

직교 시간 주파수 분할 다중화 방식 구조 연구

김경표, 신우람, 장갑석, 고영조
한국전자통신연구원

{kpkim, w.shin, kschang, koyj}@etri.re.kr

Analysis of Orthogonal Time Frequency Division Multiplexing

Kyeongpyo Kim, Wooram Shin, Kapseok Chang, Young-Jo Ko
Electronics and Telecommunications Research Institute

요 약

OTFDM 방식을 소개하고, 고속 이동 시나리오와 같이 도플러 확산으로 인해 성능 열화가 심한 환경에서의 OTFDM 방식의 장점을 DFT-s-OFDM 방식과 비교하고, 고속 이동 시나리오에 강점이 있는 OTFS 방식과 비교하여 차이점을 확인하였다.

I. 서 론

IMT-2030 이 제시하는 6 세대 이동통신의 주요 요구사항에는 높은 에너지 효율, 초저지연, 고속 이동성 지원 등이 포함되며, 특히 6.425~7.125 GHz 와 같은 기존보다 높은 주파수 대역에서 이러한 요구를 만족시키기 위해서는 도플러 확산에 강하면서도 신호의 전파 거리를 유지할 수 있는 에너지 효율적인 파형 설계가 매우 중요하다. 기존의 CP-OFDM(Cyclic Prefix Orthogonal Frequency Division Multiplexing)은 지연 확산으로 인한 ISI(Inter-symbol Interference)를 효과적으로 억제할 수는 있지만, 도플러 확산에 대응하기 어렵고, 높은 PAPR(Peak-to-Average Power Ratio)로 인해 PA(Power Amplifier) 에너지 효율을 개선하는 데 제약이 있어 전파 거리 확장에도 한계가 있다. 기존의 CP-OFDM 의 한계를 극복하기 위해 제안된 OTFS(Orthogonal Time Frequency Space) 변조 방식은 데이터 심볼을 지연-도플러 자원 영역에 사상하는 방식으로, 시간-주파수 영역에서는 해당 심볼이 2 차원으로 확산된 형태로 나타나는 특징이 있다. 이로 인해 시간에 따라 빠르게 변화하는 채널도 지연-도플러 영역에서는 거의 시불변 채널로 처리할 수 있어, 도플러 확산이 심한 환경에서 특히 유리하다. 하지만 OTFS 변조 방식이 갖는 2 차원 변환 구조에 따른 구현 복잡성 및 높은 신호 처리 지연과 같은 한계를 가지고 있으며, PAPR 역시 높은 편이라는 단점이 있다.

OTFS 의 장점을 유지하면서도 단점을 극복하기 위해 OTFDM(Orthogonal Time Frequency Division Multiplexing) 파형이 6 세대 이동통신 후보 파형 중 하나로 제안되었다. OTFDM 은 OTFS 와 달리 매 심볼 단위의 1 차원 확산 구조를 갖고 있어 구현이 간단하고 신호 처리 지연이 적으며, 시간 다중화 방식으로 기존 신호를 삽입함으로써 도플러 확산 환경에서도 효과적인 채널 추정이 가능하다. 또한, 데이터 심볼을 시간 영역에서 정의하여 단일 반송파 기반의 DFT-s-OFDM(Discrete Fourier Transform-spread OFDM)과

유사한 저 PAPR 특성을 갖는다. 이로 인해 PA 의 에너지 효율이 향상되며, 결과적으로 신호의 전파 거리도 늘릴 수 있다.

본문에서는 OTFDM 변조 방식 및 채널 추정 방식에 대해 살펴보고, 고속 이동 환경에서 OTFDM 방식과 기존의 CP-OFDM, DFT-s-OFDM 및 OTFS 방식의 차이에 대해 확인하도록 한다.

II. 본 론

OTFDM 시스템의 가장 큰 특징은 채널 추정을 위한 기준 신호와 데이터 심볼이 하나의 OTFDM 심볼 내에 있다는 점이다. OTFDM 송신기는 데이터 심볼과 정보 심볼을 다음의 그림 1 과 같이 하나의 심볼에 시간 다중화 방식으로 순차적으로 배치한다.

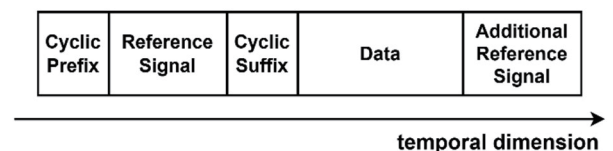


그림 1. OTFDM 심볼 구조

그림 1 에서 보는 바와 같이, OTFDM 심볼 구조는 채널 추정을 위한 기준 신호와 데이터 심볼이 시간 영역에서 나란히 위치하도록 구성되어 있는데, 기준 신호는 CP(Cyclic Prefix)와 CS(Cyclic Suffix)로 감싸진 형태로 삽입되며, 이후에 데이터 심볼과 추가적인 기준 신호인 ARS(Additional Reference Signal)이 배치되는 형태를 갖는다. 기준 신호 주변의 CP 및 CS 는 채널의 지연 확산에 의해 기준 신호가 오염되어 채널 추정 성능이 저하되는 것을 막기 위한 것이다. OTFDM 심볼은 시간 영역에서 정의되었기 때문에, 고속 이동 시나리오와 같이 한 심볼 내에서 채널이 변하는 환경에서도 심볼의

마지막에 추가적인 기준 신호인 ARS 를 두어 채널 정보를 보정할 수 있다.

이후 전체 OTFDM 심볼에 대해 DFT 를 수행하여 시간 영역 신호는 주파수 영역 신호로 변환되며, 주파수 영역 신호는 대역폭 확장 및 스펙트럼 성형 과정을 거치게 된다. 이러한 스펙트럼 성형은 주파수 영역 신호의 급격한 변화를 줄여 시간 영역 파형을 매끄럽게 만들어 PAPR 을 개선하고, 또한 신호의 시간 영역 응답이 주변으로 퍼져서 ISI 를 유발하는 것을 막는 효과가 있다. 다음의 그림 2 는 대역폭 확장 및 스펙트럼 성형 과정을 나타낸 것이다.

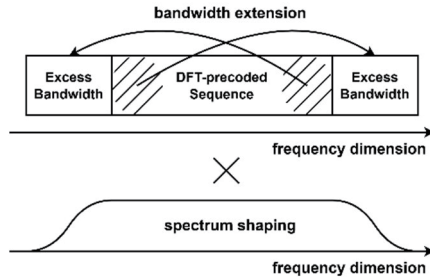


그림 2. 대역폭 확장 및 스펙트럼 성형

그림 2 에서 보는 바와 같이, DFT 에 의해 변환된 주파수 영역 신호의 낮은 주파수 대역 신호를 복사하여 높은 주파수 대역에 추가하고, 높은 주파수 대역의 신호를 복사하여 낮은 주파수 대역에 추가하는 방식으로 대역폭 확장을 수행하고, 이후에 대역폭 확장이 된 주파수 영역 신호에 스펙트럼 성형 필터를 곱해서 스펙트럼 성형을 수행한다.

스펙트럼 성형이 된 신호는 부반송파 할당, IFFT 및 CP 추가 과정을 거치게 되는데, 이는 기존의 CP-OFDM 방식과 동일한 변조 과정이다. 시간 영역 데이터 심볼이 DFT 에 의해 주파수 영역 신호로 변환되고, 이 주파수 영역 신호가 부반송파에 할당된 이후 CP-OFDM 변조 과정을 거치는 방식은 기존의 DFT-s-OFDM 변조 과정과 일부 유사한 부분이 존재한다. 다음의 그림 3 은 OTFDM 과 DFT-s-OFDM 의 변조 과정을 비교한 것이다.

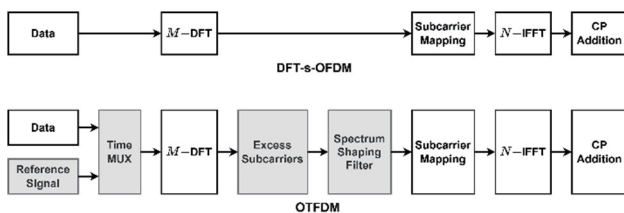


그림 3. DFT-s-OFDM 과 OTFDM 의 변조 방식 비교

그림 3 에서 보는 바와 같이, OTFDM 변조는 기존 신호와 데이터 심볼을 하나의 심볼에 같이 배치한다는 점에서 DFT-s-OFDM 과 차이가 있다. DFT-s-OFDM 의 경우, 채널 추정을 위해 하나의 DFT-s-OFDM 심볼 전체를 기준 신호에 할당해야 하므로 채널 추정을 매 심볼 수행하는 것이 불가능하며, 빠르게 변하는 채널 환경에서는 채널 추정 오차로 인해 성능 열화가 발생하게 된다. 반면에 OTFDM 시스템은 매 심볼마다 채널 추정을 수행할 수 있기 때문에 채널 변화가 빠른 환경에서도 채널 추정 정확도가 높고, ARS 를 이용하여 심볼 기간 내의 채널 변화에도 대응이 가능하다.

도플러 확산이 심한 고속 이동체 시나리오에서 강점을 가지는 OTFS 시스템과의 차별점도 존재한다. OTFS 는

데이터 심볼을 지연-도플러 자원에 할당하는 변조 방식을 사용한다. 이 방식은 시간-주파수 영역 채널이 빠르게 변하더라도 지연-도플러 영역에서는 모든 자원이 동일한 지연-도플러 채널 응답을 경험하게 되어, 하나의 지연-도플러 영역 기준 신호로 전체 지연-도플러 자원의 채널을 추정할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 실제 채널의 도플러 천이가 도플러 그리드의 정수배가 아닌 경우, 기준 신호 하나에 할당해야 하는 지연-도플러 자원 영역이 넓어지는 단점이 있다. 이에 비해 OTFDM 시스템의 채널 추정은 기준 신호가 할당된 시간 자원에서 수행되기 때문에, 채널의 도플러 천이와 관계없이 높은 정확도의 채널 추정이 가능하다. 이후 추정된 채널은 주파수 영역으로 변환되어 주파수 영역에서 심볼 단위의 단일 탭 등화를 통해 낮은 복잡도로 전체 OTFDM 파형에 대한 채널 보상이 이루어진다.

하드웨어 구현 시의 변복조 복잡도 및 처리 지연 관점에서도 OTFDM 은 OTFS 에 비해 강점을 가진다. OTFS 변조는 지연-도플러 영역의 신호를 시간-주파수 영역으로 변환하기 위해 복잡한 2 차원 변환 과정을 필요로 하며, 이 중 전체 심볼에 대한 시간 영역 방향으로의 확산 과정으로 인해 전체 OTFS 프레임 단위의 처리 지연이 발생한다. 이에 비해 OTFDM 은 각 심볼 단위로만 확산이 이루어지기 때문에 처리 지연이 단일 심볼 길이에 국한된다는 장점이 있다.

III. 결 론

이 논문에서는 OTFDM 변조 과정과 채널 추정 기법을 소개하고, 도플러 확산으로 인해 성능 저하가 발생하는 고속 이동 시나리오에서 OTFDM 방식의 장점을 분석하였다. 특히 변조 과정이 유사한 DFT-s-OFDM 과 비교하여 OTFDM 의 특징과 성능상의 이점을 기술하였으며, 고속 이동 환경에서 강점을 갖는 OTFS 와의 비교를 통해 채널 추정 방식의 차이점과 함께 하드웨어 구현 측면에서 OTFDM 이 가지는 복잡도 및 지연 측면의 장점을 확인하였다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2025 년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (No.2018-II180218, 초고주파 이동통신 무선백홀 전문연구실)

참 고 문 헌

- [1] Ma, Yihua, et al. "OTFDM: A Novel 2D Modulation Waveform Modeling Dot-product Doubly-selective Channel." 2023 IEEE 34th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC). IEEE, 2023.
- [2] Gudimitla, Koteswara Rao, and Kiran Kuchi. "Orthogonal Time Frequency Multiplexing (OTFDM): A Novel Waveform Targeted for IMT-2030." arXiv preprint arXiv:2409.01114 (2024).
- [3] IITH, WiSig Networks, "Vision and Priorities for 6G," 3GPP Workshop on 6G, March, 2025.