

# 도플러가 높은 환경에서의 OTFS 시스템 연구 동향

이예진, 정해준  
경희대학교 전자정보융합공학과

vexia@khu.ac.kr, haejoonjung@khu.ac.kr

## Survey on Orthogonal Time Frequency Space Systems in High Doppler Environments

Lee Ye Jin, Haejoon Jung  
Kyung Hee University

### 요 약

새로운 세대의 고속 이동 통신 환경에서 orthogonal time frequency space (OTFS) 시스템은 이전 세대들보다 더 효율적인 성능을 보여줄 것으로 기대되고 있다. 도플러 환경에서 취약한 기존의 orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) 시스템과 달리 OTFS 는 지연-도플러 (DD: delay-doppler) 영역의 신호처리를 통해 지연 스프레딩과 도플러 영향을 효과적으로 처리할 수 있다. 본 논문에서는 OTFS 를 이용한 통신 환경에 관한 기존 연구를 검토한다.

### I. 서 론

5 세대 이동통신인 5th generation(5G)은 이전 세대인 4th generation(4G)보다 최대 데이터 전송률, 이동성, 지연속도, 다수의 무선 접속 지원 등에서 월등한 향상을 요구한다. 4G/5G 통신에서 사용되는 OFDM 시스템은 cyclic prefix (CP)를 이용하여 다중경로 채널로 인한 inter-symbol interference (ISI) 효과를 극복하고 지연 스프레딩 효과를 극복할 수 있다 [1]. 하지만 이는 높은 이동성을 가진 환경에서 도플러 영향을 효과적으로 처리하기 위해 추가적인 도플러 보상 알고리즘이 필요하다. 따라서 차세대 이동통신의 서비스 지원에 높은 복잡도를 가진 OFDM 기반의 시스템이 요구된다.

OTFS 시스템은 OFDM 방식과 달리 신호를 DD 영역에서 처리하여 빠른 처리 속도를 퇴색시키지 않으며 도플러 영향을 처리한다. OTFS 에서는 2 차원의 각 심볼을 inverse symplectic finite fourier transform (ISFFT)을 사용하여 DD 영역에서 시간-주파수 (TF: time-frequency) 영역으로 변환한다. TF 영역에서 DD 영역으로의 변환은 symplectic finite fourier transform (SFFT)을 사용한다. 이러한 신호처리 방식으로 주파수 천이가 있는 환경에 취약한 OFDM 의 문제를 해결한다. 한편, 2030 년 상용화를 예정으로 하고 있는 6 세대 이동통신 시스템에서는 주파수 대역으로 sub-THz 대역 전송이 논의된다 [2]. OTFS 변조는 추후 이동통신 환경의 요구사항을 지원하는 새로운 변조 방식으로 고려될 수 있다. [3]에서는 reduced zero padding (RZP), reduced cyclic prefix (RCP), zero padding (ZP) 그리고 CP 를 사용한 각각의 OTFS 에서 낮은 복잡성의 maximal ratio combining

(MRC) 검출기를 제안하여 오버스프레드 채널에서도 효과적으로 사용될 수 있음을 보여주었다.

본 논문에서는 이와 같은 OTFS 에 대한 기존 연구의 검토를 제공한다. 섹션 2 는 최근 low earth orbit (LEO) 위성통신과 underwater acoustic (UWA) 통신 분야의 OTFS 시스템에 대해 검토한다. 섹션 3 에서, 본 논문의 결론을 설명한다.

### II. 본론

#### 2-1. OTFS 기반 LEO 위성 통신

6 세대 통신은 지상 네트워크의 광범위한 서비스 커버리지 내 취약성에 대한 보완책으로 비지상 네트워크인 LEO 위성통신을 고려하고 있다. 위성 통신에서는 위성의 고속 이동성으로 인해 도플러 영향을 크게 받는다. 따라서 OFDM 변조 기술을 사용하는 LEO 통신은 성능 저하를 겪는다 [4]. 이에 비해 OTFS 기술은 DD 도메인의 채널 변환으로 높은 도플러 이동에 낮은 민감도를 가져 성능 향상을 보여준다. 위성통신에서 넓은 면적과 원활한 커버리지 제공을 위해 더 많은 위성이 필요하지만 위성수가 증가함에 따라 inter-satellite link (ISL)로부터 간섭을 받는다. [5]에서는 위성이 수신하는 충돌 신호를 효과적으로 처리하기 위해 블라인드 분리 기술을 사용한다. 이때 블라인드 분리 성능을 향상시키기 위해 DD 영역에서 OTFS 변조를 사용해 도플러 영향을 피하였다. 또한 LEO 위성통신 시스템에서는 글로벌 무선 액세스의 개선을 위해 긴 전송거리로 인한 경로 손실을 보완해야 할 것이다. OTFS 체계의 LEO 위성 통신의 경로 손실은 [6]에서 unmanned aerial vehicle (UAV)의 도움으로 개선됨을

확인할 수 있다. OTFS 기반의 업링크 전송 시 발생하는 광역 개방성과 이동성에 따른 보안성 문제는 [7]에서 다루어졌다.

## 2-2. UWA 통신에서의 OTFS

UWA 통신은 무선 통신 기술에 비해 긴 지연 확산, 낮은 음파 속도로 인한 주변 잡음, 심각한 도플러 이동 등의 어려움을 느끼고 있다. 고속 UWA 통신에서의 OFDM은 inter-carrier interference (ICI)로 인해 성능이 저하된다. OTFS는 다중 경로의 지연 확산과 도플러 효과를 동시에 완화한다. [8]에서 동적 UWA 환경에서 높은 도플러 확산에 OFDM보다 OFDM가 더 나은 대안임을 확인할 수 있다. UWA 채널에서 OTFS의 symbol error probability (SEP)는 [9]에 의해 평가된다. OTFS는 최근 고속 차량 통신 시스템에서 제안되어 왔음에도 채널 등화로 인해 UWA 통신에서의 복잡성이 높다. [10]에서 2차원 decision feedback equalizer (DFE)를 통해, [11]에서는 2차원 passive time reversal (PTR) 수신기를 제안하여 UWA에 OTFS를 적용한 시스템에서 낮은 복잡도로 높은 성능을 달성하였다. 무선 통신에서 deep neural network (DNN)은 OFDM 시스템의 수신기에서 좋은 성능을 보여주었다 [12]. DNN 기반의 신호 감지를 통해 UWA 통신에서 ICI 및 ISI에 의해 왜곡된 OTFS 신호를 복구할 수 있다. 이는 기존 zero-forcing (ZF), linear minimum mean square error (LMMSE) 그리고 message passing (MP) 검출기보다 낮은 bit error rate (BER)를 달성하였다 [13].

## III. 결론

현재 5G에서 사용되고 있는 OFDM은 높은 peak-to-average power ratio (PAPR), 주파수 오프셋에 대한 민감도, 도플러 영향 등 많은 문제점을 가지고 있다. 특히 도플러 효과가 있는 환경에서 시스템의 성능을 저하시킬 수 있다. OTFS는 2차원 연산과 DD 영역에서의 신호처리를 통해 기존 OFDM의 문제점을 보완하기에 적합하다. 그렇기 때문에 OTFS를 통해 더 높은 수준의 통신 시스템의 요구를 달성할 가능성이 있다. 본 논문에서는 이러한 도플러가 높은 통신 환경에서 OTFS를 적용한 기존 연구를 검토하였다.

## ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by the Korea government (MSIT) in part under the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by (NRF-2022R1F1A1065367 and NRF-2022R1A4A3033401), and in part under the ITRC support program (IITP-2021-0-02046).

## 참 고 문 헌

- [1] X. Liu, G. Qiao, X. Qing, N. Zheng and T. Li, "Closed-Form Expression for BER of CP-OFDM Systems Over an Underwater Acoustic Channel With Statistical Characterization," in *IEEE Communications Letters*, vol. 26, no. 8, pp. 1745-1749, Aug. 2022.
- [2] H. Halbauer, T. Wild, "Towards Power Efficient 6G Sub-THz Transmission," 2021 Joint European Conference on Networks and Communications & 6G Summit, pp. 25-30, 2021.
- [3] T. Thaj, E. Viterbo and Y. Hong, "General I/O Relations and Low-Complexity Universal MRC Detection for All OTFS Variants," in *IEEE Access*, pp. 96026-96037, 2022.
- [4] P. Raviteja, K. T. Phan, Y. Hong and E. Viterbo, "Interference Cancellation and Iterative Detection for Orthogonal Time Frequency Space Modulation," in *IEEE Transactions on Wireless Communications*, pp. 6501-6515, Oct. 2018.
- [5] C. Li, L. Zhu, C. Guo, T. Liu and Z. Zhang, "Intelligent blind source separation technology based on OTFS modulation for LEO satellite communication," in *China Communications*, pp. 89-99, July. 2022.
- [6] J. Shi, J. Hu, Y. Yue, X. Xue, W. Liang and Z. Li, "Outage Probability for OTFS Based Downlink LEO Satellite Communication," in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, pp. 3355-3360, Mar. 2022.
- [7] J. Hu, J. Shi, S. Ma and Z. Li, "Secrecy Analysis for Orthogonal Time Frequency Space Scheme Based Uplink LEO Satellite Communication," in *IEEE Wireless Communications Letters*, pp. 1623-1627, Aug. 2021.
- [8] M. J. Bocus, A. Doufexi and D. Agrafiotis, "Performance of OFDM-based Massive MIMO OTFS Systems for Underwater Acoustic Communication," *IET Communications*, pp. 588-593, Mar. 2020.
- [9] S. B. T. P, J. Francis, P. C. Chivurala and R. David Koilpillai, "Performance of OTFS and OCDM Schemes in Underwater Acoustic Communication Channels," *OCEANS 2022 - Chennai*, pp. 1-6, 2022.
- [10] L. Jing, H. Wang, C. He, Y. Zhang and H. Yin, "Two Dimensional Adaptive Multichannel Decision Feedback Equalization for OTFS System," in *IEEE Communications Letters*, pp. 840-844, Mar. 2021.
- [11] L. Jing, N. Zhang, C. He, J. Shang, X. Liu and H. Yin, "OTFS underwater acoustic communications based on passive time reversal," *Applied Acoustics*, pp. 108386, 2022.
- [12] H. Ye, G. Y. Li and B. -H. Juang, "Power of Deep Learning for Channel Estimation and Signal Detection in OFDM Systems," in *IEEE Wireless Communications Letters*, pp. 114-117, Feb. 2018.
- [13] S. Zhang, Y. Zhang, J. Chang, B. Wang and W. Bai, "DNN-based Signal Detection for Underwater OTFS Systems," 2022 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC Workshops), pp. 348-352, 2022.