

OTFS(Orthogonal Time Frequency Space) 변조를 사용하는 MIMO(Multiple Input Multiple Output) 시스템 설계와 성능 평가

Design and Performance Evaluation of MIMO(Multiple Input Multiple Output) System Using OTFS(Orthogonal Time Frequency Space) Modulation

안 창 영 · 유 흥 군

Changyoung An · Heung-Gyoon Ryu

요 약

본 논문에서는 고속 데이터 송수신을 위해 2차원 iDFT(inverse Discrete Fourier Transform) 및 DFT(Discrete Fourier Transform) 연산을 이용하여 Delay-Doppler 스프레딩 영향을 고속 수신 처리하는 OTFS(Orthogonal Time Frequency Space) 변조 시스템과 OTFS-MIMO(Multiple Input Multiple Output) 시스템을 평가하고 분석한다. 특히 OTFS 변조를 사용하는 MIMO 시스템은 높은 Doppler 효과가 존재하는 채널에서도 시스템의 용량 저하가 거의 없이 모든 데이터 스트림을 전송할 수 있다. 시뮬레이션 결과, 1×1 OTFS 변조 시스템의 전송률은 2×2 OTFS-MIMO 시스템에서 한 스트림의 전송률과 유사함을 확인할 수 있다. 즉, 2×2 OTFS-MIMO 시스템은 높은 Delay-Doppler 영향이 존재하는 환경에서도 1×1 OTFS 변조 시스템과 비교하여 거의 2배의 전송률을 확보할 수 있음을 확인할 수 있다.

Abstract

In this paper, we have evaluated and analyzed OTFS(Orthogonal Time Frequency Space) modulation and OTFS-MIMO(Multiple Input Multiple Output) system. OTFS modulation can concisely compensate delay-Doppler spreading effect by using 2D(2-Dimension) iDFT(inverse Discrete Fourier Transform) and DFT(Discrete Fourier Transform) operation. It enables OTFS system to transmit high-speed data. Especially, OTFS-MIMO system can transmit all data streams without performance degradation on high Doppler frequency channel. As simulation results, we have confirmed that 1×1 OTFS system's achievable rate is a similar to each stream of 2×2 OTFS-MIMO system. That is, we have also confirmed that 2×2 MIMO system can completely achieve double achievable rate in comparison with OTFS system on high Doppler frequency channel.

Key words: OTFS, OTFS-MIMO, Delay-Doppler, 2D iDFT, 2D DFT

I. 서 론

현재 고용량 멀티미디어 서비스 및 모바일 단말기의 급격한 증가로 이동통신에서 고속 데이터 전송 기술이

「이 논문은 2016년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2016R1D1A1B01008046), 그리고 본 연구는 미래창조과학부 및 정보통신기술진흥센터의 정보통신·방송 연구개발사업의 일환으로 수행하였음[B0717-16-0081, 밀리미터파 대역 5G 안테나 3차원 빔 측정설비 기반구축].」

충북대학교 전자공학과(Department of Electronics Engineering, Chungbuk National University)

· Manuscript received February 16, 2017 ; Revised March 23, 2017 ; Accepted June 1, 2017. (ID No. 20170216-015)

· Corresponding Author: Heung-Gyoon Ryu (e-mail: ecomm@cnu.ac.kr)

더욱 중요해졌으며, 저속에서부터 고속에 이르는 다양한 이동환경에서도 이와 같은 고속 데이터 송수신 서비스를 지원하기 위하여 다양한 연구가 수행되고 있다.

기존 단일 반송파 시스템은 다중경로 채널에 의한 ISI 효과를 극복하기 위해서 높은 복잡도를 갖는 등화기가 요구된다^[1]. 이러한 수신기에서 등화 처리시간 때문에 송수신의 고속화가 이루어지기 어렵다. 이와 같은 문제점을 극복하기 위하여 다중반송파 기반의 OFDM 시스템이 등장하였다. OFDM 시스템은 다수의 데이터 심볼을 다수의 부반송파에 맵핑하여 주파수 선택적 채널을 flat fading 채널과 같이 바꾸며, cyclic prefix를 이용하여 다중 경로 페이딩에 의한 ISI 효과를 극복하여, 궁극적으로 수신기에서 1탭으로 이루어진 등화기를 이용하여 수신 신호를 고속으로 등화할 수 있게 한다^[2]. 이러한 수신 처리의 고속화는 전체적인 시스템 전송 효율을 향상시켜 고속 통신을 가능하게 한다. 현재 4G 이동통신 시스템에서는 OFDM 시스템이 핵심 기술로 사용되고 있다^[3]. 그러나 5G 이동통신 시스템에서는 4G 이동통신 시스템보다 더욱 높은 수준의 전송 속도 및 용량을 요구한다^{[4]~[6]}. 이러한 요구를 만족시키기 위하여 다양한 연구가 세계적으로 이루어지고 있으며, 특히 Delay 및 Doppler 스프레딩을 고속으로 효과적으로 등화할 수 있는 OTFS 시스템이 제안되었다^{[7],[8]}.

기존 OFDM 시스템의 경우, CP를 이용하여 다중경로 채널에 의한 Delay 스프레딩 효과만을 극복할 수 있으며, Doppler 스프레딩이 발생할 경우, 이를 보상하기 위한 높은 복잡도의 알고리즘 및 신호처리를 요구하는 문제점이 있다. 강한 Doppler 효과가 있는 상황에서는 Doppler 영향을 효과적으로 복구하지 못하면 시스템의 통신 용량 및 전송 속도가 열화된다^[9]. 기존 OFDM 시스템은 추가적인 Doppler 보상 알고리즘을 사용해야 하며, OFDM 기반의 MIMO 시스템에서도 추가적인 Doppler 보상 알고리즘을 사용해야 하기 때문에, 전체적인 시스템 송수신 속도가 열화될 수 있다.

기존 OFDM 시스템의 문제점을 극복하기 위한 OTFS 시스템은 기존의 OFDM 시스템 기반의 시스템에 2차원 iDFT 및 DFT 연산^[10]을 이용하여, 시간-주파수 도메인을 Delay-Doppler 도메인^[11]으로 변환한 후 한번에 Delay-Doppler 스프레딩 영향을 효과적으로 등화 처리한다. 특히,

5G 이동통신 시스템은 앞으로 보다 고속 이동환경을 지원할 것이기 때문에, Doppler 효과에 대한 보상이 더욱 요구된다.

OTFS 시스템에서는 2차원 iDFT 및 DFT 연산을 이용한 Delay-Doppler 도메인에서 Delay 스프레딩과 Doppler 영향을 한 번에 처리하기 때문에 고속 수신 처리가 가능하고, 전체적인 통신 용량 및 전송 속도의 향상을 기대할 수 있다^{[7],[8]}. 본 논문에서는 이와 같은 OTFS 및 OTFS-MIMO 시스템의 특성을 파악하기 위하여 시스템을 설계하고, 시뮬레이션을 통해 시스템의 성능을 평가하고 분석한다.

II. OTFS 시스템

2-1 OTFS 송신기 및 수신기 개요

OTFS(Orthogonal Time Frequency Space) 변조는 OFDM, FBMC, UFMC 등의 5세대 이동통신 시스템을 위한 후보 변조기술과 CDMA 기술의 2D 확장이다. OTFS는 OFDM을 진화시킨 것으로, 사전 처리 및 사후 처리를 통하여 고속 데이터 전송이 가능하다.

그림 1은 단일 반송파, OFDM, 그리고 OTFS의 기본적인 송신 시스템 구성도를 나타낸다. 단일반송파의 경우 송신 데이터를 디지털 변조한 후, 단일 주파수로 구성된 반송파에 변조된 데이터를 맵핑하여 전송한다. OFDM의 경우는 다수의 송신데이터를 변조한 후, 서로 직교한 다

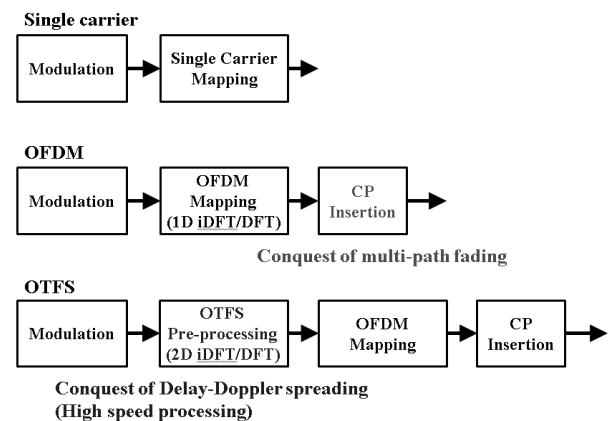


그림 1. 단일 반송파, OFDM, OTFS의 송신기 구성도
Fig. 1. Transmitter block diagrams of single carrier, OFDM, OTFS.

수의 부반송파에 맵핑하여 데이터를 전송한다. 이때 다중 경로에 의한 영향을 감소시키기 위해 CP를 삽입하여 전송한다. OTFS의 경우, 기본적인 OFDM 송신기 구조에 2차원 iDFT/DFT를 이용하여 OTFS 사전처리를 한다. 여기에서는 송신 데이터 신호를 그룹화, 블록으로 구성한 후 iDFT/DFT 연산을 하게 된다. 이렇게 연산을 한 후에는 시간-주파수 도메인에서 Delay-Doppler 영역으로 데이터 차원이 변환된다. 이는 수신기에서 채널에 의해 발생하는 Delay-Doppler 스프레딩 효과를 고속으로 등화하기 위한 전처리 과정이다.

그림 2는 단일 반송파, OFDM 그리고 OTFS 시스템의 수신기 구조를 나타낸다. 단일 반송파의 경우, 채널 환경을 등화하기 위해 높은 복잡도 및 지연시간을 갖는 등화기가 요구된다. 다중경로에 의한 채널 환경을 효과적으로 고속 등화하기 위해 OFDM에서는 CP를 사용한다. 이로 인해 수신기에서는 간단한 1탭 등화기를 사용하게 된다. 그러나 채널에서 Doppler 스프레딩 영향이 발생하게 되면 이를 등화하기 위한 추가적인 보상 알고리즘이 요구된다. OTFS의 경우, 다중경로에 의한 영향 및 Doppler 효과에 대한 채널 효과를 OFDM에 비하여 고속으로 등화하기 위하여 iDFT/DFT 연산을 사용하여 데이터 차원을 변환하며, 수신기에서는 송신기에서의 역 순으로 OTFS 후 처리를 하여 Delay-Doppler 영향을 효과적으로 고속 등화한다.

OTFS 시스템은 다중경로 지연 스프레딩만을 고려한 OFDM 시스템과 비교하여 Delay-Doppler 스프레딩을 모두

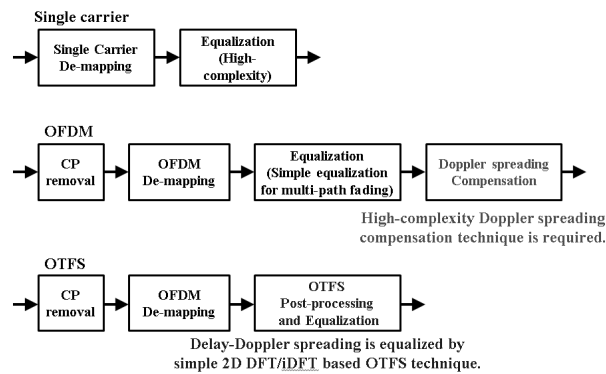


그림 2. 단일 반송파, OFDM, OTFS의 수신기 구성도

Fig. 2. Receiver block diagram of single carrier, OFDM, OTFS.

고려하여 한 번에 채널 환경을 등화하기 때문에 더욱 효율적인 송수신이 가능하다. OTFS 시스템은 시간 지연 및 Doppler 스프레딩 영향이 강한 채널 환경에서는 다중경로 채널 환경 등화 및 Doppler 스프레딩 보상을 따로 해야 하는 OFDM 시스템에 비하여 효율적이고 고속 처리가 가능하나, Doppler 효과가 거의 없는 채널 환경에서는 기존 OFDM 시스템에 비해 높은 복잡도를 갖는 2차원 DFT 및 iDFT 변환 연산을 사용하기 때문에, 기존 OFDM 시스템이 보다 효율적인 선택이 될 수 있다. 즉, Delay-Doppler 스프레딩이 강한 환경에서는 OTFS 변조가 유리하며, Doppler 환경이 거의 없는 환경에서는 OFDM 시스템이 유리하다. 이와 같은 점은 OTFS-MIMO 시스템에도 동일하게 적용된다.

2-2 OTFS 변복조 및 도메인 변환

식 (1)과 식 (2)는 각각 2차원 이산 symplectic Fourier 변환 및 2차원 이산 inverse symplectic Fourier 변환식을 나타낸다. 이 식은 기존의 1차원 Fourier 변환을 확장한 것으로 OTFS의 사전처리 및 사후처리 블록에 사용된다^[8].

$$X(k, l) = \sum_{m=0}^{N_f-1} \sum_{n=0}^{N_t-1} x(m, n) b_{m, n}(k, l)$$

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

$$X(m, n) = \sum_{l=0}^{N_f-1} \sum_{k=0}^{N_t-1} x(k, l) b_{m, n}^*(k, l)$$

$$b_{m, n}^*(k, l) = e^{j2\pi \left(\frac{lm}{N_f} - \frac{kn}{N_t} \right)} \quad (2)$$

식 (1)과 식 (2)에서 N_f 와 N_t 는 각각 시간 및 주파수 영역으로 확장한 블록의 길이를 나타낸다. 예를 들어, 4×4의 블록으로 구성된 16개의 정보를 시간 및 주파수 영역으로 각각 4배 스프레딩할 경우, 16×16의 데이터 블록이 생성되며, 이때 N_f 와 N_t 는 각각 16, 16이 된다. 식 (1)에서 $x(m, n)$ 은 시간 및 주파수 영역으로 스프레딩되어 2차원으로 구성된 정보 신호의 블록을 나타내며, m 과 n 은 각각 2차원 정보 블록의 주파수, 시간 영역의 인덱스를 나타낸다. $X(k, l)$ 은 2차원 정보 블록을 DFT 변환한 신호를 나타낸다. $X(k, l)$ 신호는 2차원 구성이며, 1차원

구성으로 재배열한 후, OFDM 변조를 통해 전송하게 된다.

즉, 송신기에서 OTFS 변환은 2차원 신호 블록 구성과 2차원 DFT 변환 연산을 한 후, 이 신호를 OFDM 변조하여 전송하며, 수신기에서는 이와 반대로 OFDM 복조를 한 후 2차원 신호 블록을 구성하고, 이를 2차원 iDFT 연산을 통해 정보 신호를 추출한다. 즉, m-QAM 및 m-PSK와 같이 디지털 변조된 데이터 심볼은 Delay-Doppler 도메인에 맵핑된 후 2차원 DFT 변환을 통해 시간-주파수 도메인으로 변환되고, 이 신호를 OFDM 변조하여 전송한다. 수신기에서는 이와 반대되는 순서로 데이터 신호를 추출한다.

그림 3는 OTFS 기저 함수를 나타낸다. OTFS 변조 시스템은 2차원 iDFT 및 DFT 연산을 이용하여 시간-주파수 도메인을 Delay-Doppler 도메인으로 변환 및 역변환을 수행한다. 일반적으로, 기존의 OFDM 시스템이 iDFT 및 DFT 연산을 이용하여 주파수 영역의 신호를 시간 영역의 신호로 변환 및 역변환한다. OTFS 변조 시스템은 기존 OFDM의 iDFT 및 DFT 연산을 확장한 것으로, 2차원 영역의 연산을 통해 시간 및 주파수 영역을 하나의 블록으로 통합하여 구성하고, 이를 이용하여 송수신을 하게 된다. 예를 들어, 그림 3(a)의 Delay-Doppler 도메인의 신호는 2차원 iDFT 연산을 통해 그림 3(b)와 같이 시간-주파수 도메인의 신호로 변환된다. 즉, 우선 데이터 심볼을 2차원 Delay-Doppler 영역에 할당한 후, 2차원 iDFT 연산을 통해 시간-주파수 영역으로 변환한 후, 시간-주파수 영역의 신호를 다중반송파에 맵핑하여 송수신한다.

III. OTFS-MIMO 시스템

그림 4는 OTFS 시스템의 구성도를 나타낸다. OTFS는 OFDM, UFMFC와 같은 다중반송파 송수신 시스템 모델에 2차원 DFT/iDFT 연산을 이용한 전, 후처리가 추가된다. 이러한 기본적인 OTFS 시스템 구성을 이용하여 MIMO 시스템을 구현할 수 있다.

그림 5는 OTFS-MIMO 시스템의 송수신 블록도를 나타낸다. 이와 같은 다중 안테나를 이용한 MIMO 구성으로 OTFS 시스템은 보다 높은 스펙트럼 효율을 얻을 수 있으며, 특히, 기존의 OFDM을 사용한 MIMO 시스템의 경우 채널 환경에 의해 MIMO의 각 스트림당 전송률(achievable

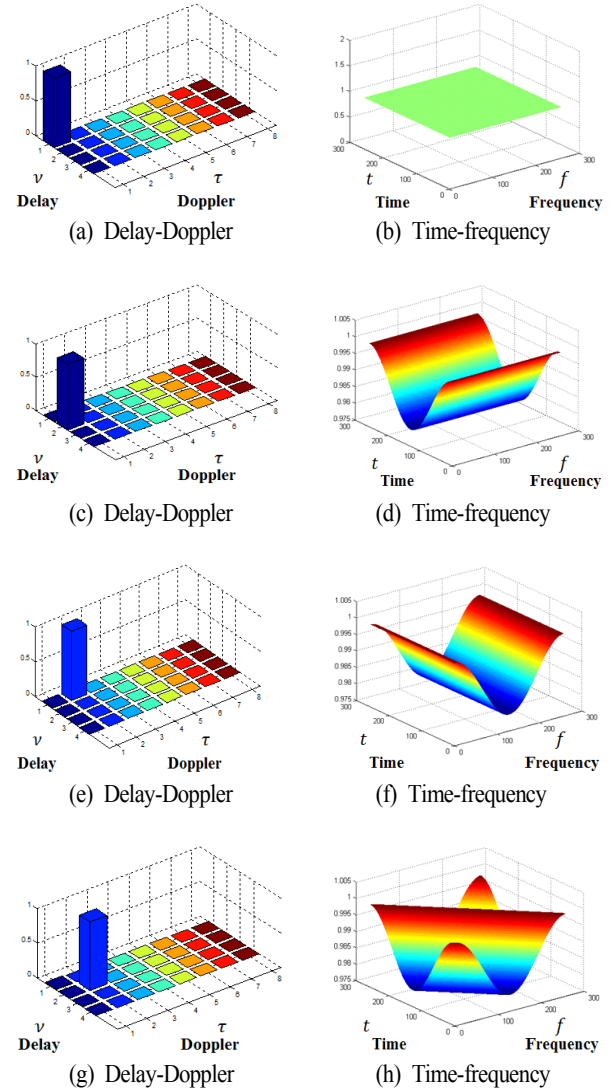


그림 3. OTFS 기저 함수
Fig. 3. OTFS basis function.

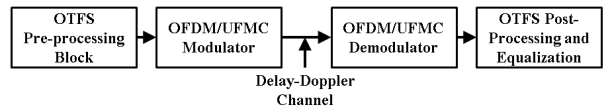


그림 4. OTFS 시스템의 구성도
Fig. 4. Block diagram of OTFS system.

rate)이 열화될 수 있는데, OTFS-MIMO 시스템은 2차원 iDFT/ DFT 연산을 이용하여, MIMO 채널을 보다 효과적으로 등화하여 각 스트림당 용량을 거의 열화없이 유지

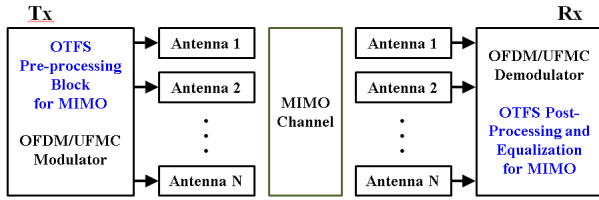


그림 5. OTFS-MIMO 시스템의 구성도
Fig. 5. Block diagram of OTFS-MIMO system.

할 수 있다.

그림 6은 OTFS-MIMO 시스템에서 각 안테나의 채널을 추정하기 위한 각 스트림의 파일럿(Pilot)을 할당하는 방식을 나타낸다. OTFS-MIMO 시스템은 각 안테나의 채널을 추정하기 위하여 Delay-Doppler 영역의 독립된 영역에 파일럿을 할당한다. 할당된 각 안테나의 파일럿들은 최대 Delay 및 Doppler 지연 크기만큼의 공간을 가지며, 이 공간은 서로 겹치지 않는다. 따라서 각 안테나의 채널을 추정함에 있어서 각 신호간의 간섭 없이 채널을 추정할 수 있다. 추정된 Delay-Doppler 도메인의 채널 환경은 하나의 송신 블록안에서는 같은 채널 특성을 갖는다. 이렇게 각 안테나의 채널을 모두 추정한 뒤에는 전체 Delay-Doppler 영역에 데이터를 모두 할당하여 각각의 안테나로 전송하게 된다.

IV. 시뮬레이션 결과 및 분석

표 1은 기본 OTFS 및 OTFS-MIMO 시스템의 특성 및

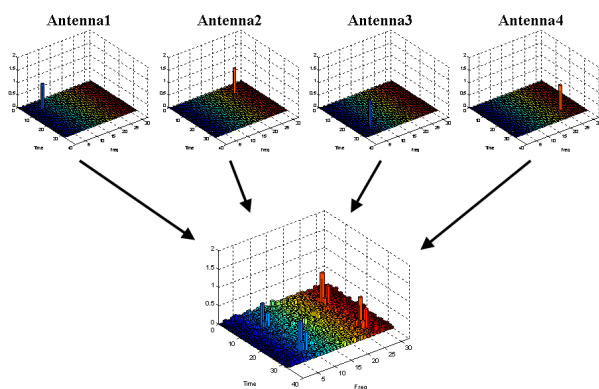


그림 6. OTFS-MIMO 시스템의 파일럿 구성
Fig. 6. Pilot allocation of OTFS-MIMO system.

표 1. 시뮬레이션 환경

Table 1. Simulation parameters.

Parameter	Value
Time domain symbols(N_t)	64
Frequency domain subcarriers(N_f)	64
Time domain spreading factor	8
Frequency domain spreading factor	8
Max delay spread	8
Max Doppler spread	8

전송률 특성을 평가하기 위한 시뮬레이션 파라미터를 나타낸다. 본 연구에서 표 1과 같은 시뮬레이션 변수를 이용하여 기본적인 OTFS 변조 시스템 및 2×2 OTFS-MIMO 시스템을 설계하고, 채널 용량을 평가하였다.

그림 7은 본 연구에서 고려한 2×2 OTFS-MIMO 시스템을 위한 파일럿 할당 방법을 나타낸다. 붉은색은 안테나 1번의 파일럿을 나타내며, 파란색은 안테나 2번의 파일럿을 나타낸다. OTFS-MIMO 시스템을 위한 각 안테나의 파일럿은 Delay-Doppler 영역의 서로 다른 부분에 맵핑되어 전송되고, 이를 이용하여 채널 추정을 수행한다^[8]. 채널추정이 완료되면, 데이터 신호를 Delay-Doppler 도메인의 전체 영역을 사용하여 안테나 1번과 안테나 2번으로 데이터 신호를 전송하게 된다^[8].

본 논문에서는 1×1 OTFS 변조 시스템과 2×2 OTFS-MIMO 시스템의 채널 용량 평가를 위하여 그림 8과 같은

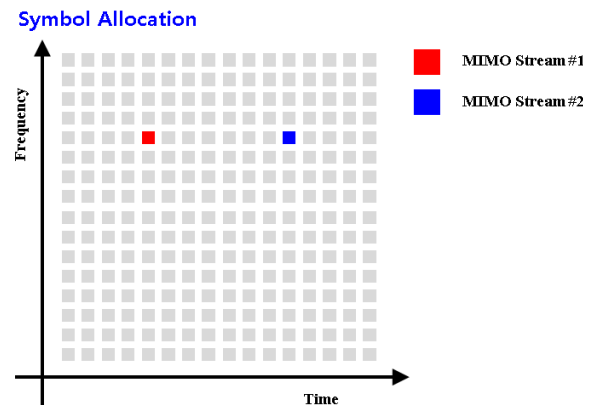


그림 7. 2×2 OTFS-MIMO 시스템의 파일럿 할당 방법
Fig. 7. Pilot allocation method of 2×2 OTFS-MIMO system.

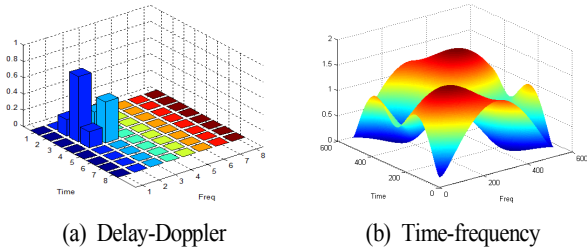


그림 8. 시뮬레이션을 위해 고려한 예제 채널 특성
Fig. 8. Characteristics of the considered example channel for simulation.

Delay-Doppler 스프레딩 채널 환경을 고려하였다. 여기에서 채널 환경으로는 고정된 채널 환경을 고려하였으며, 3개의 시간 지연 탭을 가지며, 2개의 Doppler 스프레딩 탭을 갖는 채널을 고려하였다. 본 논문에서는 MIMO 전송을 위한 다중 안테나 구조에서 안테나 간 영향을 주는 안테나 간 상관성을 고려하지 않았다.

그림 9는 1×1 OTFS 변조 시스템에서 Delay-Doppler 영역에 맵핑된 데이터 심볼을 나타낸다. OTFS 시스템은 그림 9와 같이 맵핑된 데이터 심볼 블록을 2차원 iDFT 연산을 통해 시간-주파수 영역의 신호로 변환한 후, 이 신호를 다수의 부반송파에 맵핑하여 송수신한다.

그림 10은 2×2 OTFS-MIMO 시스템의 파일럿 신호를 나타낸다. 송신 신호를 전송하기 전, 각각의 안테나를 위한 파일럿이 추가되고, 파일럿이 추가된 송신 블록은 채널 특성이 콘볼루션 연산된 것을 확인할 수 있다.

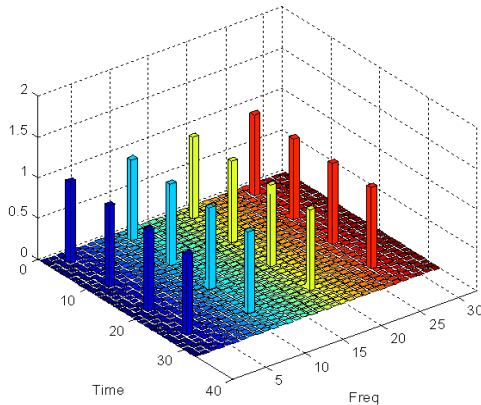


그림 9. 1×1 OTFS 변조 시스템의 송신 신호
Fig. 9. Tx signal of 1×1 OTFS modulation system.

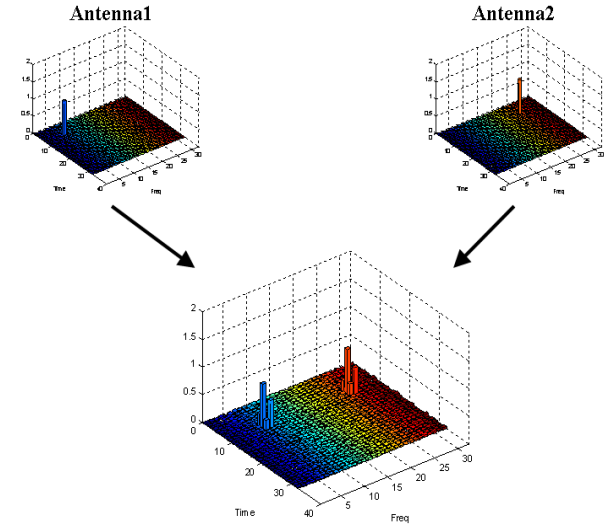


그림 10. 2×2 OTFS-MIMO 시스템의 파일럿 할당
Fig. 10. Pilot allocation of 2×2 OTFS-MIMO system.

그림 11은 1×1 OTFS 시스템의 전송률을 나타낸다. 본 연구에서는 OTFS 및 OTFS-MIMO 시스템의 채널 용량을 평가하기 위하여, SNR이 -10 dB에서 30 dB인 경우의 BPSK, 4-QAM, 16-QAM, 64-QAM, 256-QAM, 1024-QAM 각 변조 레벨에 대한 비트 전송률을 평가한 후 가장 높은 전송률 일 경우를 선택하여 최종적인 전송률을 평가하였다.

그림 11과 그림 12는 2×2 OTFS-MIMO 시스템의 각 스

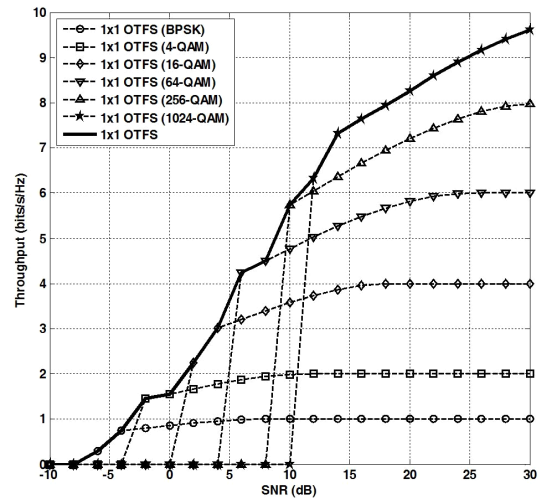


그림 11. 1×1 OTFS 시스템의 전송률
Fig. 11. Achievable rate of 1×1 OTFS system.

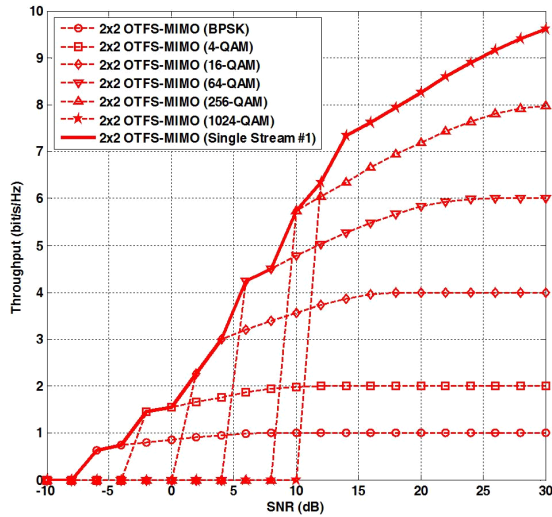


그림 12. 2×2 OTFS-MIMO(1번 스트림)의 전송률
Fig. 12. Achievable rate of 2×2 OTFS-MIMO(Stream #1).

트림당 전송률을 나타낸다. MIMO 스트림 1과 스트림 2는 서로 유사한 전송률을 갖는 것을 확인할 수 있다. SNR 10 dB일 경우, 단위 주파수에서 초당 약 5.8개의 비트 전송을 할 수 있는 것을 확인할 수 있으며, SNR이 향상될수록 고차변조를 사용하여 더 높은 전송률을 달성할 수 있음을 확인할 수 있다.

그림 13은 1×1 OTFS 시스템 2×2 OTFS-MIMO 시스템

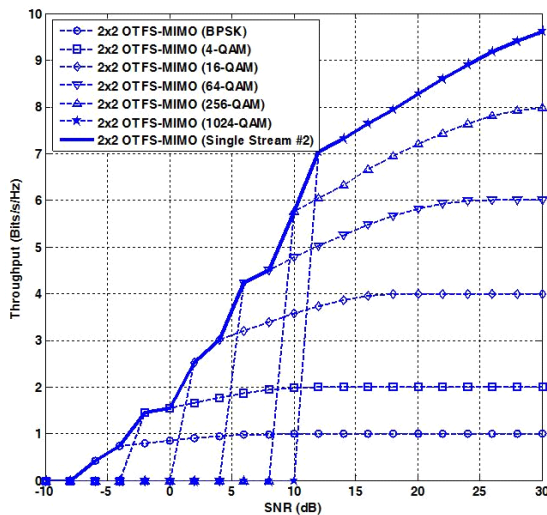


그림 13. 2×2 OTFS-MIMO(2번 스트림)의 전송률
Fig. 13. Achievable rate of 2×2 OTFS-MIMO(Stream #2).

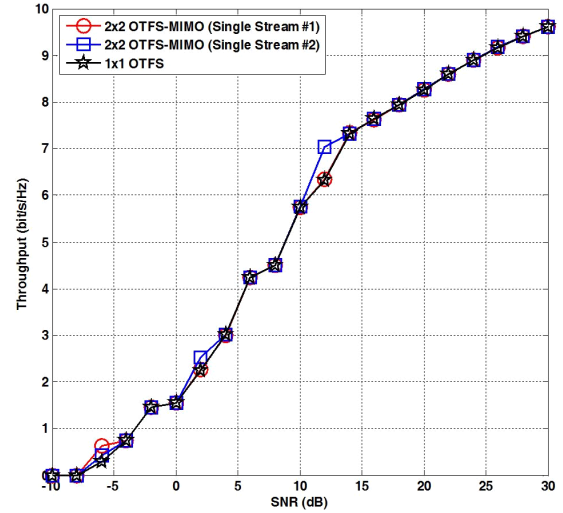


그림 14. 전송률 비교(1×1 OTFS, 2×2 OTFS-MIMO(#1, #2))
Fig. 14. Comparison of achievable rate(1×1 OTFS, 2×2 OTFS-MIMO(#1, #2)).

의 각 스트림에 대한 전송률을 서로 비교한 것이다. 그림 13에서는 1×1 OTFS 시스템과 2×2 OTFS-MIMO 시스템의 각 스트림의 전송률이 서로 유사함을 확인할 수 있다. SNR이 0 dB일 경우, 단위 주파수의 단위 시간당 약 1.5개의 비트를 전송할 수 있으며 SNR이 10 dB일 경우 약 5.8개, SNR이 20 dB일 경우, 약 8.2개의 비트를 전송할 수 있음을 확인할 수 있다. 즉, 2×2 MIMO 시스템에서 각 스트림당 전송률은 1×1 OTFS 시스템의 전송률과 유사함을 확인할 수 있다. 이를 통해 2×2 OTFS MIMO 시스템의 전체 전송률을 1×1 OTFS MIMO 시스템의 전송률 대비 약 2배 높은 것을 확인할 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 OTFS 시스템 및 OTFS-MIMO 1×1 OTFS 시스템과 2×2 OTFS-MIMO 시스템의 각 스트림의 전송률이 서로 유사함을 확인하였다. SNR이 0 dB일 경우, 단위 주파수의 단위 시간당 약 1.5개의 비트를 전송할 수 있으며, SNR이 10 dB일 경우 약 5.8개, SNR이 20 dB일 경우 약 8.2개의 비트를 전송할 수 있음을 확인할 수 있다. 즉, 2×2 MIMO 시스템에서 각 스트림당 전송률은 1×1 OTFS 시스템의 전송률과 유사함을 확인할 수 있다. 이를 통해

2×2 OTFS MIMO 시스템의 전체 전송률은 1×1 OTFS MIMO 시스템의 전송률 대비 약 2배 높은 것을 확인할 수 있다.

References

- [1] J. T. E. McDonnell, T. A. Wilkinson, "Comparison of computational complexity of adaptive equalization and OFDM for indoor wireless networks", *Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 1996. PIMRC'96., Seventh IEEE International Symposium on*, vol. 3, pp. 1088-1091, 1996.
- [2] S. Venkatesan, R. A. Valenzuela, "OFDM for 5G: Cyclic prefix versus zero postfix, and filtering versus windowing", *2016 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, pp. 1-5, 2016.
- [3] Jun Li, Miaowen Wen, Xueqin Jiang, and Yier Yan, "Novel control signal detection for high-rate transmission in LTE-OFDM systems", *2016 IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing(ICSPCC)*, pp. 1-4, 2016.
- [4] A. Osseiran, F. Boccardi, V. Braun, K. Kusume, P. Marsch, M. Maternia, O. Queseth, M. Schellmann, H. Schotten, H. Taoka, H. Tullberg, M. A. Uusitalo, B. Timus, and M. Fallgren, "Scenarios for 5G mobile and wireless communications: The vision of the METIS project", in *Communications Magazine, IEEE*, vol. 52, no. 5, pp. 26-35, May 2014.
- [5] E. Dahlman, G. Mildh, S. Parkvall, J. Peisa, J. Sachs, Y. Selén, and J. Sköld, "5G wireless access: requirements and realization", *Communications Magazine, IEEE*, vol. 52, no. 12, pp. 42-47, Dec. 2014.
- [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 Signal Processing Magazine*, vol. 31, no. 6, pp. 80-93, Nov. 2014.
- [7] 3GPP, "OTFS modulation waveform and reference signals for new RAT", *Co-here, AT & T, CMCC, Deutsche Telekom, Telefonica, Telstra, Tech. Rep. 3GPP R1-163619*, 2016.
- [8] A. Monk, R. Hadani, M. Tsatsanis, and S. Rakib, "OTFS-Orthogonal Time Frequency Space", [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/1608.02993v1>, Aug. 2016.
- [9] Tiejun Wang, J. G. Proakis, E. Masry, and J. R. Zeidler, "Performance degradation of OFDM systems due to Doppler spreading", in *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 5, no. 6, pp. 1422-1432, Jun. 2006.
- [10] Zu Jian Feng, Yong Qing Zou, and Xian-Ling Liang, "A novel array synthesis method based on 2D-IDFT", *2007 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, pp. 2678-2678, 2007.
- [11] S. Choudhary, S. Beygi, and U. Mitra, "Delay-Doppler estimation via structured low-rank matrix recovery", *2016 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, pp. 3786-3790, 2016.

안 창 영



2013년 2월: 충북대학교 전자공학과 (공학사)
 2015년 2월: 충북대학교 전자공학과 (공학석사)
 2015년 3월~현재: 충북대학교 전자공학과 박사과정
 [주 관심분야] 무선통신 시스템

유 흥 균



1988년~현재: 충북대학교 전자공학과 교수
 2002년 3월~2004년 2월: 충북대학교 컴퓨터정보통신연구소 소장
 [주 관심분야] 무선통신시스템, 위성통신, B4G/5G 이동통신 시스템, 통신회로 설계 및 통신 신호 처리