

극한 무선 환경에서의 고속 정보 전송을 위한 FM-OFDM 파형 개선에 관한 연구

노고산
국립한밭대학교
gsnoh@hanbat.ac.kr

A Study on the improvement of FM-OFDM waveform for high-rate information transfer in extreme wireless environments

Gosan Noh
Hanbat National University

요 약

6G 요구사항 달성을 위해 서브-THz의 초광대역을 활용해야 할 필요성이 제기되고 있다. 이를 위해 높은 경로 손실, 도플러 효과, RF 열화 등에 강인한 FM-OFDM 파형이 제안되었다. 본 논문은 FM-OFDM의 원리 및 한계를 분석하고 진폭 및 위상 오프셋과 DCT/DST 기반 변환으로 주파수 효율과 구현 효율을 개선하는 방안을 소개한다.

I. 서론

6G 이동 통신은 최대 100Gbps를 넘어서는 초고속 전송 속도, 0.1ms 이하의 초저지연, 100bps/Hz 수준의 매우 높은 주파수 효율, 99.99999%에 이르는 초고신뢰성 뿐만 아니라, 초대규모 단말 밀도 및 융합형 실감 서비스 지원까지 포괄하는 등 5G와 비교해 보면 한층 더 도전적인 성능 목표를 제시한다[1].

이러한 6G의 도전적인 성능을 달성하려면 수백 GHz 대역의 초광대역 스펙트럼을 제공하는 서브-THz 주파수 자원을 적극 활용해야 하지만, 서브-THz 대역에서는 매우 짧은 파장으로 인해 경로 손실이 급격히 증가하고 공기 분자, 수증기 등에 의한 대기 흡수가 커지며, 이동 환경에서는 도플러 편이와 주파수 확산이 커져서 전송 가능 거리와 채널 일관성이 심각하게 제한된다. 동시에 발진기 위상 잡음과 전력 증폭기 비선형성 같은 RF 열화 요인이 복합적으로 작용해 기존 물리계층 설계만으로는 요구 성능을 확보하기 어렵다.

따라서 서브-THz 특유의 RF 열화와 빠른 채널 변동에 강인한 새로운 파형이 필수적이며, 4G 및 5G에서 이미 상용 검증이 완료된 OFDM(Orthogonal Frequency-Division Multiplexing)의 호환성을 유지하면서도 진폭 변조를 주파수 변조로 바꾸어 0dB의 PAPR(Peak-to-Average Power Ratio)과 위상 잡음 및 도플러에 대한 강인성을 동시에 확보할 수 있는 FM-OFDM(Frequency Modulated-OFDM)이 주목받고 있다[2]. 본 논문은 FM-OFDM의 기본 원리를 논의하고, 진폭 및 위상 오프셋을 이용한 주파수 효율 향상 기법, DCT/DST 기반 주

파수-시간 변환 최적화 등 극한 무선 환경에서 실효성을 극대화할 수 있는 설계 방안을 소개한다.

II. 본론

1. 극한 무선 환경 및 RF 열화의 영향

서브-THz 초고주파 등 극한 무선 환경에서는 다음과 같은 기술적 문제가 고려되어야 한다.

- 주파수 선택적 페이딩: 수십~수백 GHz 대역의 광대역 전송은 다중경로 지연으로 인해 채널이 주파수 대역마다 다르게 감쇠하는 주파수 선택적 페이딩을 유발하며, 이는 수신신호 스펙트럼 전반에 비균일한 왜곡을 초래하여 채널 등화가 어려워진다.
- 높은 도플러 및 시변성: 캐리어 주파수가 높을수록 이동 속도에 따른 최대 도플러 편이가 커지고 도플러 확산도 발생하여, 심볼 간 간섭(ISI)과 반송파 간 간섭(ICI)을 악화시켜 수신 성능을 열화시킨다.
- 위상 잡음 및 RF 열화: 서브-THz 대역의 RF 부품(발진기, 증폭기 등)은 낮은 주파수 대역에 비해 위상 잡음이 크고 기기 성능 열화가 두드러진다. 특히 발진기의 위상 잡음과 반송파 주파수 오차(CFO)는 OFDM의 직교성을 깨뜨려 ICI를 발생시키고 신호 왜곡이 심화된다.

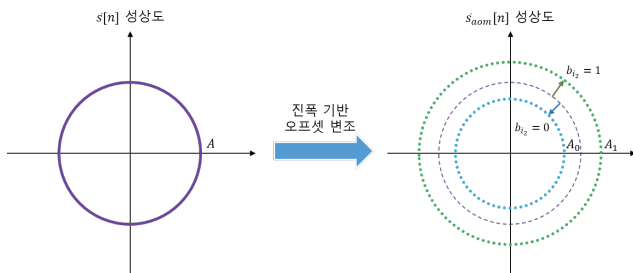


그림 1. FM-OFDM 에 진폭 오프셋 적용[3]

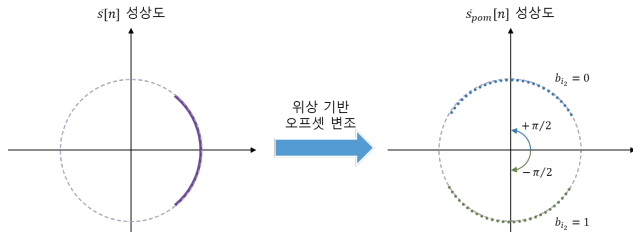


그림 2. FM-OFDM 에 위상 오프셋 적용[3]

- 높은 PAPR: OFDM 신호는 최대 대비 평균 전력 비(PAPR)가 크다는 문제가 있으며, PAPR 이 높으면 최대 신호값이 증폭기의 선형 영역을 초과하게 되어 클리핑 등의 왜곡을 초래하거나, 이를 피하기 위해 송신 전력 백오프가 필요해 유효 커버리지가 감소한다.

2. FM-OFDM 원리

위의 문제들을 해결하기 위해 OFDM 파형 개선 기술들이 제안되었다. 그 중 FM-OFDM 은 위상 잡음과 도플러에도 강인한 특성을 가지고 있다. OFDM 신호를 주파수 영역에서 추가로 주파수 변조하여 신호의 진폭은 일정하게 유지되어 PAPR 이 0 dB 가 되게 할 수 있다. 인접 위상의 차이를 이용한 주파수 변조 덕분에 고속 이동에 따른 채널 변화에도 강인하여, 높은 도플러 조건에서도 기존 OFDM 대비 우수한 성능을 보인다.

다만 FM-OFDM 은 위상 차이를 통해 변조가 이루어지므로 모든 변조를 실수값 기반으로 수행해야 한다.

그러므로 주파수 영역에서 복소 켤레 대칭 신호를 만들어 대역 자원의 절반만 데이터 전송에 활용하게 된다. 즉, 동일 대역폭 대비 주파수 효율이 50% 수준으로 떨어지는 단점이 있다.

3. FM-OFDM 에서 주파수 효율 증대 기술

FM-OFDM 의 낮은 주파수 효율을 개선하기 위한 방법으로 추가 비트 정보를 파형에 실어 보내는 기법을 생각해 볼 수 있다[3]. 송신 시 정보 비트를 두 부분으로 나눠 하나는 기존처럼 QAM 데이터로 FM-OFDM 의 부반송파에 매핑하고, 다른 하나는 FM-OFDM 신호의 진폭 또는 위상에 오프셋을 주어 전송한다. 예를 들어 2 단계 진폭 오프셋([그림 1])과 위상 오프셋([그림 2])을 적용하면 각 OFDM 심볼에 1 비트의 추가 정보를 실어 보낼 수 있으며, 수신기는 먼저 수신 신호에서 진폭 또는 위상 오프셋에 해당하는 패턴을 판별하여 숨겨진 비트를 복원하고, 그 영향을 제거한 뒤 본래 FM-OFDM 신호의 QAM 데이터를 복원할 수 있다. 이러한 오프셋 변조를 통해 FM-OFDM 의

효과적인 주파수 활용도를 높여 성능을 향상시킬 수 있다.

4. FM-OFDM 에서 주파수-시간 변환 기술

FM-OFDM 시스템은 송신기에서 주파수 영역 변조 신호를 부반송파 할당을 거친 이후 시간 영역으로 변환하는 동작을 수행하며, 이 때 역 이산 푸리에 변환(Inverse Discrete Fourier Transform; IDFT) 동작을 통해 주파수 영역 신호를 시간 영역 신호로 변환하고 수신기에서 이산 푸리에 변환(DFT) 동작을 통해 시간 영역 신호를 주파수 영역 신호로 변환한다.

상기 FM-OFDM 의 주파수 변조 동작을 위해서는 시간 영역에서 실수 성분만 가지는 신호를 생성해야 하며 이를 위해서는 주파수 영역에서 부반송파 할당 시 켤레 대칭(Conjugate symmetry) 형태가 되도록 하여야 한다. 부반송파 간에 켤레 대칭 구조를 가지게 하면 전체 부반송파 영역의 중앙을 기준으로 하여 절반의 영역과 나머지 절반의 영역이 복소 켤레(Complex conjugate) 값이면서 대칭인 형태를 띠게 된다.

한편, DCT(Discrete Cosine Transform) 또는 DST(Discrete Sine Transform) 기반의 FM-OFDM 동작을 위해서는 주파수 영역 및 시간 영역 모두에서 실수 성분만 가지는 DCT 및 DST 의 특성을 이용하여 QAM 변조 신호의 실수 부분과 허수 부분을 나누어 처리하는 방식으로 송수신기 구조를 최적화할 수 있다.

III. 결론

FM-OFDM 은 서브-THz 를 사용하는 극한 무선 환경에서도 위상 잡음 및 도플러에 강인하고 0dB 의 PAPR 특성을 유지해 우수한 전력 효율 특성 및 커버리지 특성을 확보한다. 다만 복소 켤레 대칭 구성 탓에 주파수 효율이 절반으로 줄어드는 단점이 존재한다. 이를 보완하기 위해 진폭 및 위상 오프셋 변조 기법을 통해 추가 비트를 실어 주파수 효율을 높이고, DCT/DST 기반 실수 변환으로 송수신기 효율을 높이는 방법을 조사하였다.

참 고 문 헌

- [1] Attachment 2.12 of Chapter 2 to Document 5D/1361, "Work plan, timeline, process and deliverables for the future development of IMT."
- [2] J. L. Hernando and A. G. Armada, "Frequency-modulated OFDM: A new waveform for high-mobility wireless communications," IEEE Transactions on Communications, vol. 71, no. 1, pp. 540-552, Jan. 2023.
- [3] G. Noh, W. Shin, K. Kim and H. Wang, "Spectral Efficiency Enhancement of FM-OFDM Waveform Using Offset Modulation Techniques," IEEE Wireless Communications Letters, vol. 13, no. 5, pp. 1335-1338, May 2024.
- [4] Gosan Noh, Wooram Shin, Kyeongpyo Kim, Eunkyung Kim, "DCT/DST-based frequency modulated-OFDM," ICT Express, vol. 11, no. 2, 2025, pp. 235-238.