

데이터 시퀀스 매핑 및 대체를 통한 OTFS에서의 PAPR 저감 기법

박 상 욱*, 이 형 원*, 류 관 웅**, 최 권 휴^o

Data Sequence Mapping and Substitution for PAPR Reduction in OTFS

Sangwook Park*, Hyeongwon Lee*, Kwanwoong Ryu**, Kwonhue Choi^o

요 약

Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) 및 Orthogonal Time Frequency Space (OTFS)와 같은 다중 반송파 시스템은 높은 Peak-to-Average Power Ratio (PAPR)로 인해 고출력 증폭기의 효율성이 저하된다. OTFS의 PAPR 문제를 해결하기 위해 제안된 Discrete Fourier Transform spread OTFS (DFT-s-OTFS)는 DFT 사전 코딩을 통해 PAPR을 감소시킬 수 있지만, 이 과정에서 다이버시티 손실로 인해 고속 이동 환경에서 비트 오류율 (Bit Error Rate, BER) 성능 저하가 발생한다. 본 논문에서는 PAPR이 높은 데이터 시퀀스를 PAPR이 낮은 데이터 시퀀스로 대체함으로써, OTFS의 다이버시티를 유지하면서도 PAPR을 효과적으로 줄일 수 있는 PAPR 저감 기법을 제안한다. 이를 위해, 헝가리안 알고리즘을 활용하여 데이터 시퀀스 간의 매핑 관계를 형성하고, 이를 바탕으로 데이터 시퀀스를 대체한다. 모의실험을 통해 제안하는 기법이 기존 OTFS 및 DFT-s-OTFS와 비교하여 더 낮은 PAPR과 향상된 BER 성능을 나타냄을 보였다.

키워드 : 직교 시간 주파수 공간 변조, 침투 전력 대 평균 전력비, 역 이산 푸리에 변환, 지연-도플러

Key Words : OTFS, PAPR, IDFT, Delay-Doppler

ABSTRACT

Multicarrier systems, such as Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) and Orthogonal Time Frequency Space (OTFS), suffer from high Peak-to-Average Power Ratio (PAPR), which degrades the efficiency of high-power amplifiers. To address the PAPR issue in OTFS, Discrete Fourier Transform spread OTFS (DFT-s-OTFS) has been proposed, which reduces PAPR through DFT precoding. However, this process leads to bit error rate (BER) performance degradation in high-speed mobile environments due to diversity loss. In this paper, we propose a PAPR reduction scheme that effectively lowers the PAPR while preserving the diversity of OTFS by substituting high-PAPR data sequences with low-PAPR ones. To this end, the Hungarian algorithm is employed to establish optimal mapping relationships between data sequences, which are then used for substitution. Simulation results demonstrate that the proposed scheme achieves lower PAPR and improved BER performance compared to conventional OTFS and DFT-s-OTFS.

※ 본 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었습니다. (RS-2024-00452791)

※ 본 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행되었습니다. (No.2022-0-00024, 민군주파수 이용효율화 소요분석 및 혼간섭 저감기술개발)

• First Author : Yeungnam University School of Computer Science and Engineering, bsu5933@yu.ac.kr, 학생회원

^o Corresponding Author : Yeungnam University School of Computer Science and Engineering, gonew@yu.ac.kr, 종신회원

* Yeungnam University School of Computer Science and Engineering, sanddt@yu.ac.kr, 학생회원

** Electronics and Telecommunications Research Institute, kwryu0730@etri.re.kr, 종신회원

논문번호 : 202502-037-B-RN, Received February 17, 2025; Revised April 4, 2025; Accepted April 22, 2025

I. 서론

고속 이동 환경에서는 도플러 효과와 다중 경로 페이딩으로 인해 신호 품질이 저하가 되며, 이는 안정적인 무선 통신을 저해하는 주요 요인이다. 기존의 Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)은 이러한 영향에 취약하여, 고속 이동 환경에서 심각한 성능 저하가 발생한다. 이를 해결하기 위해 Orthogonal Time Frequency Space (OTFS)가 새로운 다중 반송과 변조 기술로 제안되었다^[1]. 그러나 OTFS는 다중 반송과 시스템의 특성상, OFDM과 마찬가지로 Peak-to-Average Power Ratio (PAPR) 문제에 직면해 있다^[3]. OFDM 변조는 도메인 변환을 위해 주파수-시간 (Frequency-Time, FT) 도메인에서 주파수 축에 대해 Inverse Discrete Fourier Transform (IDFT)를 수행하는 반면, OTFS는 지연-도플러 (Delay-Doppler, DD) 도메인에서 도플러 축에 대해 IDFT를 수행한다. 이 과정에서 IDFT가 수행되는 축을 따라 신호 성분이 확산되며, 특정 영역에 신호가 중첩되어 피크가 형성된다. 이로 인해 전체 신호의 PAPR이 증가하게 되며, 높은 PAPR은 고출력 증폭기의 비선형 왜곡을 유발해 신호 품질과 전송 효율에 심각한 영향을 미친다.

OTFS 변조에서 도플러 축의 PAPR을 감소시킨다면, 낮은 PAPR을 가진 신호를 생성할 수 있다. 기존에 제안된 Discrete Fourier Transform spread OTFS (DFT-s-OTFS)는 도플러 축에 DFT 사전 코딩을 적용한 후 도메인 변환을 수행함으로써, IDFT로 인해 발생하는 피크를 상쇄시켜 PAPR을 저감한다. 그러나 DFT 사전 코딩은 IDFT에 의한 신호 확산을 상쇄하여 OTFS의 다이버시티 이점을 감소시킨다. 이로 인해 고속 이동 환경에서 BER 성능이 크게 저하된다^[4-6].

본 논문에서는 OTFS의 PAPR을 효과적으로 감소시키는 새로운 기법을 제안한다. 제안하는 기법은 도플러 축에서 PAPR이 높은 데이터 시퀀스를 사용하지 않으므로써 신호의 PAPR을 저감하는 동시에, IDFT로 인한 신호 확산을 유지하여 기존 OTFS의 다이버시티 이점을 보존한다. 그러나 단순히 높은 PAPR의 데이터 시퀀스를 사용하지 않으면, 사용 가능한 데이터 시퀀스가 줄어들어 전송률이 감소하는 문제가 발생한다. 이를 해결하기 위해, 본 논문에서는 데이터 시퀀스 매핑 기법을 적용하여 전송 가능한 데이터 시퀀스를 재구성한다. 이를 활용하여 PAPR이 높은 데이터 시퀀스를 PAPR이 낮은 데이터 시퀀스로 대체하여 전송한다. 데이터 시퀀스를 매핑하는 과정에서 헝가리안 알고리즘을 활용하여 높은 PAPR의 데이터 시퀀스와 이를 대체할 낮은

PAPR의 데이터 시퀀스 간의 최적의 매핑을 수행한다. 이를 통해, 대체된 데이터 시퀀스를 복원하는 과정에서 발생할 수 있는 에러를 최소화한다.

II. 시스템 모델

본 절에서는 제로 패딩을 사용하는 OTFS 및 제안하는 기법을 적용한 OTFS 시스템을 소개한다^[7]. 두 시스템 모두 DD 도메인 데이터 행렬 $\mathbf{X}_{DD} \in \mathbb{C}^{M \times N}$ 를 $(M - Z) \times N$ 크기의 데이터 배치 구역과 $Z \times N$ 크기의 제로 패딩 구역으로 구분한다. 여기서 M , N , Z 는 각각 지연 축, 도플러 축, 제로 패딩 번의 개수를 나타낸다. 제로 패딩 구역은 \mathbf{X}_{DD} 의 마지막 Z 개의 행으로 구성되며, 이는 지연 확산 시 발생할 수 있는 신호 간섭을 방지한다. \mathbf{F}_N 과 \mathbf{F}_N^H 은 각각 정규화 된 $N \times N$ 크기의 DFT 행렬과 정규화 된 $N \times N$ 크기의 IDFT 행렬이다.

2.1 OTFS 시스템 모델

OTFS는 \mathbf{X}_{DD} 의 데이터 배치 구역에 정보 심볼 (예: QAM 심볼)을 배치한다. 이후, 아래 식과 같이 \mathbf{X}_{DD} 에 IDFT를 수행하여 지연-시간 (Delay-Time, DT) 도메인 행렬 $\mathbf{X}_{DT} \in \mathbb{C}^{M \times N}$ 로 변환한다.

$$\mathbf{X}_{DT} = \mathbf{X}_{DD} \mathbf{F}_N^H. \quad (1)$$

변환된 \mathbf{X}_{DT} 를 열 단위로 벡터화하여, 아래 식과 같이 시간 도메인 송신 벡터 $\mathbf{s} \in \mathbb{C}^{(M \times N) \times 1}$ 를 생성한다.

$$\mathbf{s} = \text{vec}(\mathbf{X}_{DT}). \quad (2)$$

이후, \mathbf{s} 에 펄스 성형과 디지털-아날로그 변환 (Digital-to-Analog Converter, DAC)을 적용하여 송신 신호 $s(t)$ 로 변환한 후 전송한다. $s(t)$ 는 채널을 통과한 후, 채널 효과와 잡음이 포함된 수신 신호 $r(t)$ 로 수신된다. $r(t)$ 는 아날로그-디지털 변환 (Analog-to-Digital Converter, ADC) 및 필터링 과정을 거쳐 샘플링된 시간 도메인 수신 벡터 $\mathbf{r} \in \mathbb{C}^{(M \times N) \times 1}$ 로 변환된다. 이를 아래 식과 같이 열 단위로 재구성하여 $\mathbf{Y}_{DT} \in \mathbb{C}^{M \times N}$ 를 생성한다.

$$\mathbf{Y}_{DT} = \text{vec}^{-1}(\mathbf{r}). \quad (3)$$

이후 채널 보상을 위해 다음과 같이 \mathbf{Y}_{DT} 에 시간 도메인 선형 Minimum Mean Square Error (MMSE) 등화기를

적용하여 \mathbf{X}_{DT} 의 추정치 $\hat{\mathbf{X}}_{DT} \in \mathbb{C}^{M \times N}$ 를 얻는다⁸⁾. 마지막으로, 아래 식과 같이 $\hat{\mathbf{X}}_{DT}$ 에 DFT를 수행하여 \mathbf{X}_{DD} 의 추정치 $\hat{\mathbf{X}}_{DD} \in \mathbb{C}^{M \times N}$ 를 얻는다:

$$\hat{\mathbf{X}}_{DD} = \hat{\mathbf{X}}_{DT} \mathbf{F}_N. \quad (4)$$

2.2 제안하는 기법을 적용한 OTFS 시스템 모델

OTFS는 도플러 축에 대해 수식 (1)과 같이 IDFT를 적용하며, 이 과정에서 \mathbf{X}_{DD} 의 각 데이터 시퀀스는 서로 다른 PAPR을 갖는다. 특히, 도플러 축에서 PAPR이 높은 데이터 시퀀스는 전체 신호의 PAPR 증가에 큰 영향을 미친다. 이를 해결하기 위해, 본 논문에서는 높은 PAPR의 데이터 시퀀스를 낮은 PAPR의 데이터 시퀀스로 대체하여 PAPR을 저감하는 방식을 제안한다. 이를 위해, 먼저 데이터 시퀀스를 PAPR에 따라 구분하여 데이터 시퀀스 행렬을 생성한다.

전체 데이터 시퀀스 행렬 $\mathbf{G}_{Total} \in \mathbb{C}^{Q^N \times N}$ 의 행은 변조 차수가 Q 일 때 가능한 길이가 N 인 모든 데이터 시퀀스로 구성되며, 아래 식과 같이 표현된다:

$$\mathbf{G}_{Total} = \begin{bmatrix} \mathbf{d}_{Total}^{(0)} \\ \mathbf{d}_{Total}^{(1)} \\ \vdots \\ \mathbf{d}_{Total}^{(Q^N-1)} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

여기서 $\mathbf{d}_{Total}^{(i)} \in \mathbb{C}^{1 \times N}$ 은 \mathbf{G}_{Total} 의 i 번째 행으로, Q -ary 변조 심볼로 이루어진 데이터 시퀀스를 나타내고, Q^N 은 가능한 모든 데이터 시퀀스의 총 개수를 의미한다. \mathbf{G}_{Total} 의 각 행은 PAPR에 따라 두 개의 부분행렬 $\mathbf{G}_{High} \in \mathbb{C}^{R \times N}$ 또는 $\mathbf{G}_{Low} \in \mathbb{C}^{R \times N}$ 로 나뉘며, 각 부분행렬은 아래 식과 같이 표현된다:

$$\mathbf{G}_{High} = \begin{bmatrix} \mathbf{d}_{High}^{(0)} \\ \mathbf{d}_{High}^{(1)} \\ \vdots \\ \mathbf{d}_{High}^{(R-1)} \end{bmatrix}, \mathbf{G}_{Low} = \begin{bmatrix} \mathbf{d}_{Low}^{(0)} \\ \mathbf{d}_{Low}^{(1)} \\ \vdots \\ \mathbf{d}_{Low}^{(R-1)} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

\mathbf{G}_{High} 와 \mathbf{G}_{Low} 는 각각 $R = \frac{Q^N}{2}$ 개의 PAPR이 높은 데이터 시퀀스와 PAPR이 낮은 데이터 시퀀스로 구성된다. 두 부분행렬의 각 행은 데이터 시퀀스 매핑 과정을 거친 후 새로운 순서로 재배열되며, 동일한 인덱스를

갖는 행 $\mathbf{G}_{High}^{(i,:)}$ 와 $\mathbf{G}_{Low}^{(i,:)}$ 간의 일대일 매핑 관계가 형성된다. 이를 위해 두 부분행렬은 \mathbf{G}_{Total} 에서 동일한 개수의 데이터 시퀀스를 나눠 갖도록 구성된다. 이러한 매핑 과정을 통해 데이터 시퀀스를 일대일로 대체할 수 있다. 데이터 시퀀스를 PAPR에 따라 구분하고 매핑하는 과정은 3절에서 자세히 설명된다.

제안하는 OTFS의 송신기는 사전에 형성된 매핑 관계를 기반으로, \mathbf{X}_{DD} 에서 PAPR이 높은 데이터 시퀀스를 PAPR이 낮은 데이터 시퀀스로 대체한다. 그림 1은 제안하는 기법을 적용한 OTFS 시스템의 데이터 시퀀스 대체 과정을 나타낸다. 먼저, \mathbf{X}_{DD} 의 각 행이 \mathbf{G}_{High} 의 행 중 하나와 일치하는지 탐색하여 각 행의 대체 여부를 결정한다. 데이터 시퀀스 대체 과정을 통해 $\bar{\mathbf{X}}_{DD} \in \mathbb{C}^{M \times N}$ 를 생성하며, 이는 아래 식과 같이 표현된다:

$$\bar{\mathbf{X}}_{DD}^{(k,:)} = \begin{cases} \mathbf{G}_{Low}^{(i,:)}, & \text{if } \exists! i \in I \text{ s.t. } \mathbf{G}_{High}^{(i,:)} = \mathbf{X}_{DD}^{(k,:)}, \\ \mathbf{X}_{DD}^{(k,:)}, & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (7)$$

여기서 $k = 0, 1, \dots, M - Z - 1$ 이고, $I = \{0, 1, \dots, R - 1\}$ 이다. \mathbf{X}_{DD} 의 k 번째 행 $\mathbf{X}_{DD}^{(k,:)}$ 가 $\mathbf{G}_{High}^{(i,:)}$ 와 일치하면, 이는 $\mathbf{G}_{High}^{(i,:)}$ 와 매핑된 $\mathbf{G}_{Low}^{(i,:)}$ 로 대체되며, 그렇지 않으면 $\mathbf{X}_{DD}^{(k,:)}$ 가 그대로 유지된다. 이때, 모든 데이터 시퀀스는 동일한 확률로 발생하므로, \mathbf{X}_{DD} 의 각 행이 \mathbf{G}_{High} 의 어떤 행과 일치할 확률은 $\frac{R}{Q^N} = \frac{Q^N}{Q^N} = \frac{1}{2}$ 이다. 따라서, 수식 (7)에 따라 $\bar{\mathbf{X}}_{DD}$ 의 전체 데이터 시퀀스 중 평균적으로 50%가 대체된다. 즉, 전체 데이터 시퀀스 중 PAPR이 높은 절반을 PAPR이 낮은 데이터 시퀀스로 대체함으로써, PAPR을 효과적으로 저감할 수 있다. 이후, $\bar{\mathbf{X}}_{DD}$ 는 아래 식과 같이 \mathbf{X}_{DT} 로 변환된다:

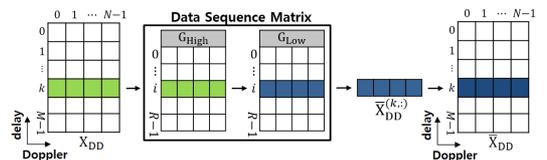


그림 1. 제안하는 기법을 적용한 OTFS 시스템의 데이터 시퀀스 대체 과정
Fig. 1. Data sequence substitution process of the OTFS system with the proposed scheme

$$\mathbf{X}_{DT} = \bar{\mathbf{X}}_{DD} \mathbf{F}_N^H. \quad (8)$$

\mathbf{X}_{DT} 를 송신 신호로 변환하는 과정은 2.1절에서 설명된 단계를 따르며, 수식 (2)부터 시작한다. 제안하는 OTFS 시스템은 데이터 시퀀스 대체 과정을 통해 PAPR을 저감하면서도, IDFT에 의한 신호 확산 효과를 보존함으로써 기존 OTFS와 동일한 다이버시티를 유지한다.

수신 신호로부터 $\hat{\mathbf{X}}_{DD}$ 를 얻는 과정은 2.1절에서 설명된 절차를 거쳐 진행되며, 수식 (4)까지 이어진다. 이후, 제안하는 OTFS 시스템의 수신기는 $\hat{\mathbf{X}}_{DD}^{(k,:)}$ 가 $\mathbf{G}_{Low}^{(i,:)}$ 로 대체된 경우, 사전에 형성된 매핑 관계에 따라 해당 행을 $\mathbf{G}_{High}^{(i,:)}$ 로 복원한다.

III. 데이터 시퀀스 매핑

본 절에서는 제안하는 OTFS 시스템에 적용되는 데이터 시퀀스 매핑 기법에 대해 소개한다. 구체적으로, 모든 데이터 시퀀스를 포함하는 행렬 \mathbf{G}_{Total} 을 PAPR 값에 따라 두 개의 부분행렬, \mathbf{G}_{High} 와 \mathbf{G}_{Low} 로 나눈다. 먼저, 각 데이터 시퀀스의 PAPR을 계산하기 위해 \mathbf{G}_{Total} 을 DT 도메인 데이터 시퀀스 행렬 $\mathbf{G}_{Total,DT} \in \mathbb{C}^{Q^N \times N}$ 로 아래 식과 같이 변환한다.

$$\mathbf{G}_{Total,DT} = \mathbf{G}_{Total} \mathbf{F}_N^H. \quad (9)$$

각 데이터 시퀀스 $\mathbf{G}_{Total}^{(i,:)}$ 의 PAPR은 아래 식과 같이 계산된다.

$$\text{PAPR} \left(\mathbf{G}_{Total}^{(i,:)} \right) = \frac{\max_{0 \leq j \leq N-1} \left| \mathbf{G}_{Total,DT}^{(i,j)} \right|^2}{\frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} \left| \mathbf{G}_{Total,DT}^{(i,j)} \right|^2}, \quad (10)$$

여기서 $i = 0, 1, \dots, Q^N - 1$ 이며, $\mathbf{G}_{Total,DT}^{(i,j)}$ 는 $\mathbf{G}_{Total,DT}$ 의 i 번째 행의 j 번째 열에 해당하는 요소이다. 계산된 PAPR을 기준으로 데이터 시퀀스를 내림차순으로 정렬한 후, 상위 절반을 \mathbf{G}_{High} , 하위 절반을 \mathbf{G}_{Low} 로 구성한다. 이후, 두 부분행렬의 데이터 시퀀스 간 최적의 매핑을 찾기 위해 헝가리안 알고리즘을 적용한다⁹⁾.

헝가리안 알고리즘은 본래 작업 할당 문제를 해결하기 위한 최적화 알고리즘으로, 비용 행렬을 기반으로 두 집합의 원소를 일대일로 매핑한다. 본 논문에서는 이를 데이터 시퀀스 매핑에 응용하여 \mathbf{G}_{High} 와 \mathbf{G}_{Low} 의

데이터 시퀀스 간 최적의 매핑을 수행한다. 이때, 비용 행렬의 각 요소는 두 데이터 시퀀스 $\mathbf{d}_{High}^{(i)}$ 와 $\mathbf{d}_{Low}^{(j)}$ 간의 해밍 거리 $D_H \left(\mathbf{d}_{High}^{(i)}, \mathbf{d}_{Low}^{(j)} \right)$ 로 구성되며, 이를 기반으로 데이터 시퀀스 간 해밍 거리가 최소화되도록 매핑이 수행된다. 이러한 매핑은 수신 과정에서 심벌 오류가 발생한 대체된 데이터 시퀀스를 원래와 유사한 데이터 시퀀스로 복원한다. 이를 통해 복원된 데이터 시퀀스와 원래 데이터 시퀀스 간의 심벌 오류를 최소화한다. 비용 행렬 $\mathbf{C} \in \mathbb{N}^{R \times R}$ 는 아래 식과 같이 표현된다.

$$\mathbf{C}^{(i,j)} = D_H \left(\mathbf{d}_{High}^{(i)}, \mathbf{d}_{Low}^{(j)} \right), \quad (11)$$

여기서 $i, j = 0, 1, \dots, R - 1$ 이다. 매핑을 수행한 이후 \mathbf{G}_{High} 와 \mathbf{G}_{Low} 는 재정렬되어 동일한 인덱스의 데이터 시퀀스 $\mathbf{G}_{High}^{(i,:)}$ 와 $\mathbf{G}_{Low}^{(i,:)}$ 간의 일대일 매핑 관계가 형성된다.

한편, 데이터 시퀀스 매핑의 복잡도는 매핑 대상 데이터 시퀀스의 개수에 따라 결정된다. 일반적으로 헝가리안 알고리즘의 복잡도는 $\mathcal{O}(R^3)$ 이며, 여기서 R 은 매핑 대상 항목의 개수이다. 제안하는 매핑 방식에서 각 부분행렬의 크기는 $R = \frac{Q^N}{2}$ 이므로, 복잡도는 $\mathcal{O}(Q^{3N})$ 으로 근사된다. 이는 Q 와 N 에 따라 지수적으로 증가한다. 그러나 OTFS 시스템은 일반적으로 작은 N 값을 사용하며, 데이터 시퀀스 매핑은 제안하는 시스템이 운용되기 전에 단 한 번만 수행한다. 따라서 시스템 운용 중에는 추가적인 복잡도가 요구되지 않아 효율적인 구현이 가능하다.

IV. 시뮬레이션 결과 및 분석

본 절에서는 시뮬레이션을 통해 제안하는 OTFS 기법의 PAPR 및 BER 성능을 기존 OTFS 및 DFT-s-OTFS와 비교한다. 반송파 주파수는 4 GHz, 부반송파 간격은 15 kHz로 설정하였다. $M = 128$, $N = 8$, $Z = 8$ 을 사용하였으며, QPSK 변조를 사용하였다. DFT 사전 코딩의 그룹 수는 2개와 4개로 설정하였으며, 채널은 EVA(Extended Vehicular A) 모델을 사용하였다¹⁰⁾. 또한, 이동 속도는 500 km/h로 설정하여 고속 이동 환경에서의 시뮬레이션을 수행하였다.

4.1 PAPR 성능 비교

그림 2는 OTFS, 제안하는 OTFS 기법, 그리고 DFT-s-OTFS의 Complementary Cumulative

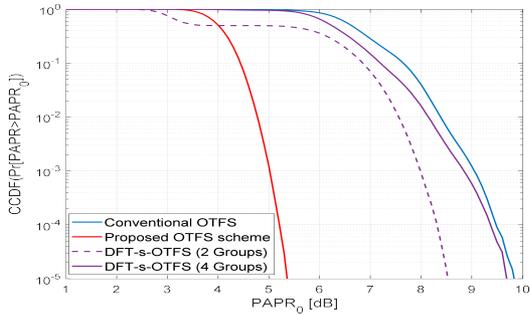


그림 2. OTFS, 제안하는 OTFS 기법, DFT-s-OTFS의 PAPR 비교
Fig. 2. PAPR comparison of OTFS, proposed OTFS scheme, and DFT-s-OTFS

Distribution Function (CCDF), 즉 $\Pr[\text{PAPR} > \text{PAPR}_0]$ 를 나타낸다. 그림 2에서 확인할 수 있듯이, 제안하는 기법은 CCDF가 10^{-4} 인 지점에서 OTFS, 4개와 2개의 그룹을 가진 DFT-s-OTFS 대비 각각 4.3 dB, 4.2 dB, 3 dB 향상된 PAPR 성능을 보인다. 이는 높은 PAPR을 가지는 데이터 시퀀스를 낮은 PAPR을 가지는 데이터 시퀀스로 대체하였기 때문이다. DFT-s-OTFS는 그룹 크기가 감소할수록(즉, 4, 2) PAPR 성능이 향상된다. 이러한 향상은 더 큰 DFT 사전 코딩이 적용될수록 IDFT에 의한 신호 확산 효과를 더 효과적으로 상쇄할 수 있기 때문이다.

4.2 BER 성능 비교

그림 3은 OTFS, 제안하는 OTFS 기법, DFT-s-OTFS의 Back-Off 변화에 따른 BER 성능을 나타낸다. 여기서 Back-Off가 x dB라는 것은, 평균 전력보다 x dB 이상 높은 전력이 있을 경우, 이를 평균 전력에 x dB를 더한 값으로 제한한다는 의미이다. Back-Off를 적용하면 신호 클리핑이 발생하게 되며, 이로 인해 전송 신호에 추가적인 왜곡이 유발된다. 제안하는 기법은 Back-Off가 2 dB부터 5 dB 범위에서 기존 OTFS 및 DFT-s-OTFS에 비해 낮은 BER을 보인다. 이는 제안하는 기법이 낮은 PAPR을 달성함으로써, Back-Off에 의한 신호의 왜곡을 효과적으로 감소시킨 결과이다. 반면, 헝가리안 알고리즘을 적용하지 않고 무작위 매핑을 수행한 경우, Back-Off가 4 dB 이상인 범위에서 기존 OTFS 및 그룹 크기가 4인 DFT-s-OTFS보다 BER 성능이 저하된다. 이는 최적 매핑이 적용되지 않아, 복원 과정에서 발생하는 심볼 오류를 최소화하지 못한 결과이다. DFT-s-OTFS는 그룹 크기가 감소할수록(즉, 4, 2) BER 성능이 저하된다. 이는 더 큰 DFT 사전 코딩이 적용될수록 OTFS의 다이버시티 이득이 감소하기 때문

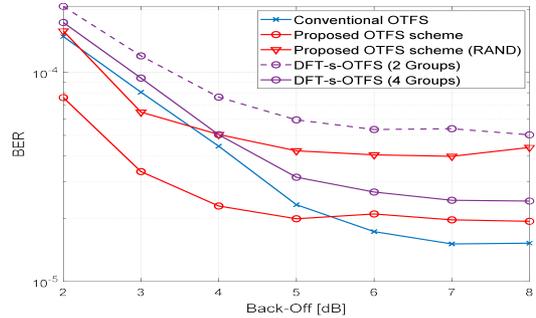


그림 3. 20 dB SNR에서 Back-Off에 따른 OTFS, 제안하는 OTFS 기법, DFT-s-OTFS의 BER 비교
Fig. 3. BER comparison of OTFS, proposed OTFS scheme, and DFT-s-OTFS with Back-Off at 20 dB SNR

이다. 제안된 기법은 DFT-s-OTFS와 달리, 도플러 축 역확산 과정 없이 데이터 시퀀스 자체를 대체하므로, 기존 OTFS의 다이버시티를 유지하여, BER 성능이 개선됨을 확인할 수 있다.

그림 4는 OTFS, 제안하는 OTFS 기법, DFT-s-OTFS의 SNR(Signal-to-Noise Ratio) 변화에 따른 BER 성능을 보여준다. 제안하는 기법은 15dB SNR부터 기존 OTFS 및 DFT-s-OTFS보다 개선된 BER 성능을 보이며, 25 dB SNR에서 한 오더 이상 향상된 BER 성능을 나타낸다. 또한, 무작위 매핑을 한 경우에도 20 dB SNR부터 동일한 비교대상에 대해 개선된 BER 성능을 확인할 수 있다.

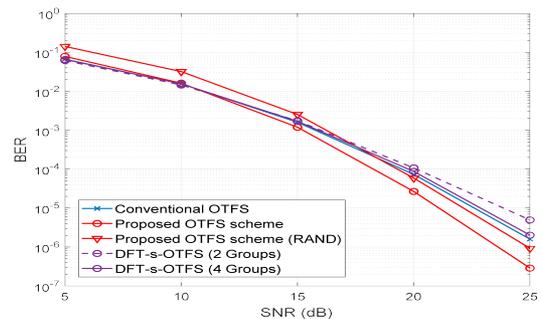


그림 4. 3 dB Back-Off에서 SNR에 따른 OTFS, 제안하는 OTFS 기법, DFT-s-OTFS의 BER 비교
Fig. 4. BER comparison of OTFS, proposed OTFS scheme, and DFT-s-OTFS with SNR at 3 dB Back-Off

V. 결론

본 논문에서는 도플러 축에서 PAPR이 높은 데이터 시퀀스를 PAPR이 낮은 데이터 시퀀스로 대체함으로써, PAPR을 효과적으로 저감하면서도 다이버시티를

유지하는 OTFS 기법을 제안하였다. 특히, 수신 측 복원 과정에서 발생할 수 있는 오류를 최소화하기 위해 헝가리안 알고리즘을 활용한 최적의 데이터 시퀀스 매핑 방식을 적용하였다. 시뮬레이션을 통해 제안하는 OTFS 기법을 기존 OTFS 및 DFT-s-OTFS와 비교한 결과, 3 dB의 이상의 PAPR 이득을 얻는 것을 확인하였다. 또한, 기존 OTFS의 다이버시티를 그대로 유지함으로써, 고속 이동 및 다중 경로 페이딩 환경에서 한 오더 이상 향상된 BER 성능을 보였다. 이를 통해 제안하는 기법이 기존 OTFS 및 DFT-s-OTFS의 한계를 효과적으로 극복할 수 있음을 확인할 수 있다.

References

[1] R. Hadani et al., "Orthogonal time frequency space modulation," in *Proc. IEEE Wireless Commun. Netw. Conf. (WCNC)*, pp. 1-6, San Francisco, CA, USA, Mar. 2017. (<https://doi.org/10.1109/WCNC.2017.7925924>)

[2] B. Park and H.-G. Ryu, "Performance Evaluation and Comparison of OTFS and OFDM Systems Compensating the High Doppler Frequency and Delay Time," *J. KICS*, vol. 45, no. 1. Korea Information and Communications Society, pp. 13-19, Jan. 2020. (<https://doi.org/10.7840/kics.2020.45.1.13>)

[3] G. D. Surabhi, R. M. Augustine, and A. Chockalingam, "Peak-to-Average Power Ratio of OTFS Modulation," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 23, no. 6. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), pp. 999-1002, Jun. 2019. (<https://doi.org/10.1109/LCOMM.2019.2914042>)

[4] Md. N. Hossain, Y. Sugiura, T. Shimamura, and H.-G. Ryu, "DFT-Spread OTFS Communication System with the Reductions of PAPR and Nonlinear Degradation," *Wireless Personal Commun.*, vol. 115, no. 3. Springer Science and Business Media LLC, pp. 2211-2228, Aug. 2020. (<https://doi.org/10.1007/s11277-020-07678-4>)

[5] Y. Wu, C. Han, and T. Yang, "DFT-Spread

Orthogonal Time Frequency Space Modulation Design for Terahertz Communications," *2021 IEEE Global Commun. Conf. (GLOBECOM)*. IEEE, Dec. 2021.

(<https://doi.org/10.1109/GLOBECOM46510.2021.9685492>)

[6] Y. Wu, C. Han, and Z. Chen, "DFT-Spread Orthogonal Time Frequency Space System With Superimposed Pilots for Terahertz Integrated Sensing and Communication," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 22, no. 11, pp. 7361-7376, Nov. 2023. (<https://doi.org/10.1109/TWC.2023.3250267>)

[7] T. Thaj and E. Viterbo, "Low Complexity Iterative Rake Decision Feedback Equalizer for Zero-Padded OTFS Systems," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 69, no. 12, pp. 15606-15622, Dec. 2020. (<https://doi.org/10.1109/TVT.2020.3044276>)

[8] S. Tiwari, S. S. Das, and V. Rangamgari, "Low complexity LMMSE Receiver for OTFS," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 23, no. 12. IEEE, pp. 2205-2209, Dec. 2019. (<https://doi.org/10.1109/LCOMM.2019.2945564>)

[9] F. Bourgeois and J.-C. Lassalle, "An extension of the Munkres algorithm for the assignment problem to rectangular matrices," *Commun. ACM*, vol. 14, no. 12, pp. 802-804, Dec. 1971. (<https://doi.org/10.1145/362919.362945>)

[10] 3GPP, TS 36.104, V8.2.0, "E-UTRA; Base station (BS) radio transmission and reception," May 2008.

박 상 욱 (Sangwook Park)



2025년 2월 : 영남대학교 컴퓨터 학부 졸업
 2025년 3월~현재 : 영남대학교 산학협력단 연구원
 <관심분야> 파형 설계, 스펙트럼 및 전력 효율, 고속 이동 환경
 [ORCID:0009-0006-5381-3832]

이 형 원 (Hyeongwon Lee)



2025년 2월 : 영남대학교 컴퓨터
학부 졸업
2025년 3월~현재 : 영남대학교
정보통신공학과 석사과정
<관심분야> 파형 설계, 다중접속
방식, 고속 이동 환경, ISAC
[ORCID:0009-0008-1784-9103]

최 권 휴 (Kwonhwe Choi)



1994년 2월 : 포항공과대학교 전
자전기공학과 졸업
1996년 2월 : 포항공과대학교 전
자전기공학과 석사
2000년 2월 : 포항공과대학교 전
자전기공학과 박사

2000년 4월~2003년 2월 : 한국전자통신연구원 광대역
무선전송 연구부 광대역 무선전송 연구팀 선임연구
원

2003년 3월~현재 : 영남대학교 컴퓨터학부 교수
<관심분야> 신호 설계, 다중접속 방식, 고속 이동 환경,
간섭 저감

[ORCID:0000-0002-1755-0186]

류 관 응 (Kwanwoong Ryu)



1997년 2월 : 영남대학교 전자공
학과 졸업
1999년 2월 : 영남대학교 정보통
신공학과 석사
2004년 2월~2005년 1월 : NTT
DocoMo YRP 연구소 인턴쉽
2006년 2월 : 영남대학교 정보통
신공학과 박사

2006년 7월~2009년 1월 : (주)XRONET 책임연구원

2009년 7월~현재 : 한국전자통신연구원 입체통신 연구
소 전파원천기술연구실 책임연구원

<관심분야> 통신시스템, 디지털신호처리

[ORCID:0000-0001-6730-7099]