

높은 도플러와 시간 지연을 효과적으로 보상하기 위한 OTFS 시스템과 OFDM의 성능 비교 및 평가

박 병 학*, 유 흥 균^o

Performance Evaluation and Comparison of OTFS and OFDM Systems Compensating the High Doppler Frequency and Delay Time

Byounggak Park*, Heung-Gyoon Ryu^o

요 약

이동통신에서 5세대에 해당하는 5G(5th Generation)는 여러 가지 요구사항이 이전 세대의 이동통신인 4G(4th Generation)보다 크게 증가했다. 요구사항에는 사용자 체감속도, 최대 데이터 전송률, 스펙트럼 효율, 지연속도, 이동성, 네트워크 에너지 효율, 연결성 등이 있다. 이와 같은 요구사항 중 이동성을 지원하기 위한 파형 연구로써 OTFS(Orthogonal Time Frequency Space)시스템이 제안되었다. 4G와 5G에 사용되는 OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing)은 수신기가 이동하는 환경에서 발생하는 도플러 효과에 매우 취약하다. OFDM에서 도플러 효과에 의한 주파수 편이를 처리하기 위해 수신기에 복잡한 도플러 보상 알고리즘이 필요하며 이는 복잡도의 증가를 야기한다. OTFS는 SFFT(Symplectic Finite Fourier Transform)을 사용하여 지연-도플러 도메인에서 신호를 처리하여 저복잡도로 도플러에 의한 주파수 편이를 효과적으로 처리할 수 있다. 본 논문에서는 Doubly selective channel에서 OTFS의 성능을 평가하며, OTFS를 위해 제안된 수신기 MP(Message Passing) 검출기를 사용한다. 4QAM일 때 우수한 성능을 나타내지만 16QAM으로 변조차원이 올라갈 경우 여전히 우수한 성능을 나타내지만 4QAM에 비해 성능이 큰 폭으로 하락한다.

Key Words : OFDM, Doppler effect, Frequency offset, Waveform, Modulation

ABSTRACT

The 5th generation(5G), which is the fifth generation in mobile communication, has increased a lot of requirements than the 4th generation(4G), which is the mobile communication of the previous generation. There are requirements such as user experienced speed, peak data rate, spectral efficiency, latency, mobility and connectivity. Among these requirements, Orthogonal Time Frequency Space(OTFS) system has been proposed as a waveform study to support mobility. Orthogonal Frequency Division Multiplexing(OFDM), which is used for 4G and 5G, is very vulnerable to the Doppler effect that occurs in a moving environment of a receiver. In order

* 본 연구 결과물은 교육부와 한국연구재단의 재원으로 지원을 받아 수행된 사회맞춤형 산학협력 선도체(LINC+) 육성사업의 연구 결과입니다. 그리고 이 논문은 2016년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (NRF-2016R1D1A1B01008046)

• First Author : Department of electronic engineering, Chungbuk National University, bh9877@naver.com, 학생회원

o Corresponding Author : Department of electronic engineering, Chungbuk National University, ecomm@cnu.ac.kr, 정회원

논문번호 : 201910-216-A-RN, Received October 2, 2019; Revised November 19, 2019; Accepted November 19, 2019

to deal with frequency shift due to Doppler effect in OFDM, a complex Doppler compensation algorithm is needed at the receiver, which leads to an increase in complexity.

OTFS can use the Symplectic Finite Fourier Transform(SFFT) to process signals in the delay-Doppler domain to effectively handle frequency shifts caused by Doppler. In this paper, we evaluate the performance of OTFS in doubly selective channel and use the proposed receiver MP(Message Passing) detector for OTFS. Although 4QAM shows good performance, if the modulation level goes up to 16QAM, it still shows excellent performance, but the performance is significantly reduced compared to 4QAM.

I. 서론

최근에 5G(5th Generation) 이동통신이 대한민국에서 최초로 서비스되기 시작했다. 5세대 이동통신에서는 사용자 체감속도가 10 Mbps에서 100 Mbps로, 최대 데이터 전송률이 1 Gbps에서 20 Gbps로, 스펙트럼 효율이 IMT-advanced에 비해 3배 증가하는 등 이러한 요구사항이 4세대에 비해 높은 성능을 요구한다^[1]. 5G의 이러한 요구사항을 만족하기 위해서 많은 연구가 이루어졌다. 예를 들어, 파형에 관한 연구로 UFMC(Universal Frequency Multi-Carrier), FBMC(Filter Bank Multi-Carrier), WOLA-OFDM (Weighted OverLapped and Add based Orthogonal Frequency Division Multiplexing), OTFS(Orthogonal Time Frequency Space) 등이 있다^[2]. 이미 5G가 상용화가 되었고 5G가 이전 세대 이동통신인 4G(4th generation) LTE(Long Term Evolution)와 같은 변조 방식인 OFDM을 사용하지만^[3], 이러한 연구들은 B5G(Beyond 5G) 와 같이 차세대 이동통신에 사용될 수 있기 때문에 계속해서 연구를 하는 것이 굉장히 중요하다. UFMC, FBMC, WOLA-OFDM 등은 주로 스펙트럼 효율에 관한 연구로 OFDM의 단점중 하나인 높은 OOB(Out Of Band) 전력을 줄이기 위한 연구이다. 위의 연구들과 달리 OTFS는 이전에 비해 높아진 이동성에 대한 지원을 위한 연구이다. 4세대에 비해 5세대에서는 이동성에 대한 요구사항이 350 km/h에서 500 km/h로 늘어났다^[1]. 특히 4G와 5G에서 사용하는 OFDM 변조 방식은 주파수 오프셋에 민감하다는 단점을 가지고 있다. 도플러 효과에 의해 주파수 천이가 발생하면 부반송파 간의 직교성이 깨지게 되어 성능이 열화 된다^[4]. 이를 보상하기 위해서는 복잡한 도플러 보상 알고리즘이 들어가야 하며 이는 OFDM의 큰 장점중 하나인 빠른 처리속도의 의미를 퇴색시킨다. OTFS 변조 방식은 지연-도플러 도메인에서 신호를 처리해서 수신기의 복잡도를 줄이면서 이동 상황에서 발생하는 도플러 효과를 효과적으로

처리할 수 있게 한다. 또한, OFDM은 이동체와 같이 주파수 천이가 발생하는 환경의 경우 MIMO의 안테나 차원이 증가할수록 성능이 열화 되는 단점이 있다. OTFS는 지연-도플러 도메인에서 신호를 처리함으로써 주파수 천이가 있는 환경에서도 MIMO의 차원에 따른 성능열화가 거의 발생하지 않는다. OTFS의 또 다른 장점으로 OTFS 변조를 사전처리-후처리 과정으로 사용하여 지금 사용하고 있는 OFDM과 양립이 가능하다는 점이다. 이는 실제로 이동통신망을 구축하는데 있어서 가장 큰 비용을 차지하는 인프라 교체 비용을 획기적으로 절감할 수 있음을 의미한다. 본 논문에서는 도플러 환경에서 단일 스트림이 OTFS와 OFDM으로 전송될 때 어느 정도 성능차이를 보이는지 전반적으로 평가한다. 변조 차원, 심볼 크기, 도플러 강도와 같은 환경에서 평가를 진행하였다.

II. 시스템 모델

2.1 CP-OFDM 시스템

CP-OFDM은 한 대역을 서로 직교하는 여러 개의 부반송파로 나누어 전송하는 다중 반송파 변조 방식이다. 전체 대역은 주파수 선택적 채널의 특성을 나타내지만 각 부반송파 대역은 주파수 비선택적 채널의 특성을 나타낸다. 따라서 OFDM은 다중경로 채널에 강인하다. OFDM은 iDFT(Inverse Discrete Fourier Transform)을 통해 각 심볼을 부반송파에 맵핑한다. iDFT 연산 후의 심볼을 식(1)과 같이 나타낼 수 있다^[5]. N 은 iDFT의 크기, d_k 는 데이터 심볼을 나타낸다.

$$x[n] = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} d_k e^{i\omega_k n/N} \quad (1)$$

그림 1은 CP-OFDM의 블록 다이어그램이다. iDFT를 통해 심볼을 각 부반송파에 맵핑한 후에 CP(Cyclic Prefix)를 삽입한다. CP는 OFDM 전체 심볼의 뒷부분을 일부 활용하여 구성한다. CP의 길이는 통신 거

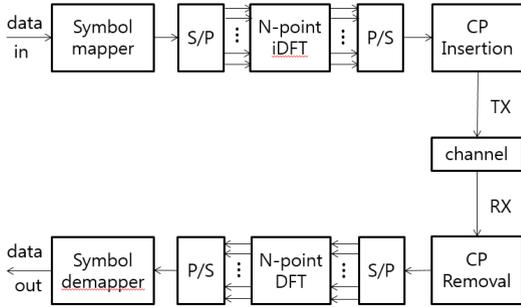


그림 1. CP-OFDM 블록다이어그램
Fig. 1. CP-OFDM system block diagram

리에 따라 발생하는 최대 시간 지연 길이로 한다⁶⁾. CP를 삽입하면 다중경로 채널에 의해 발생하는 ISI를 효과적으로 처리할 수 있다. 수신기에서는 CP를 제거하고 DFT(Discrete Fourier Transform) 연산을 통해 각 부반송파의 심볼을 복조한다.

2.2 OTFS 시스템

OTFS는 지연-도플러 도메인에서 신호를 처리한다. 2차원 심볼을 구성하여 각 심볼을 지연-도플러 도메인에 맵핑하기 위해 ISFFT(Inverse Symplectic Finite Fourier Transform)을 사용한다. 식(2)는 ISFFT연산 후의 심볼을 나타낸다⁷⁾. N_f, N_t 는 DFT와 iDFT의 크기를 나타내고, k, m 은 각각 도플러 도메인과 지연 도메인을 나타낸다.

$$X(k, l) = \sum_{m=0}^{N_f-1} \sum_{n=0}^{N_t-1} x(m, n) e^{j2\pi \left(\frac{lm}{N_f} - \frac{kn}{N_t} \right)} \quad (2)$$

그림 2는 OTFS 시스템의 지연-도플러 도메인과 시간-주파수 도메인의 기저함수를 나타낸 것이다. OFDM에서 iDFT로 주파수 도메인의 부반송파에 심볼을 맵핑하듯이 OTFS에서는 지연-도플러 도메인의 부반송파에 심볼을 맵핑할 수 있다. 그림 2에서 ν 와 τ 는 각각 도플러 도메인과 지연 도메인을 나타내는 변수이다. ISFFT는 지연-도플러 도메인에서 시간-주파수 도메인으로 변환하고, SFFT는 시간-주파수 도메인에서 지연-도플러 도메인으로 변환한다. 그림 3은 시간-주파수 도메인과 지연-도플러 도메인간의 관계를 나타낸다⁸⁾. 2차원 변환인 SFFT와 ISFFT는 시간-주파수 도메인과 지연-도플러 도메인을 서로의 도메인으로 변환하는 관계에 있다. 그림 4는 OTFS 시스템의 블록 다이어그램이다. OTFS 변조기는 지연-도

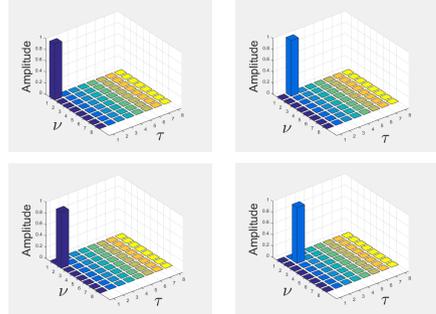


그림 2. (a). 지연-도플러 도메인 OTFS 기저 함수
Fig. 2. (a). Delay-Doppler domain OTFS basis function

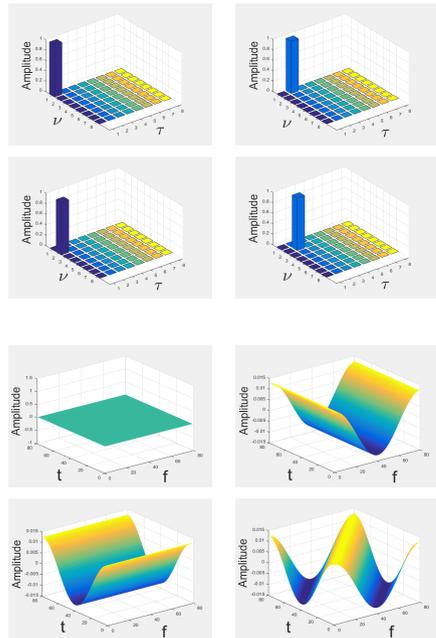


그림 2. (b). 시간-주파수 도메인 OTFS 기저 함수
Fig. 2. (b). Time-Frequency domain OTFS basis function

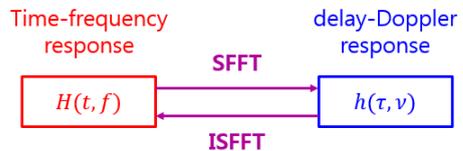


그림 3. 시간-주파수와 지연-도플러 도메인의 관계
Fig. 3. relation of Time-Frequency and Delay-Doppler domain

플러 도메인에서 ISFFT를 통해 심볼을 맵핑한다. 그 다음, OFDM 변조기를 사용해서 최종 변조를 한 뒤 송신한다. 수신기에서는 반대로 적용하여 OFDM 복조기와 OTFS 복조기에서 SFFT(Symplectic Finite Fourier Transform)를 사용해서 지연-도플러 도메인에

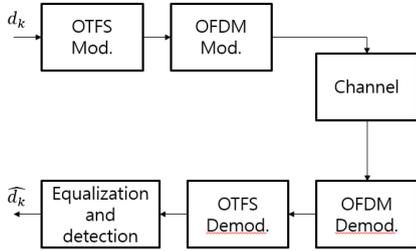


그림 4. OTFS 시스템 블록 다이어그램
Fig. 4. OTFS system block diagram

서의 심볼을 복조한다. 식 (3)은 SFFT를 통해 복조된 신호를 나타낸다⁷⁾.

$$x(m,n) = \sum_{k=0}^{N_f-1} \sum_{l=0}^{N_f-1} X(k,l) e^{-j2\pi(\frac{lm}{N_f} - \frac{kn}{N_f})} \quad (3)$$

OTFS는 그림 4와 같이 기존 OFDM에 일종의 사전코딩-사후코딩 과정을 통해 지연-도플러 도메인에서 도플러 효과에 의해 발생한 주파수 천이를 효과적으로 처리할 수 있다. 그림 5는 시간지연과 이동체에서 발생하는 도플러 효과를 동시에 고려하는 이중 선택적 채널의 시간-주파수 도메인과 지연-도플러 도메인에서의 채널응답을 나타낸 것이다. 그림 5(a)는 시간-주파수 도메인에서의 채널응답을 나타낸 것이다. 모든 범위에 걸쳐서 나타나는 채널 추정은 복잡한 연산을 요구하며 복잡도의 증가는 통신 속도의 감소와 정보 정확성의 저하를 야기한다. 그림 5(b)는 지연-도플러 도메인에서의 채널응답이다. 시간-주파수 채널 응답과 달리 지연-도플러 도메인 채널 응답은 간단하

게 표현된다. 지연-도플러 도메인 채널 응답을 통해 도플러 주파수 추정을 위한 높은 복잡도의 도플러 보상 알고리즘 없이 효과적으로 도플러 효과를 보상할 수 있다.

III. 시뮬레이션 결과 및 분석

본 논문에서는 OTFS 시스템을 설계하고 BER(Bit Error Rate) 성능을 평가한다. AWGN에서 두 시스템의 성능을 비교하고 이중 선택적 채널에서 OTFS 성능을 단독으로 분석한다. 시뮬레이션은 표 1과 같이 진행되었다. 변조 차원은 4QAM, 16QAM을 고려하였다. OTFS에서는 2차원으로 구성되는 심볼의 크기를 8x8과 16x16을 고려하였다. OFDM에서 전체 부반송파의 개수는 64로 하였고, 실제로 사용된 부반송파의 수는 64개로 하였다. CP의 길이는 일반적으로 CP-OFDM에 쓰이는 길이인 전체 부반송파 64의 1/4인 16을 사용하였다. 채널의 도플러 텡은 최대 8을 고려하였다⁹⁾. [9]에 의하면, 주파수 분해능을 최소 단위로 하여 발생하는 최대 도플러 주파수를 Tap으로 표현할 수 있다. 예를 들어, 주파수 분해능이 110Hz일 때 최대 도플러 주파수가 440Hz이면 4Tap으로 도플러를 표현할 수 있다. 수신기로는 OTFS를 효과적으로 등화하기 위한 MP(Message Passing)¹⁰⁾ 검출기를 사용하였다. 또한 OTFS는 OFDM에 기반하는 시스템이기 때문에 채널코딩을 적용하는 경우에도 동일한 성능향상을 보인다⁷⁾.

그림 6은 AWGN 환경에서 OTFS와 OFDM의 BER 성능을 비교한 그림이다. AWGN에서는 OTFS와

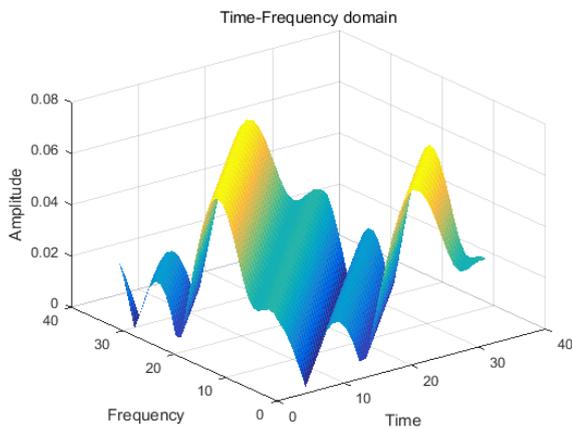


그림 5. (a). 시간-주파수 도메인 채널 응답
Fig. 5. (a). Time-Frequency domain channel response

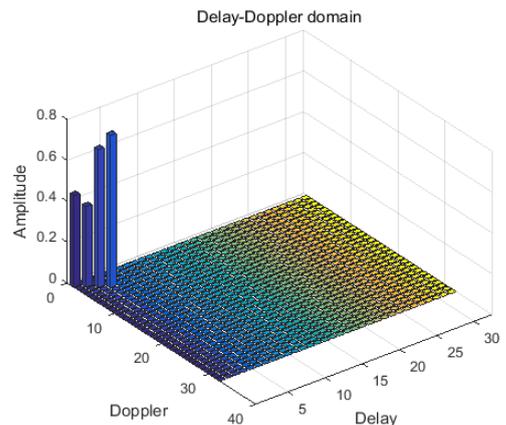


그림 5. (b). 지연-도플러 도메인 채널 응답
Fig. 5. (b). Delay-Doppler domain channel response

표 1. 시뮬레이션 환경
Table 1. Simulation parameters

Parameters	Value	
	OFDM	OTFS
System Model	OFDM	OTFS
Modulation	4~16QAM	4~16QAM
Symbol size	-	(8,8) (16,16)
FFT size	64	-
Used subcarrier	64	-
CP length	16	16
Channel	AWGN	AWGN Doubly-selective channel (4~8Tap)
Equalizer	zero forcing	mp detector

OFDM이 동일한 성능을 보임을 확인할 수 있다.

그림 7은 4QAM에서 OTFS 시스템의 심볼 크기가 8x8과 16x16일 때의 BER 성능을 나타낸 그림이다. 8x8의 심볼 크기일 때 20 dB에서 2×10^{-4} 이었고 16x16의 심볼 크기일 때 20 dB에서 1×10^{-4} 의 BER 성능을 보였다.

그림 8은 16QAM에서 OTFS 시스템의 심볼 크기 8x8과 16x16일 때의 BER 성능을 나타낸 그림이다. 8x8의 심볼 크기일 때 20 dB에서 7×10^{-3} 이었고 16x16의 심볼 크기일 때 20 dB에서 7×10^{-3} 로 다른 심볼 크기에서 같은 성능을 나타내었다. 그림 9는 4QAM에서 도플러강도에 따른 OTFS 시스템의 BER 성능이다. Eb/No가 20 dB일 때 8Tap의 도플러 환경

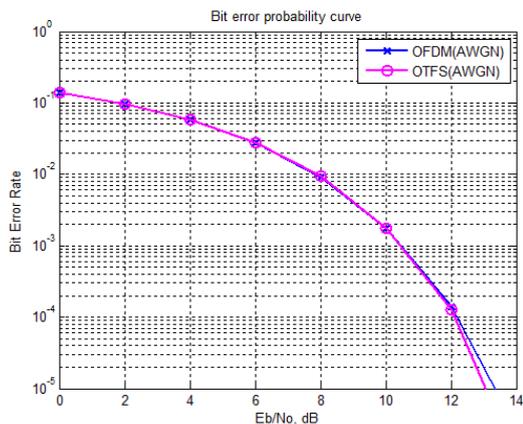


그림 6. AWGN에서 OTFS시스템 BER 성능 (16QAM)
Fig. 6. BER performance of OTFS system in AWGN (16QAM)

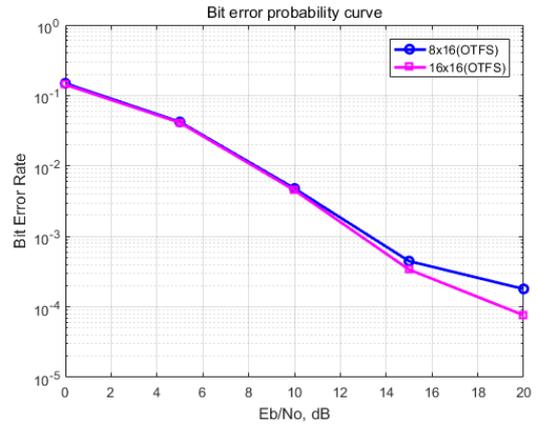


그림 7. 4QAM에서 심볼 크기별 OTFS시스템 BER 성능
Fig. 7. BER performance of OTFS system at 4QAM about symbol size

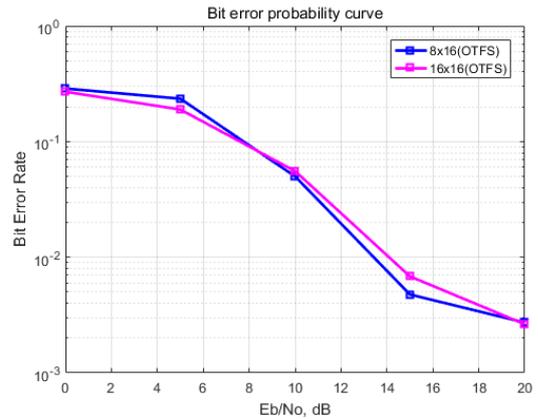


그림 8. 16QAM에서 심볼 크기별 OTFS 시스템 BER 성능
Fig. 8. BER performance of OTFS system at 16QAM about symbol size

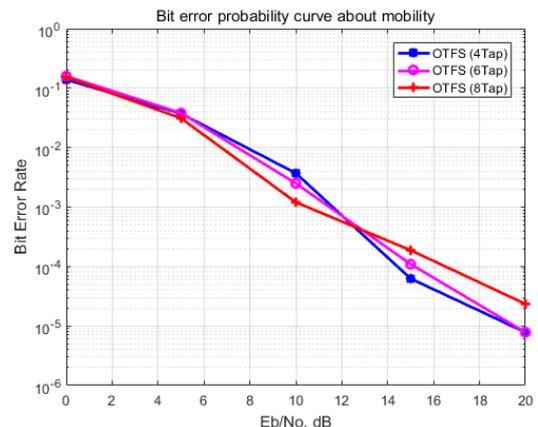


그림 9. 도플러 강도별 OTFS 시스템 BER 성능 (4QAM)
Fig. 9. BER performance of OTFS system about Doppler strength (4QAM)

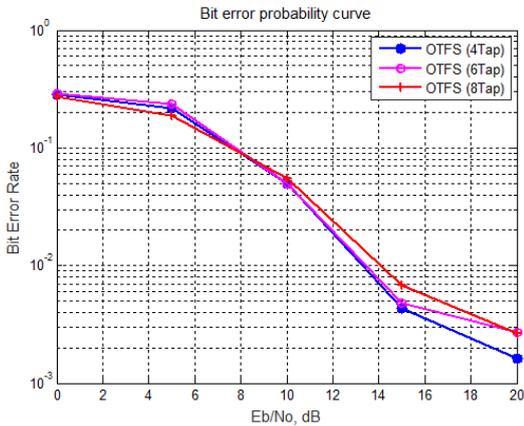


그림 10. 도플러 강도별 OTFS 시스템 BER 성능 (16QAM)
 Fig. 10. BER performance of OTFS system about Doppler strength (16QAM)

에서 다소 성능저하가 관찰되었다.

그림 10은 16QAM에서 도플러강도에 따른 OTFS 시스템의 BER 성능이다. Eb/No가 20dB일 때, 6, 8Tap에서 동일한 성능을 나타냈다.

IV. 결 론

본 논문은 도플러 효과와 시간 지연을 동시에 고려하는 이중 선택적 채널에서 OTFS 시스템의 성능을 평가하였다. OFDM은 직교 주파수 다중 반송파 변조 시스템으로 이동 상황에 발생하는 도플러 효과에 의한 주파수 천이에 직교성이 깨지게 되어 심한 성능 열화가 발생하게 된다. OTFS 시스템은 지연-도플러 2차원 도메인에서의 신호 처리를 통해 시간 지연과 도플러 주파수를 효과적으로 처리할 수 있다. 또한 OTFS의 성능을 더 향상시키기 위해 MP 검출기가 제안되었다. 시뮬레이션 결과 OTFS 시스템의 2차원 프레임 크기에 따른 성능의 유의미한 변화는 관찰되지 않았다. 4QAM일 때 OTFS는 20 dB에서 1×10^{-4} 의 BER 성능을 보였다. 16QAM일 때 OTFS는 20 dB에서 7×10^{-3} 의 BER 성능을 보였다. 4QAM에서 16QAM으로 변조차원이 올라가면서 성능의 변화폭이 크게 나타났다. 또한 다양한 도플러 강도에서 성능을 비교한 결과 8Tap의 도플러 주파수 천이를 일으키는 환경에서 약간의 성능저하를 보였으나 여전히 우수한 성능을 보였다. MP 검출기를 사용할 경우 4QAM에서 16QAM으로 변조차원이 올라갈 때 큰 폭으로 성능이 하락한다. 이런 문제점은 다른 수신기와

병행하여 저차원 변조의 경우 MP 검출기를 사용하고 고차원에서는 다른 수신기를 사용하거나 MP 검출기의 성능을 개선하여 고차원에서도 사용할 수 있게 하는 방법이 있을 것이다.

References

- [1] Recommendation IT. 2083-0, "IMT Vision - Framework and Overall Objectives of the Future Development of IMT for 2020 and Beyond," Sep. 2015.
- [2] R. Zayani, Y. Medjahdi, H. Shaiek, and D. Roviras, "WOLA-OFDM: A potential candidate for asynchronous 5G," 2016 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps), pp. 1-5, Washington, DC, USA, Dec. 2016.
- [3] M. Shafi, et al., "5G: A tutorial overview of standards, trials, challenges, deployment, and practice," in IEEE J. Sel. Areas in Commun., vol. 35, no. 6, pp. 1201-1221, Jun. 2017.
- [4] J. Yang, "Doppler spread estimation and data detection by discrete fourier transform and least-square algorithm in time domain for mobile OFDM systems," 2014 Int. Conf. Wireless Commun. and Sensor Netw., pp. 366-370, Wuaan, China, Dec. 2014.
- [5] C. An and H.-G. Ryu, "Design and performance evaluation of NFDm system for efficient frequency resource utilization," J. IEIE, vol. 55, no. 9, pp. 3-9, Sep. 2018.
- [6] P. Banelli, S. Buzzi, G. Colavolpe, A. Modenini, F. Rusek, and A. Ugolini, "Modulation formats and waveforms for 5G networks: Who will be the heir of OFDM?: An overview of alternative modulation schemes for improved spectral efficiency," in IEEE Sign. Process. Mag, vol. 31, no. 6, pp. 80-93, Nov. 2014.
- [7] R. Hadani and A. Monk, "OTFS: A new generation of modulation addressing the challenges of 5G," arXiv:1802.02623 [cs], Feb, 2018.
- [8] C. An and H.-G. Ryu., "Design and performance evaluation of OTFS modulation system using 2D iDFT and DFT," J. IEIE, vol.

54, no. 9, pp. 14-20, Sep. 2019.

- [9] Y. Hong, *Orthogonal Time Frequency Space (OTFS) Modulation*(2019), Retrieved Nov. 15, 2019, from https://ecse.monash.edu/staff/eviterbo/OTFS-VTC18/Tutorial_ICC2019__OTFS_modulation.pdf.
- [10] P. Raviteja, K. T. Phan, Y. Hong, and E. Viterbo, "Interference cancellation and iterative detection for orthogonal time frequency space modulation," in *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 17, no. 10, pp. 6501-6515, Oct. 2018.

유 흥 균 (Heung-Gyoon Ryu)



1988년~현재 : 충북대학교 전자공학과 교수

2002년 3월~2004년 2월 : 충북대학교 컴퓨터정보통신연구소 소장

<관심분야> 무선통신, B5G/6G 이동통신, 위성통신, 통신회로 설계 및 통신 신호처리

[ORCID:0000-0002-7368-9860]

박 병 학 (Byounggak Park)



2019년 2월 : 충북대학교 전자공학과(공학사)

2019년 3월~현재 : 충북대학교 전자공학과 석사과정

<관심분야> 무선통신시스템, 차세대 통신시스템

[ORCID:0000-0002-4052-7398]