

# 도심항공모빌리티 통신 지원을 위한 Orthogonal Time Frequency Space 시스템 윈도우 기법

김시환, \*최지환  
한국과학기술원, \*한국과학기술원

sihwankim@kaist.ac.kr , \*jhch@kaist.ac.kr

## Orthogonal Time Frequency Space System Windowing Techniques to Support Urban Air Mobility Communications

Sihwan Kim, \*Jihwan Choi  
Dept. of Aerospace Eng., KAIST

### 요약

본 논문은 도심항공모빌리티의 주파수 선택적 시변 채널환경에서의 통신을 위해 윈도우가 적용된 orthogonal time frequency space (OTFS)를 활용한 다중 부반송파 통신 시스템을 제안한다. 채널 페이딩에 의해 발생하는 성능 저하 요인인 인접 지연-도플러 간섭이 윈도우를 통해 생성된 파형 활용으로 억제될 수 있음을 모호성 함수 분석을 통해 보인다.

### I. 서론

6G 이동통신 환경이 공간적 제약에서 벗어나 3 차원 공간으로 확대 운영될 것으로 예측됨에 따라, 차세대 이동통신 서비스 제공을 위한 소요기술 개발이 활발하게 이루어지고 있다. 특히 도심항공모빌리티 통신은 주요 3 차원 공간 서비스가 될 것으로 예측되며, 공중 환경에서 서비스별 통신을 제공하기 위해 지상에 비해 보다 많은 제약 조건의 분석이 추가적으로 고려되어야 한다 [1]. 도심항공모빌리티의 운용 특성상, 사전에 예측 및 전 처리 보정이 어려운 도플러 효과가 발생할 수 있으며, 공중환경에서 영상 시청 등과 같은 초고속 데이터 서비스를 수요를 충족하기 위해 다중 부반송파 변조방식을 이용할 경우 부반송파 간 직교성이 손실되어 통신성능이 저하된다.

최근, 다중 부반송파 변조를 시간-주파수 영역이 아닌 지연-도플러 영역에서 수행하는 orthogonal time frequency space (OTFS) 변조방식이 제안되어 연구되고 있다 [2]. OTFS 변조방식은 주파수 선택적 시변 채널을 지연-도플러 영역에서 효과적으로 추정 및 보정할 수 있으며, orthogonal frequency division multiplexing (OFDM)과 같은 이전세대 통신에 프리코딩을 거치는 방식으로 구현이 가능하여 호환성이 뛰어나다는 장점이 있다. 본 논문에서는 OTFS 변조에 윈도우를 적용하고, 생성된 파형이 주파수 선택적 시변 채널로 인해 발생하는 인접 지연-도플러 간섭 (inter delay-Doppler interference, IDDI)에 강인해질 수 있음을 지연-도플러 영역 모호성 함수 [3] 분석을 통해 보인다.

### II. 본론

OTFS 변조는 전송하고자 하는 정보를 지연-도플러 영역에 사상시킨다. 이 때, 지연-도플러 영역의 자원 그리드는 시간-주파수 영역의 자원 그리드에 symplectic finite Fourier transform (SFFT)을 적용하여 정의된다. 지연-도플러 영역에 정의된 독립적인 quadrature amplitude modulation (QAM) 심볼 데이터들은 inverse symplectic finite Fourier transform (ISFFT)을 통해 시간-주파수 영역에 확산되며, Heisenberg transform 을 통해 시간 영역 신호로 변환된다. 이 때 시간-주파수 영역에서 시간 영역으로의 변환은 OFDM 의 변조와 동일하므로, unitary transform 인 ISFFT 를 일종의 프리코딩 매트릭스로 간주하여 OTFS 를 precoded-OFDM 과 유사한 과정으로 구현할 수 있다. 복조 과정도 기존 OFDM 의 복조와 동일하게 구현 가능하며, Wigner transform 을 통해 수신된 시간 신호를 시간-주파수 영역으로 변환한 뒤, SFFT 를 통해 지연-도플러 자원 그리드에 사상된 심볼 정보를 얻을 수 있다.

지연-도플러 영역이 시간-주파수 영역에 unitary transform 을 적용해 구현되었기 때문에, 시간-주파수 영역에서 정보를 전송하는 프로토타입 펄스 파형의 직교성이 성립할 경우 지연-도플러 영역에서도 직교성이 유지된다. 다시 말해, OFDM 에서 정보를 실은 프로토타입 펄스가 직교성을 만족할 경우, 이 트랜시버에 ISFFT/ SFFT 변환 매트릭스를 오버레이하여 OTFS 를 구현할 수 있다.

OTFS 는 주파수 선택적 시변 채널의 다중경로별 지연 및 도플러 성분을 효과적으로 추정 및 보정할 수 있다는 장점이 있다. 하지만, 격자 해상도로 인해 발생하는 IDDI 는 여전히 개선되어야 할 실용적 설계 이슈이다. 본 논문에서는 rectangular 펄스 형태의 파형에 국한되지

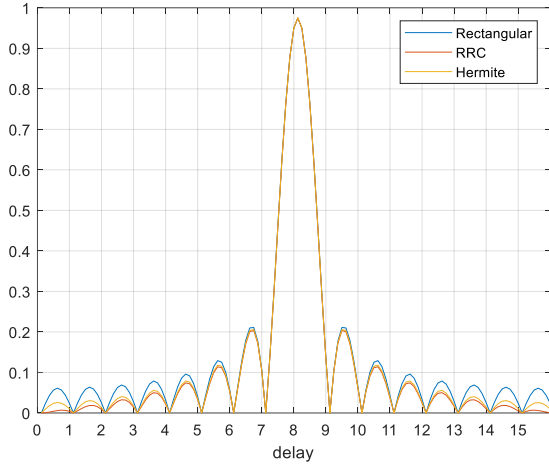


그림 1. 각 프로토타입 펄스 별 지연 영역 모호성 함수 표현

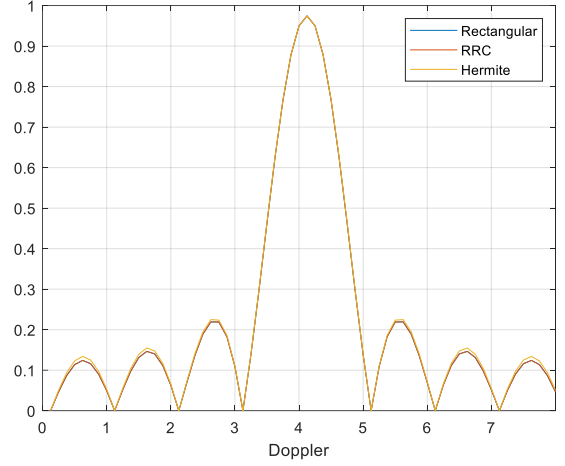


그림 2. 각 프로토타입 펄스 별 도플러 영역 모호성 함수 표현

않고, root raised cosine (RRC), hermite 프로토타입 펄스를 OTFS 에 적용하여 IDDI 를 유발하는 모호성 함수의 sidelobe 성분을 분석한다.

그림 1, 2 는 16 subcarrier, 8 time slot 을 활용하는 OTFS 시스템의 프로토타입 펄스 별 지연 영역, 도플러 영역 모호성 함수의 크기를 나타낸 것이다. Hermite 함수의 overlap factor 는 8 로 설정하였다. 각 영역별 모호성 함수의 sidelobe 크기를 비교하였을 때 지연 영역에서는 RRC, hermite, rectangular 순으로 우수한 감쇠 성능을 보였고, 도플러 영역에서는 rectangular  $\approx$  RRC, hermite 순으로 우수한 감쇠 성능을 보였다. Hermite 함수를 활용하였을 때 도플러영역에서의 sidelobe 성능 열화는 overlap factor 로 인한 시간 도메인에서의 긴 프로토타입 필터 길이가 도플러 도메인에 영향을 준 것으로 해석되며, 첫번째 zero-crossing 이후의 파형이 제거된 truncated hermite 를 이용할 경우 도플러 영역에서의 성능을 개선할 수 있다 [4]. RRC 의 경우 지연 도플러 영역 모두에서 비교 프로토타입 펄스 대비 준수한 sidelobe 감쇠를 보였으며, 이는 RRC 가 주파수 선택적 시변 채널환경에서 IDDI 로 인한 성능 저하에 강인함을 의미한다.

### III. 결론

본 논문에서는 rectangular, RRC, hermite 함수 윈도우를 적용한 OTFS 시스템의 지연 도플러 영역 신호 분석을 수행하였다. 각 영역별 모호성 함수의 sidelobe 성능을 분석하였을 때 지연 영역에서는 RRC, hermite, rectangular 순으로 우수한 감쇠 성능을 보였고, 도플러 영역에서는 rectangular  $\approx$  RRC, hermite 순으로 우수한 감쇠 성능을 보였다.

### ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 대학 ICT 연구센터육성지원사업의 연구결과로 수행되었음" (IITP-2024-2021-0-02048)

### 참고 문헌

- [1] Wei, Zhiqiang, et al. "Orthogonal time-frequency space modulation: A promising next-generation waveform." IEEE wireless communications 28.4 (2021): 136-144.
- [2] Hadani, Ronny, et al. "Orthogonal time frequency space modulation." 2017 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). IEEE, 2017.
- [3] Li, Shuangyang, et al. "On the pulse shaping for delay-Doppler communications." GLOBECOM 2023-2023 IEEE Global Communications Conference. IEEE, 2023.
- [4] Nissel, Ronald, and Markus Rupp. "Pruned DFT-spread FBMC: Low PAPR, low latency, high spectral efficiency." IEEE Transactions on Communications 66.10 (2018): 4811-4825.