.kr

Performance Analysis of FM-OFDM Waveform-Based ISAC Systems

ChanBin Song, Gosan Noh

Hanbat National Univ.

요약

본 논문은 Integrated Sensing and Communication (ISAC) 관점에서 Frequency Modulation-Orthogonal Frequency Division Multiplexing (FM-OFDM)과 Cyclic Prefix-OFDM (CP-OFDM)의 성능을 동일 조건 하에 비교한다. 통신 성능은 Rician 페이딩 채널에서 Signal-to-Noise Ratio (SNR)에 따른 Bit Error Rate (BER)을 비교 평가하고, 센싱 성능은 주파수 영역 기반 에코 모델에서 거리 프로파일 및 Range-Doppler (RD) 맵으로 측정하였다. 실험 결과, FM-OFDM은 전 구간 SNR에서 CP-OFDM 대비 낮은 BER을 보였으며, RD 맵과 평균 거리 프로파일에서 피크 대비 더 우수하였다. 이는 FM-OFDM의 위상 연속성과 주파수 불일치에 대해 상대적으로 강인함을 원인으로 분석된다.

I. 서론

차세대 통신인 6G에서 ISAC는 동일 파형으로 통신과 센싱을 동시 수행하여 자원 효율을 극대화한다. CP-OFDM은 통신 표준에서 널리 쓰이나, 주파수 오프셋, 위상 잡음 등에 따른 Inter-Carrier Interference (ICI)에 민감하다. 그에 반면 FM-OFDM은 Inverse Fast Fourier Transform (IFFT)의 누적 적분을 통해 연속 위상을 형성하고, 수신 시 간단한 위상 차 복원을 통한 서브캐리어 복조가 가능해 견고성이 기대된다. 본 논문은 동일 파라미터 안에서 FM-OFDM, CP-OFDM의 통신 BER, 센싱을 일관된 프레임 안에서 비교하고, 성능 차이의 원인을 고찰한다.

II. 본론

2.1 시스템 모델

서브캐리어 수 N 의 OFDM 프레임에서 실수 시간파형 생성을 위해 Hermitian 대칭을 적용하고, 시간파형은 다음과 같이 정의한다.

$$x[n] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X[k] e^{j \frac{2\pi kn}{N}}, \quad n = 0, \dots, N-1 \quad (1)$$

CP-OFDM은 각 심볼에 CP를 부가하여 전송하고, 수신은 CP 제거, Fast Fourier Transform (FFT), 복조 절차를 따른다. FM-OFDM은 IFFT 출력의 실수 성분 $x_R[n]$ 을 정규화 후 누적하여 연속 위상을 만들고 이를 지수형 복소 신호로 송신한다[1].

$$\phi[n] = 2\pi m \sum_{i=0}^n x_R[i], \quad s_{FM}[n] = e^{j\phi[n]}. \quad (2)$$

수신기에서는 심볼 구간별 위상 전개 및 차분으로 $x_R[n]$ 을 근사 복원한 뒤 FFT로 서브캐리어를 복조한다.

서브캐리어 - 심볼 영역에서 거리 지연과 도플러가 선형 위상으로 반영되는 단일 표적 모델을 사용한다. 수신 스펙트럼은 다음과 같이 표현한다:

$$S_R[k, m] = \alpha S_T[k, m] e^{-j2\pi(k\Delta f \tau - mT_s f_D)} + w[k, m] \quad (3)$$

여기서 $S_T[k, m]$ 는 송신 스펙트럼, α 는 경로 이득, Δf 는 서브캐리어

간격, T_s 는 심볼 주기, τ 는 왕복 지연, f_D 는 도플러 주파수, $w[k, m]$ 는 잡음이다. 정합 처리에는 두 방식을 고려하였다[2][3].

(i) 정규화형(divider)

$$D_{FM}[k, m] = \frac{S_R[k, m]}{S_T[k, m] + \epsilon} \quad (4a)$$

(ii) 상관형(correlator)

$$D[k, m] = S_R[k, m] S_T^*[k, m] \quad (4b)$$

이후 공통 절차로, k 축 IFFT로 거리 응답을 복원하고, slow-time 창(Hamming) 적용 후 FFT로 Range-Doppler 맵을 계산했다. 시각화 단계에서는 DC 노치와 거리별 정규화를 적용해 clutter ridge를 완화하였다.

2.2 시뮬레이션

시뮬레이션은 동일 환경 조건에서 FM-OFDM과 CP-OFDM의 통신 및 센싱 성능을 비교하기 위해 구성하였다. 변조는 Quadrature Phase Shift Keying (QPSK) 기반으로, OFDM 프레임은 Hermitian 대칭을 통해 실수 시간 파형을 생성하였다. FM-OFDM은 IFFT 출력의 실수 성분을 적분하여 연속 위상을 형성하고 이를 복소 지수형 신호로 변환하였다. 통신 평가는 Rician 채널에서 BER-SNR 곡선으로 나타내었다. 채널은 K-factor = 10, 최대 도플러는 1Hz를 부여하였다. 멀티패스 지연은 $[0, 1\mu s]$, 경로 이득은 $[0, -3dB]$ 로 부여하여 2경로 모델을 사용하였다. 각 SNR 지점에 AWGN을 주입하였다. 센싱 평가는 통신과 동일한 파라미터를 사용한 후 단일 표적으로 거리는 40m, 속도는 0~20m/s, Radar SNR = 20dB로 부여하였다. Frequency-slow-time 영역의 에코 모델을 이용하여 거리 프로파일과 RD 맵을 산출하였다. FM-OFDM에는 수신과 송신 비율의 정규화(divider) 처리를 하였고 CP-OFDM에는 상관형 처리를 적용하였으며, RD는 도플러 FFT와 DC 노치를 포함한다.

그림 1은 Rician 채널에서의 BER-SNR 결과를 나타낸다. 전 SNR 구간에서 FM-OFDM의 BER이 CP-OFDM보다 낮게 관찰되며, 특히 중·고

SNR에서 격차가 확대된다. 이는 FM-OFDM의 연속 위상 구조와 위상차 복원 덕분에 ICI 및 위상오차 누적에 덜 민감하기 때문으로 해석된다.

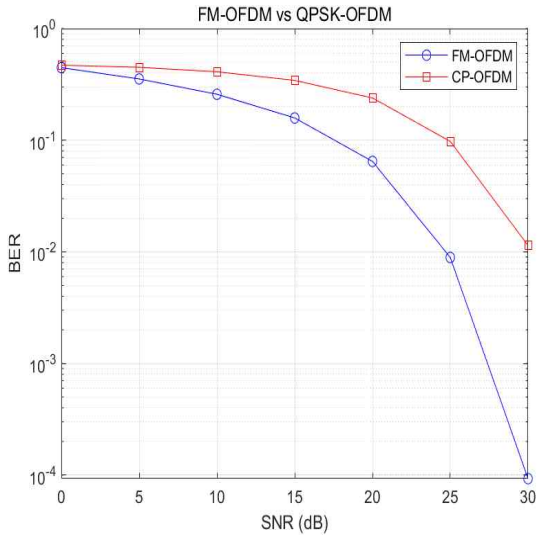


그림 1: FM-OFDM 과 CP-OFDM BER-SNR 성능 비교

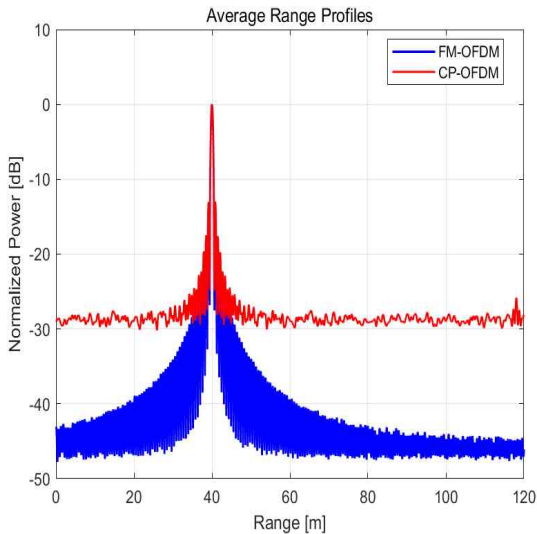


그림 2: 추정 거리 프로파일 비교

그림 2는 단일 표적을 가정했을 때의 평균 거리 프로파일이다. 두 파형 모두 타겟 거리에서 피크가 형성되지만, FM-OFDM은 배경 레벨이 더 낮고 피크가 날카롭게 나타난다. 정규화(divider) 처리로 송신 스펙트럼 및 공통 잡음 성분이 보정되어 클러터가 알아진 결과이며, Peak Sidelobe Ratio (PSLR)/Integrated Sidelobe Ratio (ISLR) 관점에서도 FM-OFDM이 우수한 대조도를 보였다.

그림 3은 FM-OFDM과 CP-OFDM의 RD 맵을 보여준다. CP-OFDM에서 타겟은 약 40 m, 0 m/s 부근에 나타나지만, 수직 릿지와 줄무늬가 상대적으로 강하게 남아 배경이 높게 보인다. 동일 조건에서 FM-OFDM RD는 릿지가 약화되고 타겟 점이 또렷하게 표현되어 Peak-to-background가 높게 나타났다. 이는 정규화 기반 정합과 연속 위상 특성의 결합 효과로 볼 수 있다. 전반적으로 FM-OFDM이 CP-OFDM 대비 BER과 센싱 모두에서 우수한 결과를 보였다.

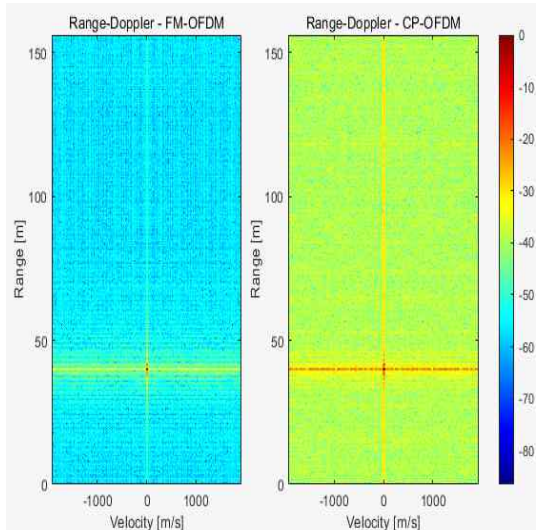


그림 3: FM-OFDM과 CP-OFDM Range-Doppler 맵 비교

III. 결론

본 연구는 동일 환경에서 FM-OFDM과 CP-OFDM의 ISAC 성능을 시뮬레이션으로 비교하였다. 통신 측면에서는 Rician 채널을 통과하여 얻은 BER-SNR 결과에서 FM-OFDM이 전 SNR 구간에서 일관되게 낮은 BER을 보였다. 이는 연속 위상 기반 송신과 위상차 복원을 사용하는 수신 구조가 ICI, 위상 오차와 약한 도플러에 더 강인하기 때문으로 평가된다.

센싱 측면에서는 평균 거리 프로파일과 RD 맵에서 FM-OFDM이 더 높은 피크 대비와 낮은 배경 레벨을 보였다. 특히 거리별 정규화 기준으로도 FM-OFDM의 타겟 응답이 더 선명하게 나타났으며, CP-OFDM은 상관형 처리 특성상 배경 릿지와 줄무늬가 상대적으로 강했다. 이는 FM-OFDM에서 적용한 정규화(divider) 정합이 송신 스펙트럼 및 공통 성분을 보정해 배경을 효과적으로 낮추는 데 기여한 결과다.

요약하면, FM-OFDM은 동일 자원 조건에서 통신과 센싱 모두에서 우수한 결과를 보여줬다. 즉, 낮은 오류율과 높은 검출 대비를 동시에 달성하여 ISAC 파형으로서의 실용성이 높다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원-대학ICT연구센터(ITRC)의 지원(IITP-2025-RS-2024-00437886, 50%)과 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 학·석사연계ICT핵심인재양성사업의 지원을 받아 수행된 연구임(IITP-2025-RS-2022-00156212, 50%)

참 고 문 헌

- [1] J. L. Hernando, A. G. Armad, "Frequency-Modulated OFDM: A New Waveform for High-Mobility Wireless Communications", IEEE transactions on communications, vol. 71, no 1, pp. 540~ 552, Jan. 2023.
- [2] C. Sturm, T. Zwick and W. Wiesbeck "An OFDM System Concept for Joint Radar and Communications Operations", IEEE Radar Conference(RadarCon), 2009.
- [3] S. H. Dokhanchi, M. R. Shankar and T. Stifter "OFDM-based Automotive Joint Radar-Communication System", IEEE Radar Conference(RadarCon), 2018.