

특집논문 (Special Paper)

방송공학회논문지 제29권 제6호, 2024년 11월 (JBE Vol.29, No.6, November 2024)

<https://doi.org/10.5909/JBE.2024.29.6.964>

ISSN 2287-9137 (Online) ISSN 1226-7953 (Print)

# OTFS 시스템에서 확산 스펙트럼을 적용한 인덱스 변조 기법의 심볼 맵핑 방법에 따른 성능 평가

고 영 빈<sup>a)</sup>, 김 정 창<sup>a)†</sup>

## Performance Evaluation of Symbol Mapping Method for Index Modulation Spread Spectrum Scheme under OTFS System

Youngbin Go<sup>a)</sup> and Jeongchang Kim<sup>a)†</sup>

### 요 약

본 논문에서는 확산 스펙트럼 인덱스 변조 (index modulation spread spectrum: IMSS) 기술을 OTFS (orthogonal time frequency space) 시스템에 적용하는 방법을 제시하고 성능을 평가한다. IMSS-OTFS 시스템은 지연-도플러 도메인을 다수의 subblock으로 나누고, 각 subblock에 확산 시퀀스를 선택해 변조 심볼을 확산시키는 방법을 사용하며, 확산 시퀀스의 인덱스를 통해 추가적인 정보를 전달한다. OTFS 시스템의 지연-도플러 도메인에서 심볼 맵핑 방법에 따른 이점을 분석하였으며, 지연-도플러 도메인에서 interleaving 방법에 대해 제시한다. 전산 실험을 통해 제안하는 IMSS-OTFS와 기존 OTFS의 비트 오류율 (bit error rate: BER) 성능을 비교하고, 심볼 맵핑 방법에 따른 성능을 비교한다. 전산 실험 결과를 통해 제안하는 IMSS-OTFS가 기존 OTFS 보다 우수한 성능을 보이며, 심볼을 interleaving하여 맵핑했을 때 다른 방법에 비해 우수한 성능을 나타내는 것을 확인할 수 있다.

### Abstract

In this paper, the application of the index modulation spread spectrum (IMSS) scheme to an orthogonal time frequency space (OTFS) system and performance evaluation are presented. In the IMSS-OTFS system, the delay-doppler domain is divided into subblocks, and a spreading sequence is selected for each subblock to spread the modulation symbol. Then, additional information is provided through the index of the spreading sequence. In addition, in this paper, the advantages of symbol mapping in the delay-doppler domain of the OTFS system are analyzed, and interleaving methods in the delay-doppler domain are presented. The BER (bit error rate) performance of IMSS-OTFS and conventional OTFS is compared, and the performances according to the symbol mapping method are compared. The simulation results show that the IMSS-OTFS outperforms the conventional OTFS, and the interleaving method outperforms other methods.

Keyword : Delay, Doppler, Index Modulation, OTFS, Spread Spectrum

Copyright © 2024 Korean Institute of Broadcast and Media Engineers. All rights reserved.

“This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons BY-NC-ND (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited and not altered.”

## 1. 서론

통신 기술의 발전에 따라 대용량 데이터를 효율적으로 전송하는 방법이 요구되었고, 이를 충족하기 위해 직교 주파수 분할 다중화 (orthogonal frequency division multiplexing: OFDM) 기술이 연구되었다. OFDM은 정보를 여러 개의 직교하는 부반송파 (subcarrier)에 맵핑하여 전송하는 방식으로 기존의 단일 반송파 방식에 비해 높은 주파수 효율성 및 다중경로 페이딩에 대한 강건성을 제공한다<sup>[1]</sup>. 그러나 OFDM은 이동 환경에서 발생하는 도플러 효과에 의해 부반송파 간의 직교성이 유지되지 않으면 성능이 열화되는 단점이 존재한다<sup>[2]</sup>. 최근 무선 통신에서는 차량, 고속철도, 위성 등 고속 이동 환경에서 신뢰성 있는 데이터 전송에 대한 요구가 증가하고 있다<sup>[3]</sup>. 이러한 고속 이동 환경에서 OFDM 시스템은 도플러 효과에 의한 성능 열화가 더욱 중요해지므로 이를 보상하기 위한 알고리즘을 필요로 하며, 이는 수신기의 복잡도를 증가시키는 요인이 된다. 따라서 도플러 효과를 효과적으로 처리할 수 있는 기술이 요구되었으며, 이를 충족시키기 위해 시간-주파수 공간 변조 (orthogonal time frequency space: OTFS)가 제안되었다<sup>[4]</sup>. OTFS는 고속 이동 환경에서 발생하는 도플러 효과를 효과적으로 처리하기 위해 제안된 변조 방식으로, 지연-도플러 도메인에 데이터 심볼을 맵핑하고 이를 시간-주파수 도메인에 확산한 후 시간 영역 신호로 변환하여 전송한다.

OTFS는 높은 도플러가 있는 환경에서 효과적인 변조 방식이며 자원의 효율적인 활용과 성능을 극대화하기 위해

인덱스 변조 (index modulation: IM)를 적용할 수 있다. 인덱스 변조 기법에는 활성화 안테나의 인덱스를 사용하는 공간 변조 (spatial modulation), 특정 시간 슬롯의 인덱스를 사용하는 시간 슬롯 인덱스 변조 (time slot index modulation), 그리고 활성화 부반송파의 인덱스를 사용하는 부반송파 인덱스 변조 (subcarrier index modulation) 등이 있다<sup>[5]</sup>. 그중 부반송파 인덱스 변조는 입력 정보를 활성화된 부반송파 인덱스를 결정하는 비트와 심볼 맵핑을 위한 비트로 나누고, 맵핑된 심볼을 활성화된 부반송파에 실어 전송하는 방법이다. 부반송파 인덱스 변조를 사용하면 활성화된 부반송파를 통해 추가적인 정보를 전송하여 스펙트럼 효율을 향상시킬 수 있고, 활성화된 부반송파만 전송하기 때문에 모든 부반송파에 심볼을 맵핑하는 기존 방식보다 송신 전력을 크게 줄일 수 있는 장점이 있다<sup>[6]</sup>. 한편, 인덱스 변조의 성능을 더욱 향상시키기 위해 확산 스펙트럼 (spread spectrum: SS) 기술을 적용할 수 있다. 확산 스펙트럼은 신호를 넓은 주파수 대역으로 확산시켜 전송하는 방식으로 잡음 내성 및 다중 경로 페이딩에 대한 강건성 등을 높일 수 있다<sup>[7]</sup>. 확산 스펙트럼 기술은 신호를 넓은 주파수 대역에 확산시키기 위해 확산 시퀀스를 사용하며, 이를 인덱스 변조 기법에 적용하면 선택된 확산 시퀀스를 통해 추가적인 정보를 전송하는 장점이 있다. OFDM 시스템에서 송신 전력을 줄임과 동시에 스펙트럼 효율을 향상시키기 위해 인덱스 변조 및 확산 스펙트럼을 적용한 연구들이 수행되어 왔고<sup>[8]</sup>, 최근에는 인덱스 변조 OTFS 시스템에 확산 스펙트럼을 적용시키는 연구가 수행되고 있다<sup>[9]</sup>. 확산 스펙트럼을 적용한 인덱스 변조 OTFS는 확산 시퀀스를 통해 심볼을 확산시킨 후 지연-도플러 도메인에 맵핑한다. 이때, 확산 시퀀스에 의해 확산된 심볼들은 지연-도플러 도메인에서 심볼을 맵핑하는 방법에 따라 서로 다른 지연 및 도플러 성분을 가지게 된다. 따라서 심볼 맵핑 방법에 따라 다른 다이버시티 이득을 얻을 수 있다.

본 논문에서는 고속의 이동 채널 환경에서 전력 효율과 스펙트럼 효율을 향상시키고, 지연-도플러 도메인에서 다이버시티 이득을 얻기 위해 확산 스펙트럼 인덱스 변조 (index modulation spread spectrum: IMSS) 기법을 OTFS에 적용하는 방법을 제안하고, 지연-도플러 도메인에서 심볼 맵핑 방법에 따른 성능을 평가한다.

a) 국립한국해양대학교 전자통신공학과 해양인공지능융합전공(Interdisciplinary Major of Maritime AI Convergence, Department of Electronics and Communications Engineering, Korea Maritime and Ocean University)

‡ Corresponding Author : 김정창(Jeongchang Kim)  
E-mail: jchkim@kmou.ac.kr  
Tel: +82-51-410-4315  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8612-9360>

※이 논문의 연구 결과 중 일부는 한국방송·미디어공학회 2024년 하계 학술대회에서 발표한 바 있음.

※ This work was supported by the regional industry-linked university Open-Lab development support project through the Commercialization Promotion Agency for R&D Outcomes(COMPA) funded by the Ministry of Science and ICT of Korea(MSIT)

· Manuscript September 11, 2024; Revised October 29, 2024; Accepted October 29, 2024.

## II. 시스템 모델

### 1. OTFS 송수신 모델

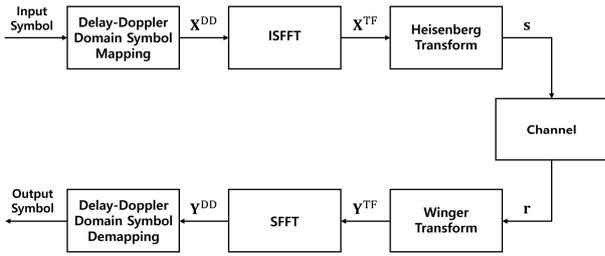


그림 1. OTFS 시스템 블록 다이어그램  
Fig. 1. Block diagram of OTFS system

OTFS 시스템의 블록 다이어그램을 그림 1에 나타내었다. 우선 지연-도플러 도메인 심볼 맵핑 블록에서 입력 심볼은 지연 축으로  $M$ 개, 도플러 축으로  $N$ 개의 지연-도플러 도메인에 맵핑되어 전송 심볼  $X^{DD}$ 를 생성한다. 전송 심볼  $X^{DD}$ 는 ISFFT (inverse symplectic finite Fourier transform)를 통해 시간-주파수 영역의 심볼로 변환되며 수식 (1)과 같이 표현할 수 있다<sup>[10]</sup>.

$$X^{TF}[l, k] = \frac{1}{\sqrt{NM}} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} X^{DD}[m, n] e^{j2\pi\left(\frac{nk}{N} - \frac{ml}{M}\right)} \quad (1)$$

여기서,  $X^{TF}$ 는 시간-주파수 도메인에서 전송 심볼을,  $l$ 과  $k$ 는 각각 시간과 주파수 인덱스를, 그리고  $m$ 과  $n$ 은 각각 지연과 도플러 인덱스를 의미한다. 시간-주파수 도메인에서 전송 심볼  $X^{TF}$ 는 Heisenberg transform을 통해 시간 영역의 신호로 변환되며 수식 (2)와 같이 표현할 수 있다<sup>[10]</sup>.

$$s(t) = \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{l=0}^{M-1} X^{TF}[l, k] g_{tx}(t - kT) e^{j2\pi l \Delta f (t - kT)} \quad (2)$$

여기서,  $s(t)$ 는 시간 영역의 신호를,  $g_{tx}$ 는 송신 파형을,  $T$ 는 시간 슬롯의 길이를, 그리고  $\Delta f$ 는 부반송파 간격을 의미한다. 시간 영역의 신호  $s(t)$ 는 페이딩 채널을 거쳐 수신단에 수신되며 수신 신호  $r(t)$ 은 수식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$r(t) = h(t) * s(t) + w(t) \quad (3)$$

여기서,  $h(t)$ 는 채널 임펄스 응답을 나타내며,  $w(t)$ 는 AWGN (additive white Gaussian noise)을 의미한다. 수신 신호  $r(t)$ 는 Winger transform을 통해 시간-주파수 영역의 심볼로 변환된다. 우선 수신 신호  $r(t)$ 는 정합 필터를 통과하고 이를 시간-주파수 도메인에서 샘플링하여 시간-주파수 도메인 수신 심볼  $Y^{TF}[l, k]$ 를 구할 수 있으며 수식 (4)와 같이 표현할 수 있다<sup>[10]</sup>.

$$Y(f, t) = \int r(t') g_{rx}^*(t' - t) e^{-j2\pi f(t' - t)} dt' \quad (4)$$

$$Y^{TF}[l, k] = Y(f, t)|_{f=l\Delta f, t=kT}$$

$Y(f, t)$ 는 정합 필터를 통과한 수신 신호를,  $g_{rx}$ 는 정합 필터 응답을 의미하고  $Y(f, t)$ 를 주파수 축으로  $l\Delta f$  간격으로, 시간 축으로  $kT$  간격으로 샘플링하여 시간-주파수 도메인 수신 심볼  $Y^{TF}[l, k]$ 를 얻을 수 있다. 마지막으로  $Y^{TF}[l, k]$ 는 SFFT를 통해 지연-도플러 도메인 심볼  $Y^{DD}$ 로 변환되며 수식 (5)와 같이 표현할 수 있다<sup>[10]</sup>.

$$Y^{DD}[m, n] = \frac{1}{\sqrt{NM}} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} Y^{TF}[l, k] e^{-j2\pi\left(\frac{nk}{N} - \frac{ml}{M}\right)} \quad (5)$$

### 2. 확산 스펙트럼 인덱스 변조 송수신 모델

IMSS-OTFS 시스템의 블록 다이어그램을 그림 2에 나타내었다. 우선 인덱스 변조를 위해 사용 가능한 부반송파를  $G$ 개의 subblock으로 나누고, bit splitter 블록에서 입력 비트  $p$ 개를 각 subblock에  $p/G$ 개씩 할당한다. 각 subblock에 할당된 비트는 활성화 시퀀스를 선택하기 위한  $p_1$  비트와 변조 심볼 맵핑을 위한  $p_2$  비트로 나누어진다. 시퀀스 선택 블록에서는  $p_1$ 에 해당하는 시퀀스를 선택하고, 심볼 맵핑 블록에서는  $p_2$ 에 대한 변조 심볼로 맵핑한다. IMSS 시스템에서 시퀀스는 간섭을 최소화하기 위해 골드 시퀀스, Kasami 시퀀스, Hadamard 시퀀스 등을 사용할 수 있으며<sup>[11]</sup>, 본 논문에서는 직교하는 Hadamard 시퀀스를 사용한다. 시퀀스 선택과 심볼 맵핑 이후 spreader에서 subblock 내 모든 부반송파에 선택된 시퀀스에 따라 심볼을 확산시킨다.

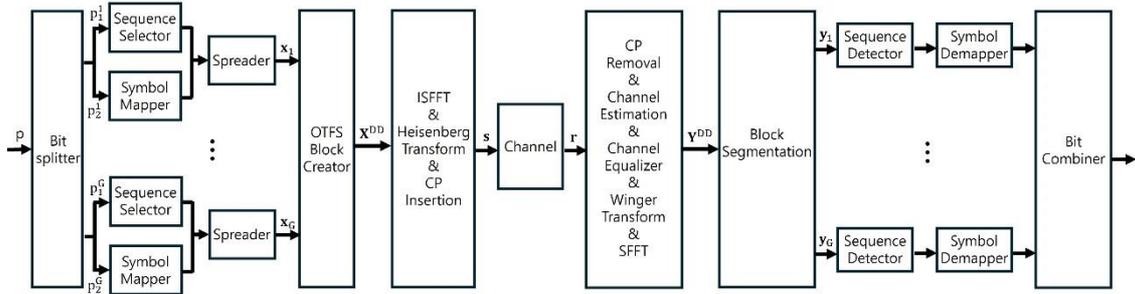


그림 2. 확산 스펙트럼 인덱스 변조 OTFS 시스템 블록 다이어그램  
 Fig. 2. Block diagram of IMSS-OTFS system

확산된 심볼  $\mathbf{X}_G$ 는 수식 (6)과 같이 표현할 수 있다.

$$\mathbf{X}_g = S_g \mathbf{C}_g = S_g \mathbf{C}_g^1 + \dots + S_g \mathbf{C}_g^L \quad (6)$$

여기서,  $S_g (g = 1, \dots, G)$ 는 symbol mapper에서 맵핑된  $g$  번째 subblock의 심볼을,  $\mathbf{C}_g = [\mathbf{C}_g^1, \dots, \mathbf{C}_g^L]$ 는 선택된 시퀀스를, 그리고  $L$ 은 시퀀스의 길이를 의미한다. 각 subblock에 확산된 심볼들은 OTFS 전송을 위해 지연-도플러 도메인에 매핑되고, 지연-도플러 도메인의 전송 심볼  $\mathbf{X}^{DD}$ 는 수식 (7)과 같이 표현할 수 있다.

$$\mathbf{X}^{DD} = \begin{bmatrix} X_{1,1} & \dots & X_{1,j} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{w,1} & \dots & X_g \end{bmatrix} \quad (7)$$

여기서,  $j$ 와  $w$ 는 각각 도플러와 지연 축에서 subblock의 개수를 의미한다. 심볼을 지연-도플러 도메인에 맵핑하고 나면 OTFS 시스템과 동일하게 송수신 과정을 수행하게 되고, 지연-도플러 도메인의 수신 심볼  $\mathbf{Y}^{DD}$ 를 얻을 수 있다. 복조를 수행하기 위해  $\mathbf{Y}^{DD}$ 를 각 subblock으로 나누어 주고, subblock마다 시퀀스 검출을 수행한다. 각 subblock 내 심볼과 가능한 모든 시퀀스와의 상관관을 계산하고 상관 값이 최대가 되는 시퀀스를 찾음으로써 시퀀스 검출이 수행되며 수식 (8)과 같이 표현할 수 있다.

$$\hat{c}_g = \operatorname{argmax}_c \sum_{i=1}^v |y_g c_i| \quad (8)$$

여기서,  $\hat{c}_g$ 는  $g$ 번째 subblock의 검출한 시퀀스를,  $c_i$ 는  $i$

번째 가능한 시퀀스를,  $v$ 는 사용 가능한 시퀀스의 개수를, 그리고  $y_g$ 는  $g$ 번째 subblock의 수신 심볼을 의미한다. 시퀀스를 검출한 이후 심볼 검출을 수행하며, 시퀀스 비트와 심볼 비트를 복조하여 최종 정보 비트를 얻을 수 있다.

### 3. 확산 스펙트럼 인덱스 변조 심볼 맵핑 방법

OTFS 시스템은 지연-도플러 도메인에서 심볼을 맵핑하고 이를 확산하여 시간 영역에서 신호를 전송한다. 확산 스펙트럼 인덱스 변조를 적용하면 확산 시퀀스 길이의 subblock을 지연-도플러 도메인에 맵핑해야 한다. Subblock 내 모든 심볼은 동일한 심볼을 사용하기 때문에 다이버시티 이득을 얻도록 맵핑할 수도 있다. IMSS-OTFS 시스템에서 각 subblock은 도플러 방향이나 지연 방향, 또는 지연-도플러 방향으로 맵핑될 수 있다. 뿐만 아니라 지연-도플러 도메인에서 interleaving하여 맵핑할 수 있다. Subblock을 도플러 방향으로 맵핑을 하게 되면, 여러 도플러 성분을 가지는 동일한 심볼을 통해 다이버시티 이득을 얻을 수 있다. 수신 신호는 다중 경로를 통해 수신되고, 각 경로는 서로 다른 도플러 효과를 가진다. 이때, 서로 다른 도플러 성분을 가지는 동일한 심볼을 통해 특정 도플러 성분에서 신호가 감쇠되더라도 복조를 수행할 수 있다. 다음으로 subblock을 지연 방향으로 맵핑하게 되면 여러 지연 성분을 가지는 동일한 심볼을 통해 다이버시티 이득을 얻을 수 있다. 마지막으로 지연-도플러 도메인에 맵핑하게 되면 도플러와 지연 도메인 모두에서 다이버시티 이득을 얻을 수 있다. 또한, 지연-도플러 도메인에 맵핑된 심볼을 시간-주파수 도메인에 확

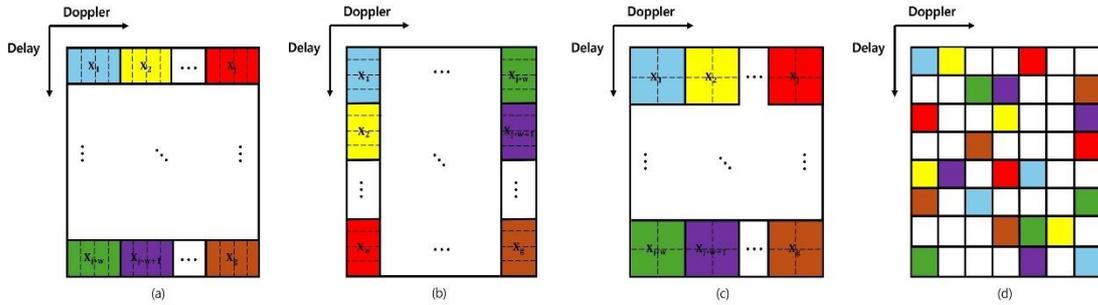


그림 3. IMSS-OTFS 시스템 심볼 맵핑 방법 (a) 도플러 방향 심볼 맵핑, (b) 지연 방향 심볼 맵핑, (c) 지연-도플러 방향 심볼 맵핑, (d) Interleaving 심볼 맵핑

Fig. 3. Symbol mapping method of IMSS-OTFS system (a) Doppler direction Symbol mapping, (b) Delay direction symbol mapping, (c) Delay-Doppler direction symbol mapping, (d) interleaving symbol mapping

산시킬 때 subblock 내의 동일한 심볼을 불연속적으로 맵핑함으로써 추가적인 다이버시티 이득을 얻을 수 있다.

### III. 전산 실험 결과

본 논문에서는 OTFS 시스템에서 확산 스펙트럼 인덱스 변조를 적용했을 때 성능과 심볼 맵핑 방향에 따른 성능을 확인하기 위해 전산 실험을 수행하였다. 전산 실험은 OTFS, IM-OTFS<sup>[12]</sup> 그리고 IMSS-OTFS에 대해 수행되었으며, IM-OTFS는 subblock 내 하나의 부반송파만 전송하고, IMSS-OTFS를 위한 확산 시퀀스는 길이 4의 Hadamard 시퀀스를 사용하였다<sup>[13]</sup>. Hadamard 시퀀스는 서로 직교하는 길이 2<sup>n</sup>의 시퀀스이다. 전산 실험에 사용한 시퀀스의 look-up table은 표 1과 같다. 전산 실험은 이동환경을 고려한 EVA (extended vehicular A)와 TU-6 (typical urban 6 path) 채널에서 수행되었다<sup>[14][15]</sup>. 송수신기 사이 동기는 알고 있다고 가정하여 수행되었고, 시스템 파라미터는 표 2와 같다.

표 1. 확산 시퀀스 look-up table

Table 1. Look-up table for spreading sequence

Bit	Sequence
[0,0]	[+1, +1, +1, +1]
[0,1]	[+1, -1, +1, -1]
[1,0]	[+1, +1, -1, -1]
[1,1]	[+1, -1, -1, +1]

표 2. OTFS 송수신 시스템 파라미터

Table 2. Parameters for OTFS transceiver

Parameter	Value
Number of Doppler Bin (N)	64
Number of Delay Bin (M)	64
CP Type	CP-OTFS
CP Length	8
Modulation Order	BPSK (OTFS) QPSK (IM-OTFS) QPSK (IMSS-OTFS)
Center Frequency	4 GHz
Channel Model	EVA, TU-6
Mobile Speed	100, 300, 500 km/h

OTFS 시스템에서는 CP-OTFS, RCP-OTFS, ZP-OTFS를 사용할 수 있으며, 전산 실험에서는 OFDM 심볼마다 CP를 삽입하는 CP-OTFS를 사용하였다. OTFS, IM-OTFS, IMSS-OTFS 시스템의 성능 비교를 위해 평균 송신 전력은 1로, OTFS의 변조 방식은 BPSK, 그리고 IM-OTFS와 IMSS-OTFS의 변조 방식은 QPSK로 설정하여 스펙트럼 효율은 1bps/Hz로 설정하였다.

그림 4와 5는 각각 EVA 채널과 TU-6 채널에서 속도별 OTFS, IM-OTFS, IMSS-OTFS의 비트 오류율 (bit error rate: BER) 성능을 나타낸다. IM-OTFS는 subblock 내 4개의 부반송파 중 하나의 부반송파만 전송하였다. IMSS-OTFS는 입력 비트에 따라 Hadamard 시퀀스 4개 중 하나의 시퀀스를 선택해 심볼을 확산시켰으며, 도플러 방향으로 심볼을 맵핑하였다. EVA 채널 하에서는 BER = 10<sup>-4</sup>

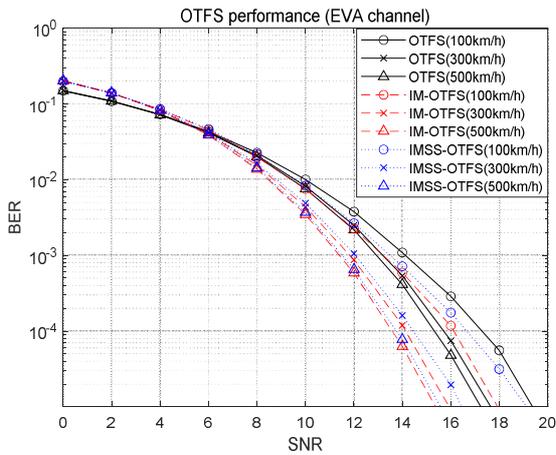


그림 4. EVA 채널 하에서 OTFS, IM-OTFS, IMSS-OTFS 비트 오류율 비교  
 Fig. 4. Comparison of BER for OTFS, IM-OTFS, and IMSS-OTFS under EVA channel

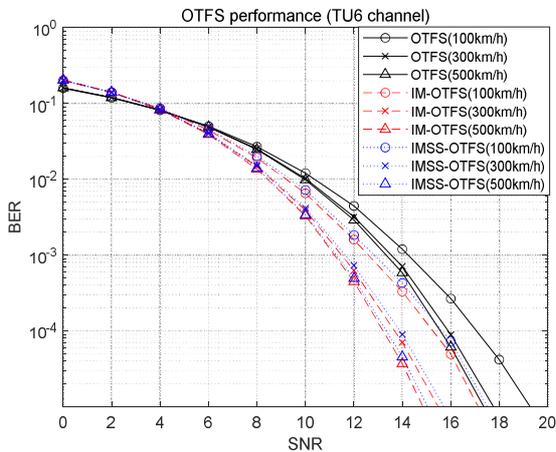


그림 5. TU-6 채널 하에서 OTFS, IM-OTFS, IMSS-OTFS 비트 오류율 비교  
 Fig. 5. Comparison of BER for OTFS, IM-OTFS, and IMSS-OTFS under TU-6 channel

에서 속도 100, 300, 500km/h에 대해 IMSS-OTFS가 OTFS에 비해 약 1.3dB의 SNR (signal to noise ratio) 이득이 있음을 확인하였다. TU-6 채널 하에서는 BER = 10<sup>-4</sup>에서 속도 100, 300, 500km/h에 대해 IMSS-OTFS가 OTFS에 비해 약 2dB의 SNR 이득이 있음을 확인하였다. 또한, EVA와 TU-6 채널 모두에서 IM-OTFS가 IMSS-OTFS보다 성능 이득이 있음을 확인하였다.

그림 6과 7은 IMSS-OTFS에서 지연-도플러 도메인의 심볼 맵핑 방법에 대한 BER 성능을 나타낸다. 그림에서

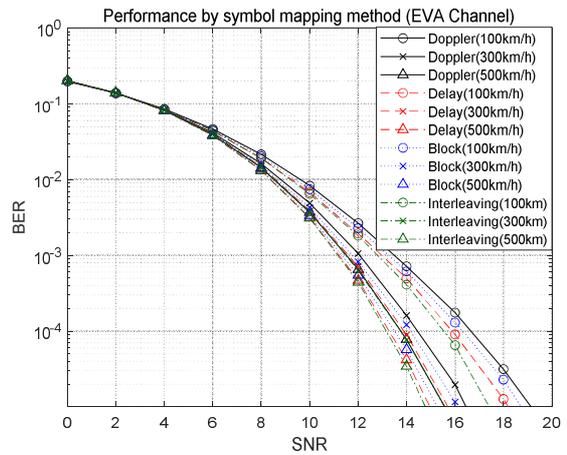


그림 6. EVA 채널 하에서 심볼 맵핑 방법에 따른 IMSS-OTFS 비트 오류율 비교  
 Fig. 6. Comparison of IMSS-OTFS BER by symbol mapping methods under EVA Channel

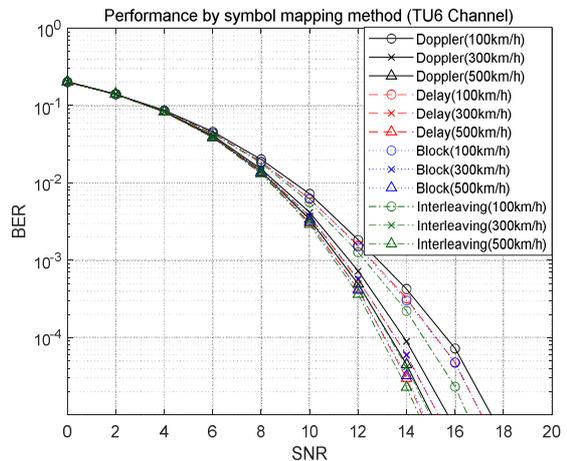


그림 7. TU-6 채널 하에서 심볼 맵핑 방법에 따른 IMSS-OTFS 비트 오류율 비교  
 Fig. 7. Comparison of IMSS-OTFS BER by symbol mapping methods under TU-6 Channel

‘Doppler’는 도플러 방향으로의 심볼 맵핑 방법을, ‘Delay’는 지연 방향으로의 심볼 맵핑 방법을, ‘Block’은 지연-도플러 모든 방향으로의 심볼 맵핑 방법을, 그리고 ‘Interleaving’은 불연속적인 심볼 맵핑 방법을 의미한다. 그림 6에서 볼 수 있듯이 EVA 채널 하에서 고려한 모든 속도에 대해 도플러 방향 심볼 맵핑에 비해 지연-도플러 방향, 지연 방향 심볼 맵핑과 interleaving이 차례대로 보다 더 우수한 성능

을 가짐을 확인하였다. 그림 7은 TU-6 채널 하에서 IMSS-OTFS의 심볼 맵핑 방법에 따른 성능을 나타내며, 고려한 모든 속도에 대해 지연 방향과 지연-도플러 방향 심볼 맵핑은 비슷한 성능을 가지고 도플러 방향 심볼 맵핑에 비해 성능이 우수하며, 다른 방법들에 비해 interleaving의 성능이 우수함을 확인하였다.

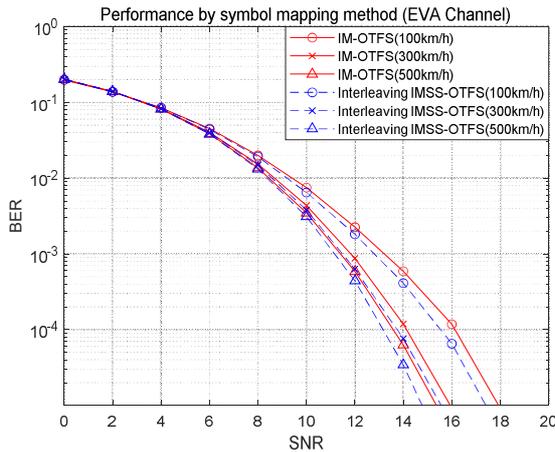


그림 8. EVA 채널 하에서 IM-OTFS와 interleaving 방법의 IMSS-OTFS 비트 오류율 비교  
 Fig. 8. Comparison of BER for IM-OTFS and IMSS-OTFS with interleaving method under EVA channel

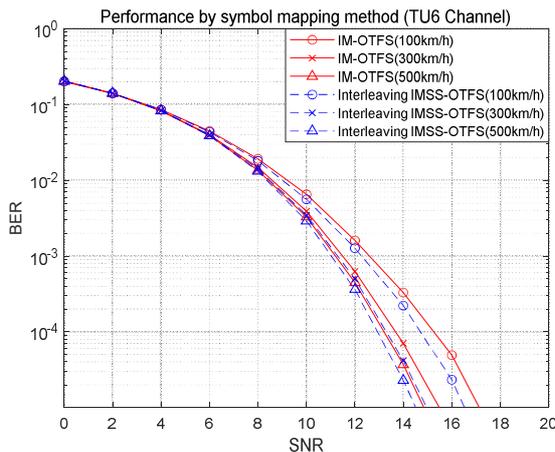


그림 9. TU-6 채널 하에서 IM-OTFS와 interleaving 방법의 IMSS-OTFS 비트 오류율 비교  
 Fig. 9. Comparison of BER for IM-OTFS and IMSS-OTFS with interleaving method under TU-6 channel

그림 8과 9는 IM-OTFS와 IMSS-OTFS에서 interleaving 방법에 대한 BER 성능을 나타낸다. 그림 8에서 볼 수

있듯이 EVA 채널 하에서 고려한 모든 속도에 대해 interleaving 방법을 적용한 IMSS-OTFS가 IM-OTFS보다 성능 이득이 있음을 확인하였다. 그림 9는 TU-6 채널에서 IM-OTFS와 interleaving 방법을 적용한 IMSS-OTFS의 성능을 나타내며, 고려한 모든 속도에 대해 interleaving 방법을 적용한 IMSS-OTFS가 IM-OTFS보다 성능 이득이 있음을 확인하였다.

#### IV. 결론

본 논문에서는 OTFS 시스템에서 확산 스펙트럼을 적용한 인덱스 변조 기법에 대해 제안하고 그 성능을 확인하였다. 지연-도플러 도메인에서 서로 직교하는 확산 시퀀스를 이용하여 심볼을 맵핑하였고, 확산 시퀀스의 인덱스를 통해 추가적인 정보를 전달하였다. 또한 심볼 맵핑 방향에 따른 이득을 분석하였고 지연-도플러 도메인에서 interleaving 하는 방법을 제안하였다. IMSS-OTFS의 성능과 심볼 맵핑 방향에 따른 성능을 전산 실험을 통해 확인하였고, EVA 채널과 TU-6 채널에서 동일 전력, 동일 스펙트럼 효율인 경우 IMSS-OTFS 성능이 기존 OTFS 성능보다 우수함을 확인하였다. 또한 IMSS-OTFS에서 지연-도플러 도메인의 심볼 맵핑 방향에 따른 성능을 제시하였으며, interleaving 방법을 적용하였을 때 IM-OTFS보다 성능이 우수함을 확인할 수 있다.

#### 참고 문헌 (References)

- [1] R. Prasad, OFDM for Wireless Multimedia Communications, Artech House, Boston and London, pp. 1-250, 2004. <https://uk.artechhouse.com/OFDM-for-Wireless-Multimedia-Communications-P1058.aspx>
- [2] J. Yang, "Doppler Spread Estimation and Data Detection by Discrete Fourier Transform and Least-Square Algorithm in Time Domain for Mobile OFDM Systems," Proceeding of International Conference on Wireless Communication and Sensor Network, Wuhan, China, pp.366-370, 2014. doi: <https://doi.org/10.1109/WCSN.2014.82>
- [3] M.Z. Chowdhury, M. Shahjalal, S. Ahmed and Y. Jang, "6G Wireless Communication System: Applications, Requirements, Technologies, Challenges, and Research Directions," IEEE Transactions on Communications Society, Vol.1, pp.957-975, July, 2020. doi: <https://doi.org/10.1109/OJCOMS.2020.3010270>

- [4] B. Park and H. Ryu, "Performance Evaluation and Comparison of OTFS and OFDM Systems Compensating the High Doppler Frequency and Delay Time," *Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences*, Vol.45, No.1, pp.13-19, Jan. 2020.  
doi: <https://doi.org/10.7840/kics.2020.45.1.13>
- [5] T. Mao, Q. Wang, Z. Wang and S. Chen, "Novel Index Modulation Techniques: A Survey," *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, Vol.21, No.1, pp.315-348, July. 2018.  
doi: <https://doi.org/10.1109/COMST.2018.2858567>
- [6] Q. Ma, Y. Xiao, L. Dan, P. Yang, L. Peng and S. Li, "Subcarrier Allocation for OFDM with Index Modulation," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Vol.20, No.7, pp.1469-1472, Apr. 2016.  
doi: <https://doi.org/10.1109/LCOMM.2016.2560171>
- [7] R. Pichholtz, D. Schiling and L. Milstein, "Theory of Spread-Spectrum Communications - A Tutorial," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Vol.30, No.5, pp.855-884, Jan. 2003.  
doi: <https://doi.org/10.1109/TCOM.1982.1095533>
- [8] Q. Li, M. Wen, E. Basar and F. Chen, "Index Modulated OFDM Spread Spectrum," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Vol.17, NO.4, pp.2360-2374, Jan. 2018.  
doi: <https://doi.org/10.1109/TWC.2018.2793238>
- [9] Y. Go and J. Kim, "Index Modulation Scheme with Spread Spectrum in OTFS System," *Proceeding of Broadcast and Media Engineers conference*, Jeju, Republic of Korea, 2024. <https://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE11849262>
- [10] A. F. Molisch, *Delay-Doppler Communications: Principles and Applications*, Elsevier, Melbourne, pp.1-231, 2022.  
doi: <https://doi.org/10.1109/MCOM.2023.10080900>
- [11] J. Proakis, *Digital Communications*, McGraw-Hill, Massachusetts, pp.1-1150, 2008. <https://highered.mheducation.com/sites/0072957166/>
- [12] Y. Liang, L. Li, P. Fan and Y. Guan, "Doppler Resilient Orthogonal Time-Frequency Space (OTFS) Systems Based on Index Modulation," *Proceedings of Vehicular Technology Conference*, Antwerp, Belgium, 2020.  
doi: <https://doi.org/10.1109/VTC2020-Spring48590.2020.9129380>
- [13] K. J. Horadam, *Hadamard Matrices and Their Applications*, Princeton University Press, Berlin, pp.1-324, 2007.  
doi: <https://doi.org/10.1007/BFb0101073>
- [14] 3GPP, *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA)*, 3GPP TS 36.101, v.14.3.0, 2014. <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=2411>
- [15] ETSI, *Digital Video Broadcasting (DVB); Transmission to Handheld Terminals (DVB-H); Validation Task Force Report*, ETSI TR 102 401, v.1.1.1, 2005. <https://www.etsi.org/standards#page=1&search=TR%20102%20401&title=1&etsiNumber=1&content=1&version=0&onApproval=1&published=1&withdrawn=1&historical=1&isCurrent=1&superseded=1&startDate=1988-01-15&endDate=2024-10-31&harmonized=0&keyword=&TB=&stdType=&frequency=&mandate=&collaction=&sort=1>

## 저 자 소 개



### 고 영 빈

- 2023년 8월 : 한국해양대학교 전자전기정보공학부(공학사)
- 2023년 9월 ~ 현재 : 한국해양대학교 전자통신공학과 석사과정
- ORCID : <https://orcid.org/0009-0005-8922-5920>
- 관심분야 : 디지털방송시스템, 이동통신시스템, 디지털신호처리



### 김 정 창

- 2000년 2월 : 한양대학교 전자-전자통신-전파공학과(공학사)
- 2002년 2월 : 포항공과대학교 전자컴퓨터공학부(공학석사)
- 2006년 8월 : 포항공과대학교 전자컴퓨터공학부(공학박사)
- 2006년 9월 ~ 2008년 5월 : 포항공과대학교 정보통신연구소 선임연구원
- 2008년 5월 ~ 2009년 8월 : 포항공과대학교 미래정보기술사업단 연구조교수
- 2009년 8월 ~ 2010년 8월 : 한국전자통신연구원 선임연구원
- 2010년 9월 ~ 현재 : 한국해양대학교 전자전기정보공학부 교수
- 2017년 ~ 현재 : ETRI Journal, 편집위원
- 2018년 ~ 현재 : IEEE Transactions on Broadcasting, Associate Editor
- ORCID : <https://orcid.org/0000-0002-8612-9360>
- 관심분야 : 무선통신시스템, 디지털방송 전송시스템, 5G/6G