

CP-OTFS 와 RCP-OTFS 의 성능 연구

차은영, 김형석, 안해성, 김정창

한국해양대학교

cha.silverzero@g.kmou.ac.kr, hskim19@g.kmou.ac.kr, haesung@g.kmou.ac.kr,

jchkim@kmou.ac.kr

A Study on Performance of CP-OTFS and RCP-OTFS

Eunyoung Cha, Hyeongseok Kim, Haesung Ahn, Jeongchang Kim

Korea Maritime and Ocean University

요 약

본 논문에서는 높은 이동성 요구를 만족하기 위한 새로운 변조기술인 OTFS (orthogonal time frequency space) 시스템을 살펴보고 주파수 효율을 높이기 위해 제안된 RCP-OTFS (Reduced Cyclic prefix OTFS) 와 CP-OTFS (Cyclic Prefix OTFS)의 성능을 비교한다.

1. 서론

최근, 이동통신 이용자들의 데이터 요구 수요가 증가함에 따라 이동통신 표준화 기구인 3GPP (third generation partnership project) 에서는 5 세대 이동통신 기술인 5G (fifth generation) 표준을 개발하였다[1]. 3GPP 에서는 ITU-R (international telecommunication union-radiocommunication)의 IMT-2020 (international mobile telecommunication)에서 제시하는 높은 데이터 속도 등의 요구사항을 만족시키기 위한 표준화 작업이 진행 중이다.

특히, 이동성에 관한 요구가 4G (fourth generation)에 비해 5G 에서는 350km/h 에서 500km/h 로 늘어났다. 4G 와 5G 에서 사용되는 직교 주파수 분할 다중화 (orthogonal frequency division multiplexing: OFDM) 변조 방식은 높은 속도 이동환경에서 발생하는 도플러 천이(shift)에 취약하므로 높은

이동환경에서는 더 이상 효과적이지 않다[2].

높은 이동성 요구를 만족하기 위해 OTFS (orthogonal time frequency space) 변조 방식이 새로운 파형의 후보 기술로 제안되었다[3]. OTFS 변조 방식은 delay-Doppler 영역에 신호를 맵핑하고 시간, 주파수 축으로의 확산(spreading)을 적용하여 지연 확산과 도플러 천이 현상을 효과적으로 해결할 수 있다. 이는 기존의 CP-OFDM (cyclic prefix OFDM) 변조 시스템의 전처리 과정으로 볼 수 있으므로 기존 OFDM 변조 시스템에 OTFS 변조 시스템을 접목하는 연구가 활발히 진행되고 있다[4]. CP-OTFS 의 제안 이후에, CP 를 전체 프레임단위로 삽입하여 CP 에 의한 오버헤드를 줄이고 주파수 효율을 증가시키기 위한 RCP-OTFS (reduced cyclic prefix OTFS) 가 제안되었다[5].

본 논문에서는 고속 이동 환경에서 CP-OFDM 과 RCP-OTFS, CP-OTFS 의 성능을 비교하고 RCP-OTFS 와 CP-OTFS 의 차이점에 대해 논한다.

2. 시스템 모델

CP-OTFS 는 CP-OFDM 을 확장시킨 개념으로 OFDM 변조 시스템의 사전 처리 및 사후 처리를 이용하여 고속으로 데이터 전송을 가능하게 한다. 그림 1 과 2 는 CP-OFDM 의 송수신기 구조와 CP-OTFS 의 송수신기 구조를 나타낸다.

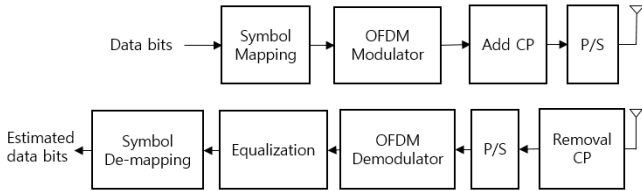


그림 1. CP-OFDM 송수신기 구조

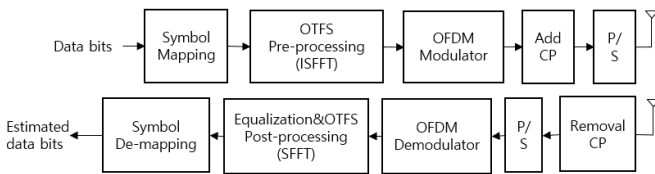


그림 2. CP-OTFS 송수신기 구조

OFDM 변조 시스템에서, 시간-주파수 영역에 맵핑된 입력 데이터 비트는 OFDM Modulator 를 통해 시간영역 신호로 변환되고, 채널을 지나 수신기로 수신된다. 수신단에서는 입력신호를 OFDM Demodulator 를 통해 시간-주파수 영역으로 변환하고 등화과정을 거친 후 입력 데이터 비트를 복조한다.

CP-OTFS 변조시스템에서, 입력 데이터 비트는 delay-Doppler 도메인에 맵핑되고 ISFFT (inverse symplectic fast Fourier transform) 과정을 거쳐 아래 수식 (1)과 같이 시간-주파수 영역 신호로 변환된다:

$$X[n, m] = \frac{1}{\sqrt{MN}} \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{l=0}^{M-1} x[k, l] e^{-j\pi(\frac{ml}{M} - \frac{mk}{N})} \quad (1)$$

이때, k, l 은 각각 도플러 인덱스, 지연 인덱스이며 n 과 m 은 시간 인덱스, 주파수 인덱스를 의미한다. N 과 M 은 각각 OFDM 심볼 개수와 부반송파의 개수를 의미한다. 이후 OFDM Modulator 구간에서 OFDM Modulation 을 거쳐 수식 (2)와 같이 q 번째 OFDM 샘플, n 번째 OFDM 심볼에 대해 시간 영역의 신호 $S[n, q]$ 으로 변환된다. n 개의 OFDM 심볼에 대해 CP 삽입 후 parallel-to-serial(P/S) 과정을 거쳐 최종 송신신호가 생성된다:

$$S[n, q] = \frac{1}{\sqrt{M}} \sum_{m=0}^{M-1} X[n, m] e^{-j2\pi\frac{qm}{M}}. \quad (2)$$

수신단으로 입력된 입력 신호는 serial-to-parallel (S/P)

과정과 CP 제거 이후 가산 백색 가우시안 잡음 (additive white Gaussian noise: AWGN)을 포함하는 신호로 표현 가능하다. n 번째 OFDM 심볼의 시간영역 신호벡터 r_n 은 다음 수식 (3)과 같이 나타난다:

$$r_n = H_n s_n + w_n \quad (3)$$

이때, w_n 은 $M \times 1$ 크기의 n 번째 OFDM 심볼 길이에 해당하는 AWGN 을 나타내고, s_n 은 n 번째 OFDM 심볼의 송신 신호를 나타낸다. n 번째 OFDM 심볼에 대한 채널 H_n 는 수식(4)와 같이 채널 지연 행렬 Π^L 과 도플러 천이 행렬 $\Delta_n^{k_l}$ 로 이루어진다:

$$H_n = \sum_{i=1}^P h_i \Pi^L \Delta_n^{k_l}. \quad (4)$$

이 때, P 와 h_i 는 각각 전파 경로의 개수와 i 번째 경로의 채널이득을 의미한다. 전체 프레임에 대한 채널 이득 행렬 \hat{H} 는 $\text{diag}\{H_1, H_2, \dots, H_N\}$ 의 형태를 가지는 블록 순환 대각 행렬(block circulant diagonal matrix) 형태로 나타난다.

수신 신호 벡터 r 은 OFDM Demodulator 에서 시간-주파수 영역의 신호로 변환된다. 아래 수식 (5)는 n 번째 시간 인덱스와 m 번째 주파수 인덱스에 해당하는 $Y[n, m]$ 을 나타낸다:

$$Y[n, m] = \frac{1}{\sqrt{M}} \sum_{q=0}^{M-1} R[n, q] e^{-j2\pi\frac{qm}{M}}. \quad (5)$$

여기서, $R[n, q]$ 는 n 번째 OFDM 심볼에 대한 q 번째 OFDM 샘플을 나타낸다.

CP-OTFS 는 CP-OFDM 과 동일한 방식으로 등화가 가능하다. 본 논문에서는 등화기법으로 MMSE 기법을 사용하였고 수식 (6)과 같이 나타난다:

$$G_{TF} = (H_{TF} H_{TF}^* + \sigma^2 I)^{-1} H_{TF}^* \quad (6)$$

이 때, H_{TF}^* 는 H_{TF} 의 켈레 전치 행렬이다. H_{TF} 는 시간-주파수 영역에서의 채널을 나타내고, σ^2 는 잡음의 분산(variance) 값을 나타낸다.

시간-주파수 영역에서 등화를 마친 신호 행렬 \tilde{Y} 는 SFFT (symplectic fast Fourier transform) 과정을 통해 최종적으로 delay-Doppler 영역에 맵핑되고 수식 (7)과 같이 나타난다:

$$X[n, m] = \frac{1}{\sqrt{MN}} \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{l=0}^{M-1} \tilde{Y}[n, m] e^{j\pi(\frac{ml}{M} - \frac{mk}{N})} \quad (7)$$

그림 3 은 RCP-OTFS 송신기 구조를 나타낸다. RCP-OTFS 는 CP-OTFS 와 달리 송신단에서 parallel-to-serial (P/S) 과정을 거친 이후에 CP 가 삽입된다.

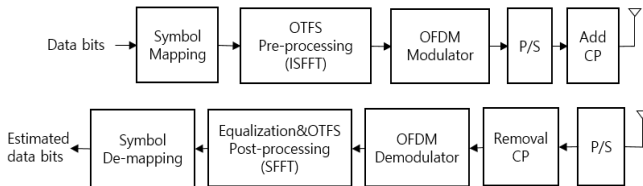


그림 3. RCP-OTFS 송수신기 구조

RCP-OTFS 는 전체 프레임에 대해 CP 가 삽입되므로 각 OFDM 심볼 마다 CP 가 삽입되는 CP-OTFS 에 비해 오버헤드가 1/N 만큼 감소하는 효과가 있다. RCP-OTFS 의 β 는 전체 채널 성분에 대한 대각 순환 행렬로 나타난다.

3. 전산 실험 결과

표 1. 전산 실험을 위한 파라미터

Parameter	Value
Carrier frequency(f_c)	4 GHz
Number of subcarriers(M)	1024
Number of OFDM symbols(N)	128
Subcarrier spacing	15 kHz
Modulation	QPSK

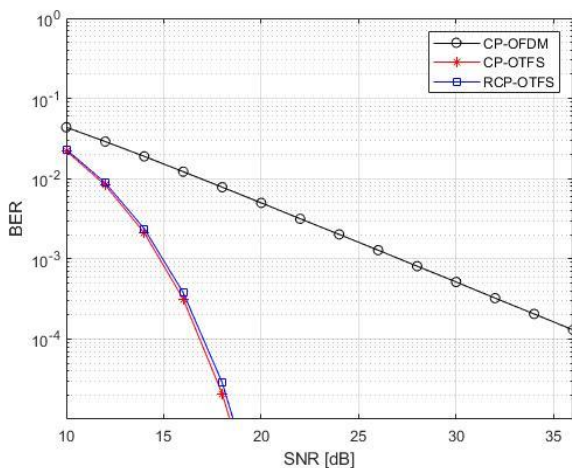


그림 4. TDL-C 채널 하에서 RCP-OTFS, CP-OTFS, CP-OFDM 의 BER 성능

본 논문에서는 수신기가 채널을 완벽하게 알고 있다고 가정하였다. 그림 4 는 500km/h 속도를 가지는 TDL-C 채널

하에서 RCP-OTFS, CP-OTFS, CP-OFDM 의 성능을 나타낸다. RCP-OTFS 와 CP-OTFS 모두 CP-OFDM 과 비교하여 BER = 10^{-3} 지점에서 CP-OFDM 에 비해 12dB 정도의 SNR (signal-to-noise ratio) 이득을 보이는 것으로 나타났다. 또한, CP-OTFS 와 RCP-OTFS 는 거의 유사한 성능을 보인다.

4. 결론

본 논문에서는 고속 환경에서의 데이터 전송을 위한 후보 기술인 CP-OTFS 와 RCP-OTFS 에 대해 살펴보았다. 500km/h 속도를 가지는 전송 환경에서 기존의 CP-OFDM 보다 우수한 성능을 보이는 것을 확인하였다. 또한, CP-OTFS 와 RCP-OTFS 는 500km/h 속도의 TDL-C 채널에서 유사한 성능을 보이는 것을 확인 할 수 있다.

ACKNOWLEDGMENT

본 과제(결과물)는 교육부와 한국연구재단의 재원으로 지원을 받아 수행된 사회맞춤형 산학협력 선도대학(LINC+) 육성사업의 연구결과입니다.

참고 문헌

- [1] S. Parkvall, E. Dahlman, A. Furuskar, and M. Frenne, "NR: The new 5G radio access technology," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 1, no. 4, pp. 24-30, Dec. 2017.
- [2] Tiejun Wang, J. G. Proakis, E. Masry and J. R. Zeidler, "Performance degradation of OFDM systems due to Doppler spreading," *IEEE Tran. Wireless Commun.*, vol. 5, no. 6, pp. 1422-1432, June 2006
- [3] R. Hadani, *et al.*, "Orthogonal time frequency space modulation," in *Proc. IEEE Trans. Wireless. Commun. Netw. Conf(WCNC)*, San Francisco, CA, USA, Mar. 2017, pp.1-6.
- [4] H.S.Kim *et al.*, "A Robust Broadcast System Under Time-Varying Channels Based on OTFS Modulation", *Broadband Multimedia Systems and Broadcasting(BMSB)*, Chungdu, China, Aug. 2021, to be proceeded
- [5] P. Raviteja, Y. Hong, E. Viterbo and E. Biglieri, "Practical Pulse-Shaping Waveforms for Reduced-Cyclic-Prefix OTFS," *IEEE Trans. Veh. Technol.* vol. 68, no. 1, pp. 957-961, Jan. 2019