

# Orthogonal Time Frequency Space 검출기 성능 평가

이예진, 장근영, 정해준, 최민석, 신현동  
경희대학교 전자정보융합공학과

{vexia, wkdrmsduddl, haejoonjung, choims, hshin} @khu.ac.kr

## Performance Evaluation of Orthogonal Time Frequency Space Detectors

Yejin Lee, Geunyeong Jang, Haejoon Jung, Minseok Choi, Hyundong Shin

Dept. of Electronics and Information Convergence Eng., Kyung Hee University

### 요 약

기존의 orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) 시스템 기술은 이동성이 높은 환경에서 도플러 효과에 취약했던 한계점이 존재하였다. 6G 이동통신에선 고용량 멀티미디어 서비스의 증가로 고속 데이터 통신 기술이 중요해졌으며, 고속 이동환경에서도 이러한 서비스의 지원이 요구된다. 따라서 본 논문에서는 이러한 한계점을 극복할 수 있는 orthogonal time frequency space (OTFS) 시스템을 분석하고, 다양한 검출기를 사용한 시뮬레이션을 비교, 분석한다.

### I. 서 론

모바일 단말기의 증가와 저궤도 위성 통신, 무인 이동체의 활용성이 증가함에 따라서 무선이동통신에서의 고속 데이터 통신 기술이 중요하게 부각되고 있으며 향후 6G 이동통신에서도 데이터 전송률, 모빌리티, 지연속도 등 다양한 방면에서 높은 성능이 요구된다. 기존에 사용되었던 OFDM 기술은 cyclic prefix (CP)를 이용하여, 다중 경로 페이딩에 의한 inter-symbol interference (ISI)를 극복할 수 있었고, 궁극적으로 수신 신호를 고속으로 등화할 수 있게 어 고속 통신이 가능하게 되었다. 그러나 모빌리티가 더 높은 환경에서는 도플러 효과에 의한 한계점이 분명하였기에 도플러 보상 알고리즘이 필요하다. 따라서 이 문제를 극복하기 위한 새로운 waveform으로 orthogonal time frequency space (OTFS) 기술이 주목받고 있다.

OTFS 시스템은 OFDM 시스템 기반에서 2 차원 inverse symplectic finite Fourier transform (ISFFT) 및 symplectic finite fourier transform (SFFT) 연산을 이용하여 시간-주파수 영역을 딜레이-도플러 영역으로 변환한 후, 일괄적으로 딜레이, 도플러 스프레딩 영향을 한 번에 처리하기 때문에 고속 수신 처리가 가능하다[1]. 또한, 지연-도플러 (delay-doppler, DD)영역에서 이뤄지는 2 차원 변조 기법으로 정보를 담고 있는 심볼을 시간-주파수 (time-frequency, TF) 영역에서 스프레딩시켜 diversity 를 얻을 수 있다. 이에 따라서 시간-주파수 영역에서의 선택성(selectivity)을 갖는 채널이 딜레이-도플러 영역에서 invariant separable 하게 다뤄질 수 있다.

본 논문에서는 현재 연구되고 있는 다양한 OTFS 시스템을 고려하여 각각 다른 검출기를 사용하였을 때의 시뮬레이션을 통해 성능을 비교하고 분석한다.

### II. 본론

#### II-1. 시스템 모델

프레임당 블록 수를  $M$  과  $N$  이라 설정했을 때, OTFS 변조는 DD 영역에서  $M \times N$  2 차원 신호처리를 수행한다.  $P$  개의 전파 경로를 가진 채널을 고려했을 때  $i$  번째 경로에서  $h_i$  는 복소 경로 이득,  $\tau_i = \frac{l_i}{M\Delta f}$  는 지연,  $v_i = \frac{k_i}{NT}$  는 도플러 변이를 나타낸다. 이때 전송되는 OTFS 신호의 전체 프레임 duration 은  $T_f = NT$ , 대역폭은  $B = M\Delta f$  이고  $T\Delta f = 1$  로 설정한다. 또한 채널의 최대 지연은  $\tau_{max} = l_{max}T/M$  이고  $l_i \leq l_{max} < M$  과  $-N/2 < k_i < N/2$  를 만족한다.

$$h(\tau, v) = \sum_{i=1}^{N_r} h_i \delta(\tau - \tau_i) \delta(v - v_i) \quad (1)$$

Rectangular pulse shaping 에 대한 DD 영역에서의 입출력 관계는 아래와 같이 2 차원 컨볼루션으로 표현할 수 있다 [2].

$$\mathbf{Y}(m, n) = \sum_{i=1}^P h_i \alpha_i(m, n) \mathbf{X}([m - l_i]_M, [n - k_i]_N) + w(m, n) \quad (2)$$

위의 식에서  $w(m, n)$  은 분산이  $\sigma_w^2$  으로 독립적으로 동일하게 분포(independent and identically distributed, iid)하는 백색 가우시안 잡음(additive white Gaussian noise, AWGN)이다.

OTFS 의 DD 영역 입출력 관계에 따라 송수신된 정보 샘플 행렬을  $\mathbf{X}$  와  $\mathbf{Y}$  라고 할 때,  $\mathbf{X}^T$  와  $\mathbf{Y}^T$  를 벡터화하여 샘플 벡터  $\mathbf{x} = \text{vec}(\mathbf{X}^T)$ ,  $\mathbf{y} = \text{vec}(\mathbf{Y}^T)$  를 얻을 수 있다. 따라서 DD 영역에서 입출력 관계는  $\mathbf{y} = \mathbf{H} \cdot \mathbf{x} + \mathbf{z}$  로 쓸 수 있다. 이때,  $\mathbf{H}$  는  $NM \times NM$  크기의 DD 채널 벡터이고  $\mathbf{z}$  는 AWGN 벡터이다.

## II-2. ZP 기반 OTFS 검출기

[3]에서는 ZP와 CP에 따른 다양한 OTFS를 제시하여 비교한다. 오버헤드의 비율을 측면에서 단일 ZP 또는 CP를 OTFS 프레임 앞에 추가한 경우가 가장 우수하지만 pilot을 삽입하여 채널을 추정하는 경우 추가적인 오버헤드가 발생한다. 결과적으로 시간 도메인 OTFS 프레임의 각 블록에  $L_g$  샘플의 ZP 또는 CP를 추가한 경우 그리고 ZP 또는 CP를 각 블록에 포함시킨 경우와 유사한 오버헤드의 발생을 확인할 수 있다 [1].

현재 연구되고 있는 OTFS 검출기는 크게 single-domain과 joint multi-domain으로 구분이 가능하다. OFDM에 일반적으로 사용되는 검출기와 유사한 Single-tap 주파수 영역 등화기는 각 서브캐리어가 채널을 통해 전송된 후 직교성을 유지한다. 이는 주파수 영역에서 채널 등화를 허용하여 시간 변동 채널에서 낮은 복잡성을 보여주는 OTFS를 위한 적절한 검출 방법이다. 하지만 이는 이동성이 매우 낮거나 정적인 채널에서만 잘 작동하기 때문에 높은 이동성이 있는 채널에서도 우수한 성능을 제공할 수 있는 linear minimum mean-square error (LMMSE) 검출기가 논의되었다. LMMSE 검출기는 선택적 채널에서 좋은 성능을 제공할 수 있지만 높은 복잡성이 요구되기 때문에 이보다 훨씬 낮은 복잡성을 제공하는 message passing algorithm (MPA) 검출기와 maximum-ratio combining (MRC) 검출기가 논의되었다. ZP-OTFS와 달리 다른 OTFS의 서브 행렬  $K_{m,l}$ 은  $m < l$ 일 때 0이 아닌 행렬이므로 더 높은 검출 복잡도를 요구한다. MRC 검출기는 이러한 ZP-OTFS를 사용하여 보다 낮은 복잡도를 달성할 수 있다.

## II-3. 시뮬레이션 결과

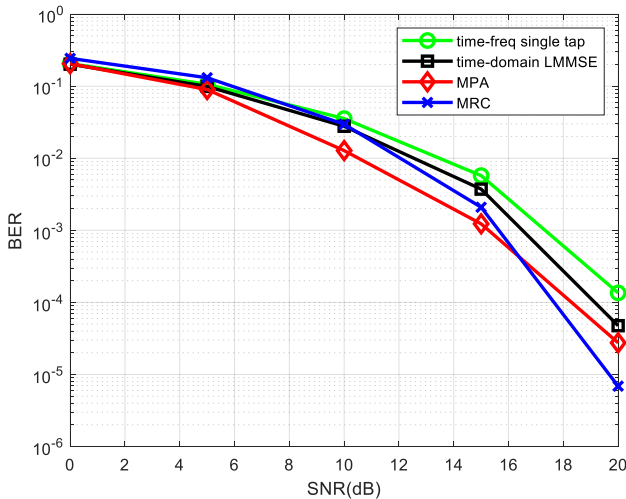


그림 1. 최대 속도 120km/h 시뮬레이션 결과

그림 1과 2의 그래프로 결과가 표현된 시뮬레이션에 공통적으로 이용된 파라미터는  $M = 48$ ,  $N = 32$ 이며, carrier frequency는 4GHz,  $\Delta f = 15$ KHz로 설정하였다. 4-QAM modulation을 사용하였으며, 채널 딜레이 모델은 EVA 표준 모델을 사용하였다. 그림 1의 속도는 120km/h이고, 그림 2의 속도는 500km/h로 가정하였다. 성능 비교는 signal noise ratio (SNR)에 따른 bit error rate (BER)로 분석한다.

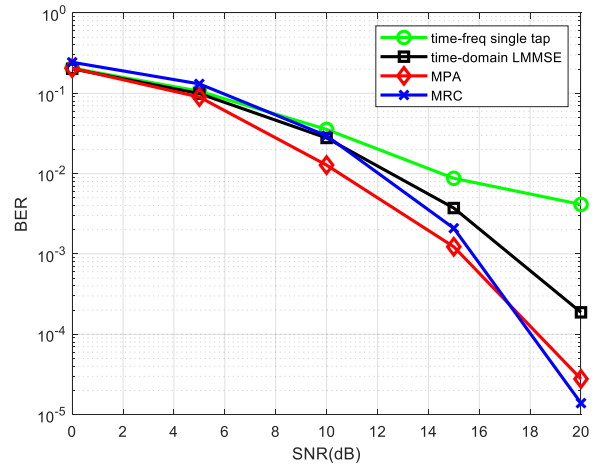


그림 2. 최대 속도 500km/h 시뮬레이션 결과

그림 1을 보면 SNR이 증가함에 따라 전체적으로 BER 수치가 낮아지는 것을 확인할 수 있다. SNR이 20dB일 때 가장 낮은 BER 수치는 MRC 검출기를 사용한 시뮬레이션 결과이며, 이는 MRC 검출기가 가장 좋은 성능을 보인다는 것을 의미한다. 그림 2는 속도에 따른 도플러 영향이 커짐에 따라 그림 1보다 대체적으로 낮은 성능을 보이게 되지만, Single-tap 이퀄라이제이션은 성능 하락도가 더욱 크고, MRC 검출기는 그림 1과 비교적 유사한 성능을 보이며, 가장 좋은 성능을 달성한다.

## III. 결론

본 논문에서는 ZP를 사용한 OTFS 시스템을 기반으로 다양한 검출기를 사용하였을 때의 시뮬레이션을 통해 성능을 비교 분석하였다. MRC 검출기가 다른 검출기보다 좋은 성능을 달성하는 것을 확인하였고, 고속 이동환경에서도 거의 유사한 성능을 보여, 다른 검출기보다 비교 우위에 있음을 살펴보았다.

## ACKNOWLEDGMENT

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

## 참고 문헌

- [1] T. Thaj and E. Viterbo, "Low Complexity Iterative Rake Decision Feedback Equalizer for Zero-Padded OTFS Systems," IEEE Trans. Vehicular Technology, vol. 69, no. 12, pp. 15606-15622, Dec. 2020.
- [2] T. Thaj and E. Viterbo, "Low Complexity Iterative Rake Detector for Orthogonal Time Frequency Space Modulation," in Proc. IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC) pp. 1-6, 2020.
- [3] Yi Hong, Tharaj Thaj, Emanuele Viterbo, "Delay-Doppler Communications: Principles and Applications," Academic Press, Feb 11, 2022.