

레터논문 (Letter Paper)

방송공학회논문지 제27권 제2호, 2022년 3월 (JBE Vol.27, No.2, March 2022)

<https://doi.org/10.5909/JBE.2022.27.2.244>

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

OTFS 시스템을 위한 Gauss - Seidel 방법 기반의 검출 기법

차 은 영^{a)}, 김 형 석^{a)}, 안 해 성^{a)}, 설 권^{a)}, 김 정 창^{a)†}

Detection Scheme Based on Gauss - Seidel Method for OTFS Systems

Eunyoung Cha^{a)}, Hyeongseok Kim^{a)}, Haesung Ahn^{a)}, Seol Kwon^{a)}, and Jeongchang Kim^{a)†}

요 약

본 논문에서는 고속 이동환경에서 강건성을 향상시킬 수 있는 OTFS(orthogonal time frequency space) 시스템에서 주파수 및 시간 영역에서의 선형 MMSE(minimum mean squared error) 필터를 이용한 디코딩 알고리즘과 강화된 Gauss-Seidel 알고리즘을 이용한 디코딩 알고리즘의 성능을 비교한다. 강화된 Gauss-Seidel 알고리즘은 잡음 증폭을 억제함으로써 비트 오류율 성능을 개선할 수 있다. 전산 실험 결과를 통해 주파수 영역에서 MMSE 필터를 이용한 디코딩 알고리즘은 수신기의 이동 속도가 높아짐에 따라 성능 열화가 발생하는 것을 확인할 수 있고, 강화된 Gauss-Seidel 알고리즘을 이용한 디코딩 방법은 120km/h 속도와 500km/h 속도를 가지는 채널 환경에 대해 주파수 영역 및 시간 영역에서의 MMSE 필터 디코딩 알고리즘에 비해 우수한 성능을 나타내는 것을 확인할 수 있다.

Abstract

In this paper, the performance of the decoding schemes using linear MMSE filters in the frequency and time domains and the reinforcement Gauss-Seidel algorithm for the orthogonal time frequency space (OTFS) system that can improve robustness under high-speed mobile environments are compared. The reinforcement Gauss-Seidel algorithm can improve the bit error rate performance by suppressing the noise enhancement. The simulation results show that the performance of the decoding scheme using the linear MMSE filter in the frequency domain is severely degraded due to the effect of Doppler shift as the mobile speed increases. In addition, the decoding scheme using the reinforcement Gauss-Seidel algorithm under the channel environment with 120 km/h and 500 km/h speeds outperforms the decoding schemes using linear MMSE filters in the frequency and time domains.

Keyword : 6G, Doppler shift, OFDM, OTFS, time-varying channel

a) 한국해양대학교 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>

· Manuscript received December 21, 2021; Revised February 16, 2022; Accepted February 16, 2022.

1. 서론

최근 논의 중인 6G(sixth generation)에서는 이동성에 관한 요구가 1000km/h로 증가했다^[1]. 기존의 직교 주파수 분할 다중화(orthogonal frequency division multiplexing: OFDM) 변조 방식의 도플러 천이에 대한 취약점을 극복하기 위해 시간 및 주파수 축으로의 확산을 적용하여 신호를 전송하는 OTFS(orthogonal time frequency space) 변조 방식이 새로운 파형의 후보 기술로 제안되었다^[2]. [2]에 제안된 OTFS 변조 방식은 기존의 OFDM 시스템에 비해 큰 변화없이 쉽게 적용할 수 있다^[3]. 본 논문에서는 OTFS 변조 시스템에 대해 시간 및 주파수 영역에서의 MMSE(minimum mean squared error) 선형 필터와 강화된 Gauss-Seidel 알고리즘을 적용한 디코딩 기법에 대해 성능을 비교한다.

II. 시스템 모델

1. OTFS 송신 모델

OTFS 변조 시스템에서 지연-도플러 영역에 맵핑된 입력 데이터 비트 $\mathbf{X}_{DD} \in \mathbb{C}^{M \times N}$ 는 ISFFT(inverse symplectic Fourier transform)을 통하여 $\mathbf{X}_{TF} = \mathbf{F}_M \mathbf{X}_{DD} \mathbf{F}_N^H$ 와 같이 시간-주파수 영역의 신호 $\mathbf{X}_{TF} \in \mathbb{C}^{M \times N}$ 로 변환된다. 이때, \mathbf{F}_N 과 \mathbf{F}_M^H 은 M -차원 DFT(discrete Fourier transform) 행렬과 N -차원 DFT 행렬의 복소 전치 행렬이며 M, N 은 부반송파의 개수와 전송 심볼의 개수이다. 시간-주파수 영역의 신호는 $\mathbf{S} = \mathbf{F}_M^H \mathbf{X}_{TF}$ 와 같이 시간 영역으로 변환되어 송신 신호 $\mathbf{S} \in \mathbb{C}^{M \times N}$ 가 생성된다. L 길이의 CP 삽입 이후 시간 영역의 전송 신호 벡터 $\mathbf{s} = \text{vec}\{\mathbf{S}\} \in \mathbb{C}^{(M+L)N \times 1}$ 을 구할 수 있다. 이때, $\text{vec}\{\mathbf{S}\}$ 은 행렬 \mathbf{S} 의 열 방향 벡터화 함수이다.

2. OTFS 수신 모델

수신기에서 n 번째 OTFS 수신 신호 심볼 벡터 $\mathbf{r}_n \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ 은 $\mathbf{r}_n = \mathbf{H}_n \mathbf{s}_n + \mathbf{w}_n$ 와 같이 표현된다. 이때, $\mathbf{w}_n \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ 은 가산 백색 가우시안 잡음(additive white Gaussian noise: AWGN) 이고 $\mathbf{H}_n \in \mathbb{C}^{M \times M}$ 은 n 번째 수신 심볼에 대한 채널 행렬이며 $\mathbf{H}_n = \sum_{i=1}^P h_i \Delta_n^{l_i, k_i} \Pi_n^{l_i}$ 와 같이 나타낼 수 있다. 이때, Δ 은 $[\Delta]_{ii} = e^{\frac{j2\pi(i-1)}{(M+L)N}}$ 을 성분으로 가지는 대각 행렬, $\Pi \in \mathbb{Z}^{M \times N}$ 은 순환 치환 행렬이다. 수신된 신호 벡터 $\mathbf{r} \in \mathbb{C}^{MN \times 1}$ 을 $\mathbf{R} \in \mathbb{C}^{M \times N}$ 로 표현하면 \mathbf{R} 은 수식 (1)의 과정을 통해 시간-주파수 영역의 신호로 변환된다.

$$\mathbf{Y}_{TF} = \mathbf{F}_M \mathbf{R}. \quad (1)$$

시간-주파수 영역의 신호는 수식 (2)로 표현되는 SFFT과정을 통해 지연-도플러 영역의 신호로 표현된다.

$$\mathbf{Y}_{DD} = \mathbf{F}_M^H \mathbf{Y}_{TF} \mathbf{F}_N. \quad (2)$$

III. 디코딩 알고리즘

1. 주파수 영역 MMSE 디코딩 알고리즘

주파수 영역에서 MMSE 필터^[4]는 수식 (3)과 같다.

$$\mathbf{G}(m, n) = \frac{\mathbf{H}_{TF}^*(m, n)}{|\mathbf{H}_{TF}(m, n)|^2 + \sigma^2}. \quad (3)$$

이때, $\mathbf{H}_{TF}(m, n) = \mathbf{D}_m(\mathbf{F}_M \mathbf{H}_n \mathbf{F}_M^H)$ 은 n 번째 심볼의 m 번째 부반송파에 해당하는 채널 이득이고, $\mathbf{D}_m(\mathbf{F}_M \mathbf{H}_n \mathbf{F}_M^H)$ 은 $\mathbf{F}_M \mathbf{H}_n \mathbf{F}_M^H$ 의 대각성분으로 이루어진 $M \times 1$ 크기 벡터의 m 번

째 성분, σ^2 은 잡음의 분산 값이다. MMSE필터를 적용한 후 수식 (2)를 통해 지연-도플러 영역의 신호로 변환한다.

2. 시간 영역 MMSE 디코딩 알고리즘

시간 영역에서의 MMSE 필터의 적용은 아래 수식과 같다.

$$\hat{\mathbf{s}}_n = [\mathbf{H}_n^H \mathbf{H}_n + \sigma^2 \mathbf{I}]^{-1} \mathbf{H}_n^H \mathbf{r}_n. \quad (4)$$

이때, $\hat{\mathbf{s}}_n$ 은 n 번째 수신 신호에 MMSE 필터를 적용한 이후의 시간 영역 추정 신호벡터이다. 시간 영역에서 MMSE 필터링 이후에 지연-도플러 영역으로의 변환 과정을 통해서 최종 송신 신호 $\hat{\mathbf{X}}_{DD}$ 를 검출한다.

3. 강화된 Gauss-Seidel 알고리즘

잡음 증폭을 억제하기 위한 MMSE 필터의 개념을 Gauss-Seidel 알고리즘에 적용할 수 있다^[5]. 수신 심볼 \mathbf{r}_n 에 대해 $\mathbf{z}_n = \mathbf{H}_n^H \mathbf{r}_n = \mathbf{G}_n \mathbf{s}_n + \tilde{\mathbf{w}}_n$ 으로 표현할 수 있고 $\mathbf{G}_n = \mathbf{H}_n^H \mathbf{H}_n$, $\tilde{\mathbf{w}}_n = \mathbf{H}_n^H \mathbf{w}_n$ 이다. 이때, 잡음 증폭을 억제하기 위해 \mathbf{G}_n 을 $\tilde{\mathbf{G}}_n = \mathbf{H}_n^H \mathbf{H}_n + \sigma^2 \mathbf{I}$ 으로 재구성할 수 있다. $\tilde{\mathbf{G}}_n$ 을 적용한 강화된 Gauss-Seidel 알고리즘의 적용은 수식 (5)와 같다.

$$\hat{\mathbf{s}}_n^{i+1} = (\mathbf{D}_n + \mathbf{L}_n)^{-1} (\mathbf{z}_n - \mathbf{U}_n \hat{\mathbf{s}}_n^i). \quad (5)$$

반복을 통해 새로운 추정 값을 갱신하고 이때, $\hat{\mathbf{s}}_n^{i+1}$ 은 n 번째 수신 신호 벡터에 대해서 $i+1$ 번의 반복 계산 이후에 도출된 시간 영역 추정 신호 벡터이다. $\mathbf{D}_n, \mathbf{L}_n, \mathbf{U}_n$ 은 $\tilde{\mathbf{G}}_n$ 의 대각 성분 대각 행렬, 하부 삼각, 상부 삼각 성분 행렬이다. 최종 $\hat{\mathbf{s}}_n^{i+1}$ 의 값을 지연-도플러 영역의 신호로 변환한다.

IV. 전산 실험 결과

본 논문의 전산 실험에서는 완벽한 채널 추정 상태에서

로 다른 속도의 두 가지 TDL-C 채널 환경을 고려하였다:

- Scenario I : 120km/h 속도와 지연 확산 300ns
- Scenario II : 500km/h 속도와 지연 확산 300ns

반송파 주파수는 4GHz, $M=128, N=64$ 를 사용하였다. 또한, 부반송파 간격 15kHz와 QPSK 변조 기법을 사용하였다.

그림 1은 Scenario I에서 강화된 Gauss-Seidel 알고리즘과 시간 및 주파수 영역의 MMSE 디코딩 기법의 비트 오류율 (bit error rate: BER) 성능이다. 강화된 Gauss-Seidel 알고리즘은 $BER=10^{-4}$ 지점에서 시간 및 주파수 영역의 MMSE 필터에 비해 각각 1.5dB, 1.6dB의 SNR (signal-to-noise ratio) 이득을 얻는 것을 확인할 수 있다.

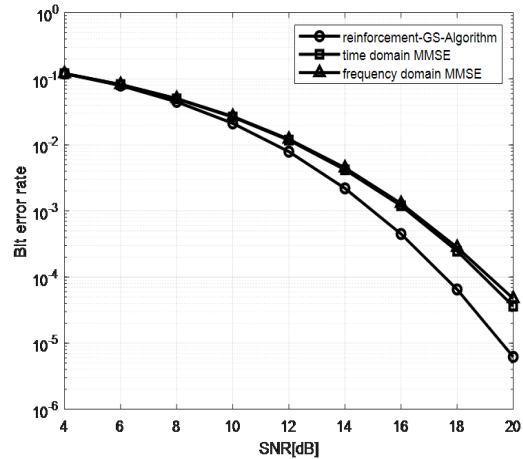


그림 1. 120km/h 속도의 TDL-C 채널 하에서 강화된 Gauss-Seidel 알고리즘, 시간 및 주파수 영역의 MMSE 디코딩 기법의 BER 성능
Fig. 1. BER performance of reinforcement Gauss-Seidel algorithm and MMSE filtering in time and frequency domains under TDL-C environment with velocity 120km/h

그림 2는 Scenario II에서 강화된 Gauss-Seidel 알고리즘과 시간 및 주파수 영역의 MMSE 디코딩 기법의 BER 성능을 나타낸다. 주파수 영역의 MMSE 디코딩 기법이 120km/h 속도의 채널 환경에 비해 성능 열화가 발생하는

것을 확인할 수 있다. 강화된 Gauss-Seidel 알고리즘은 BER= 10^{-4} 지점에서 시간 영역의 MMSE 필터에 비해 1.6 dB의 SNR 이득을 얻는 것을 확인할 수 있다.

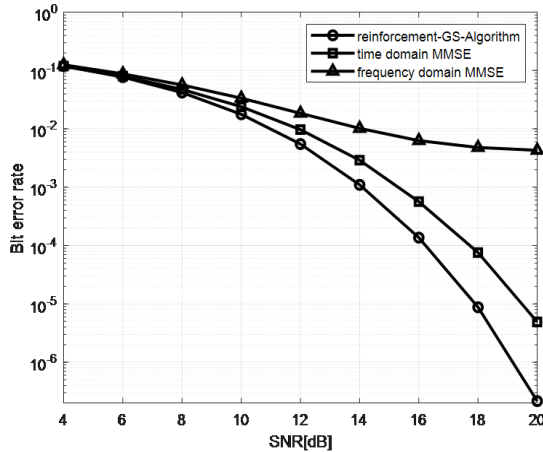


그림 2. 500km/h 속도의 TDL-C 채널 하에서 강화된 Gauss-Seidel 알고리즘, 시간 및 주파수 영역의 MMSE 디코딩 기법의 BER 성능
 Fig. 2. BER performance of reinforcement Gauss-Seidel algorithm and MMSE filtering in time and frequency domains under TDL-C environment with velocity 500km/h

그림 3은 Scenario I 과 Scenario II에서 강화된 Gauss-Seidel 알고리즘의 성능이 BER= 10^{-4} 을 만족하는 SNR값을 나타내며 i 가 2 이상일 때 수렴하는 것을 확인할 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 고속 이동 환경에서의 데이터 전송을 위한 OTFS 변조 시스템에 대한 시간 및 주파수 영역에서의 선형 MMSE 필터와 강화된 Gauss-Seidel 알고리즘을 이용한 디코딩 기법의 성능을 비교하였다. 전산 실험 결과로부터 강화된 Gauss-Seidel 알고리즘을 이용한 디코딩 기법은 시간 및 주파수 영역에서 MMSE 필터를 이용한 디코딩 방법에 비해 우수한 성능을 얻는 것을 확인할 수 있다.

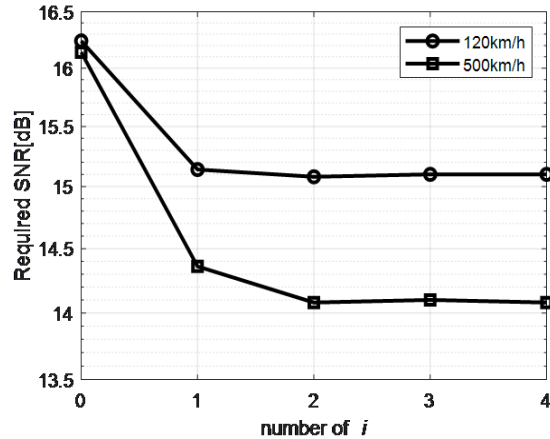


그림 3. 120km/h와 500km/h 속도의 TDL-C 채널에서 강화된 Gauss-Seidel 알고리즘을 적용한 디코딩을 사용하였을 때 BER= 10^{-4} 을 만족하는 SNR

Fig. 3. Required SNR at BER= 10^{-4} under TDL-C channel with speed of 120km/h and 500km/h of reinforcement Gauss-Seidel algorithm

참고 문헌 (References)

- [1] B. Ji et al., "Several Key Technologies for 6G: Challenges and Opportunities," *IEEE Communications Standards Magazine*, vol. 5, no. 2, pp. 44-51, June 2021.
doi: <https://doi.org/10.1109/MCOMSTD.001.2000038>.
- [2] R. Hadani, et al., "Orthogonal time frequency space modulation," *Proceeding of IEEE Wireless Communications and Networking Conference(WCNC)*, pp.1-6. Mar. 2017.
doi: <https://doi.org/10.1109/WCNC.2017.7925924>.
- [3] H. Kim, E. Cha, J. Kim, S.-I. Park and N. Hur, "A Robust Broadcast System Under Time-Varying Channels Based on OTFS Modulation," *Proceeding of IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting(BMSB)*, pp. 1-4, 2021.
doi: <https://doi.org/10.1109/BMSB53066.2021.9547024>.
- [4] G. D. Surabhi and A. Chockalingam, "Low-Complexity Linear Equalization for OTFS Modulation," *IEEE Communications Letters*, vol. 24, no. 2, pp. 330-334, Feb. 2020.
doi: <https://doi.org/10.1109/LCOMM.2019.2956709>.
- [5] J. Minango and C. de Almeida, "Low-complexity MMSE detector based on refinement Gauss-Seidel method for massive MIMO systems," *Proceeding of IEEE Latin-American Conference on Communications(LATINCOM)*, pp. 1-5, 2017.
doi: <https://doi.org/10.1109/LATINCOM.2017.8240166>.