

단일톤 기반 OTFS 시스템 채널 추정 오버헤드에 따른 통신 성능 평가

이한걸, 김재홍, 정진곤*

중앙대학교 전자전기공학과

{forener; kjhct9606; jgjoung}@cau.ac.kr

Communication Performance Evaluation on Single-Tone-Based OTFS System Channel Estimation Overhead

Han-Gyeol Lee, Jaehong Kim, Jingon Joung*

Department of Electrical and Electronics Engineering, Chung-Ang University

요약

최근, 직교 시간 주파수 공간 변조 시스템을 위한 단일톤 기반 채널 추정 방법이 제안되었다. 기존에 제안된 단일톤 기반 채널 추정 방법은 우수한 채널 추정 성능을 보이나, 데이터와 파일럿 심볼 간 간섭 제거를 위해 도플러 영역 전체에 보호 심볼을 삽입하므로, 높은 채널 추정 오버헤드를 갖는다. 본 논문에선 단일톤 채널 추정 방법이 갖는 채널 추정 오버헤드에 따른 데이터 심볼과 파일럿 심볼 간 간섭 영향을 확인하고, 이에 따른 비트 오류율 성능을 평가한다. 수신 파일럿 심볼이 겪는 간섭 신호를 유도하여, 도플러 보호 심볼 길이가 감소함에 따라 데이터 심볼과 파일럿 심볼 간 간섭 신호 크기가 증가함을 확인했다. 모의실험 결과, 통신 성능 열화 없이 도플러 보호 심볼 길이를 전체 대비 40.6% 줄일 수 있음을 확인하였다.

I. 서론

직교 시간 주파수 공간 (OTFS: orthogonal time-frequency-space) 변조는 지연-도플러 영역 다중화 기술로, 시변 채널에서 우수한 통신 성능을 얻는다 [1]. 최근, OTFS 변조 시스템을 위한 단일톤 기반 채널 추정 방법이 제안되었다 [2]. 하지만, 데이터 심볼과 파일럿 심볼 간 간섭을 제거하기 위해, [2]에선 도플러 영역 전체에 보호 심볼을 삽입하여 과도한 채널 추정 오버헤드를 갖는다. 본 연구는 도플러 보호 심볼 길이에 따른 채널 추정 오버헤드와 데이터 심볼과 파일럿 심볼 간 간섭 영향을 확인하고, 이에 따른 비트 오류율 (BER: bit error rate) 성능을 평가한다. 도플러 보호 심볼 길이가 감소함에 따라 채널 추정 오버헤드는 줄어드나, 수신 파일럿 신호가 겪는 간섭 크기가 증가함을 확인했다. 모의실험 결과, BER 성능 열화 없이 도플러 보호 심볼 길이를 40.6% 줄일 수 있음을 확인하였다.

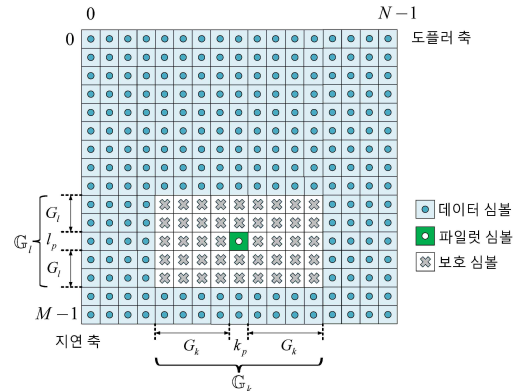


그림 1. 채널 추정을 위한 지연-도플러 영역 송신 자원 그리드 예시 ($N=16, M=16$).

II. OTFS 변조 시스템 신호 모델 및 단일톤 기반 채널 추정 방법

그림 1과 같이, 지연 축과 도플러 축에 각각 M 개, N 개 자원 요소를 갖는 지연-도플러 영역 자원 그리드를 고려한다. OTFS 변조 시스템은 채널 추정을 위하여 (l_p, k_p) 짝 자원 요소에 파일럿 심볼 x_p 를 할당하고, 그 주변에 보호 심볼을 삽입한다 [2]. 송신 자원 그리드를 행렬 $\mathbf{X} \in \mathbb{C}^{M \times N}$ 으로 나타낼 때, (l, k) 짝 자원 요소 $\mathbf{X}[l, k]$ 는 다음과 같이 쓸 수 있다:

$$\mathbf{X}[l, k] = \begin{cases} d[l, k], & \text{if } l \notin \mathbb{G}_l, k \notin \mathbb{G}_k, \\ x_p, & \text{if } l = l_p, k = k_p, \\ 0, & \text{elsewhere.} \end{cases} \quad (1)$$

이때, $d[l, k]$ 는 (l, k) 짝 자원 요소에 할당하는 데이터 심볼이며, $\mathbb{G}_l = \{l_p - G_l, \dots, l_p + G_l\}$ 와 $\mathbb{G}_k = \{k_p - G_k, \dots, k_p + G_k\}$ 는 각각 보호 심볼 지연 인덱스 집합, 보호 심볼 도플러 인덱스 집합이다. 송신 전력을 $P = E\{|d[l, k]|^2\}$ 라고 할 때, $x_p = \sqrt{|\mathbb{G}_l| |\mathbb{G}_k| P}$ 이다. 지연-도플러 영역 자원 할당 후, 송신기는 OTFS 변조를 통해 시간 영역 송신 신호 $\mathbf{s} = (\mathbf{F}_N^H \otimes \mathbf{I}_M) \text{vec}\{\mathbf{X}\} \in \mathbb{C}^{MN \times 1}$ 를 생성한다. 이때, $\text{vec}\{\cdot\}$ 와 \otimes 는

각각 벡터화 연산과 크로네커 벡터 곱 연산이며, $\mathbf{F}_N \in \mathbb{C}^{N \times N}$ 은 N 포인트 이산 푸리에 변환 행렬이다. OTFS 변조 후, 송신기는 길이가 N_{CP} 인 cyclic prefix (CP)를 \mathbf{s} 에 삽입하여 전송한다.

수신기는 시변 무선 채널을 통해 신호를 수신하며, CP를 제거한 시간 영역 수신 신호는 $\mathbf{r} = \mathbf{H}\mathbf{s} + \mathbf{z} \in \mathbb{C}^{MN \times 1}$ 이다. 이때, $\mathbf{z} \in \mathbb{C}^{MN \times 1}$ 는 잡음 벡터로, 각 원소가 평균이 0, 분산이 σ_z^2 인 복소 가우시안 분포를 따른다. 시간 영역 채널 행렬 $\mathbf{H} \in \mathbb{C}^{MN \times MN}$ 의 각 원소는 $m, n \in \{0, \dots, MN-1\}$ 에 대해 다음과 같이 쓸 수 있다:

$$\mathbf{H}[m, \langle m - n \rangle_{MN}] = \sum_{i=1}^L h_i \delta[\langle n - l_i \rangle_{MN}] e^{j2\pi \frac{(k_i + \nu_i)(N_{CP} + m - l_i)}{MN}}. \quad (2)$$

이때, $\langle \cdot \rangle_{MN}$ 은 모듈로 MN 연산자이고, L 과 h_i 는 각각 다중 경로 수와 i 짝 채널 이득이다. 또한, k_i 는 i 짝 정수 도플러 탭이고, $\nu_i \in (-0.5, 0.5)$ 는 i 짝 분수 도플러 탭을 의미한다. 최대 정수 지연 탭 l_{\max} 에 대하여, $l_i \in [0, l_{\max}]$ 는 i 짝 정수 지연 탭을 의미한다. 또한,

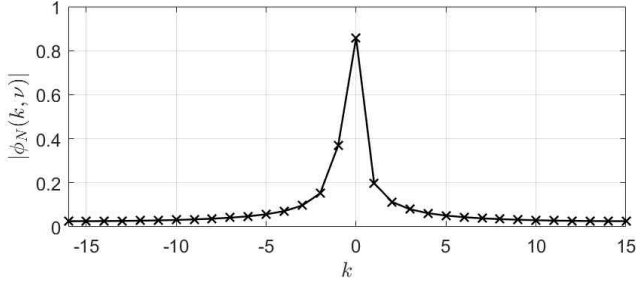


그림 2. k 에 따른 $|\phi_N(k, \nu)|$ 크기 비교. ($\nu = 0.3$, $N = 32$)

(2)에서 정의한 원소를 제외한 \mathbf{H} 의 나머지 원소는 모두 0이다 [1]. 본 논문에선 $l_{\max} < G_i$ 이며, 서로 다른 $i, j \in \{1, \dots, L\}$ 에 대해 $l_i \neq l_j$ 를 가정한다. 수신기는 시간 영역 수신 신호 \mathbf{r} 로부터 지연-도플러 영역 수신 자원 그리드 $\mathbf{Y} = \text{mat}_{MN}\{(\mathbf{F}_N \otimes \mathbf{I}_M)\mathbf{r}\} \in \mathbb{C}^{M \times N}$ 을 복조한다. 이때, $\text{mat}_{MN}\{\cdot\}$ 은 $M \times N$ 행렬화 연산이다.

일반적으로, 데이터 심볼보다 파일럿 심볼에 더 큰 전력을 할당하므로, i 째 수신 파일럿 심볼 전력 $E\{|\mathbf{Y}[l_p + l_i, k_p + k_i]|^2\}$ 은 $l \notin G_i$ 에 대한 수신 데이터 심볼 전력 $E\{|\mathbf{Y}[l, k]|^2\}$ 보다 크다. 이에 따라, \mathbf{Y} 에 문턱값 방법을 적용하여 정수 지연 탭과 정수 도플러 탭 추정치인 \hat{l}_i 와 \hat{k}_i 를 얻는다. 그 후, $\mathbf{Y}[l_p + \hat{l}_i, k_p + \hat{k}_i]$ 에 단일톤 주파수 및 크기 추정 방법을 적용하여 ν_i 와 h_i 를 추정한다 [2]. 마지막으로, 추정된 채널 파라미터를 (2)에 대입하면 시간 영역 채널 행렬 추정치인 $\hat{\mathbf{H}}$ 을 얻을 수 있다.

III. 도플러 보호 심볼 길이에 따른 데이터 심볼 간섭 및 채널 추정 오버헤드 영향

단일톤 기반 채널 추정 방법에서 i 째 수신 파일럿 심볼 $\mathbf{Y}[l_p + l_i, k_p + k_i]$ 는 다음과 같이 쓸 수 있다:

$$\mathbf{Y}[l_p + l_i, k_p + k_i] = \tilde{h}_i \phi_N(0, \nu_i) x_p + z_i + I_i. \quad (3)$$

이때, $\tilde{h}_i = h_i e^{-j2\pi(k_i + \nu_i)(l_i - N_{CP})/MN}$ 이고 z_i 는 i 째 수신 심볼 잡음이다. 임의의 정수 k 와 실수 $\nu \in (-0.5, 0.5)$ 에 대해, $\phi_N(k, \nu) = \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j2\pi n(k + \nu)/N)/N$ 이다. (3)에서 쓴 간섭 신호 I_i 는 다음과 같이 나타낼 수 있다:

$$I_i = \sum_{k \notin G_i} \sum_{j=1}^L \tilde{h}_j d[l_p + l_i - l_j, k] \phi_N(k_p + k_i - (k + k_j), \nu_j). \quad (4)$$

이때, $k_p + k_i$ 와 $k + k_j$ 는 각각 i 째 경로를 통해 수신한 파일럿 심볼과 j 째 경로를 통해 수신한 k 째 데이터 심볼의 도플러 인덱스이다 [1]. 따라서, 도플러 축 상에서 파일럿과 데이터 심볼 사이 거리가 $|k_p + k_i - k - k_j|$ 인 경우, 크기가 $|\phi_N(k_p + k_i - k - k_j, \nu_j)|$ 인 간섭을 발생시키는 것으로 해석할 수 있다. 그림 2에선 k 에 따른 함수 $|\phi_N(k, \nu)|$ 의 파형을 나타내며, $|k|$ 가 증가함에 따라 $|\phi_N(k, \nu)|$ 는 감소함을 알 수 있다. 즉, 도플러 보호 심볼 길이가 길수록 수신 파일럿 심볼과 데이터 심볼 간 평균 거리가 증가하며, 이에 따라 간섭 크기가 낮아짐을 알 수 있다. 한편, 단일톤 기반 채널 추정 방법에 따른 채널 추정 오버헤드는 도플러 보호 심볼 길이 $|G_k|$ 에 비례하므로 $|G_k|$ 를 증가시켜 채널 추정 정확도를 높일 수 있

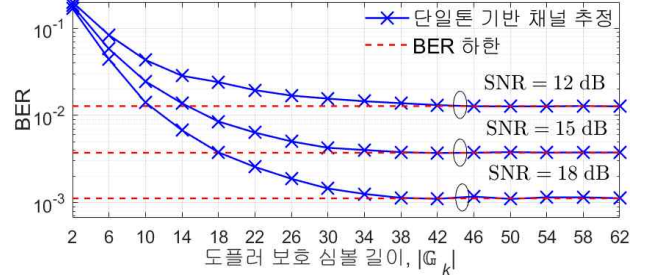


그림 3. 도플러 보호 심볼 길이에 따른 단일톤 기반 채널 추정 방법 BER 성능 비교. ($\text{SNR} = P/\sigma_z^2 \in \{12, 15, 18\}$ dB)

으나, 채널 추정 오버헤드가 증가하여 주파수 효율이 낮아질 수 있다.

IV. 모의실험을 통한 도플러 보호 심볼 길이에 따른 통신 성능 평가

본 장에서는 모의실험을 통해, 도플러 보호 심볼 길이(즉, 채널 추정 오버헤드)에 따른 단일톤 기반 채널 추정 방법이 얻는 BER 성능을 평가한다. 모의실험에서 활용한 파라미터는 다음과 같다: $M = 128$; $N = 64$; $l_{\max} = 10$; $L = 5$; $N_{CP} = 11$; $|G_i| = 21$; $k_{\max} = 10$. 정수 지연 탭 l_i 는 $[0, l_{\max}]$ 에 대한 이산 균일 분포를 따른다. 구간 $(-k_{\max}, k_{\max})$ 에 대한 연속 균일 분포를 따르는 확률 변수 θ_i 로부터 $k_i = \lceil \theta_i \rceil$ 와 $\nu_i = \theta_i - k_i$ 를 얻는다. 여기서 $\lceil \cdot \rceil$ 은 반올림 연산자를 의미한다. 채널 이득 h_i 는 평균이 0, 분산이 $1/L$ 인 복소 가우시안 분포를 따른다.

그림 3에선 도플러 보호 심볼 길이 $|G_k|$ 에 따른 BER 성능을 확인하였다. 이때, 심볼 변조는 quadrature phase shift keying를 사용하였으며, 수신기에선 최대 비 결합으로 등화하였다 [1]. 모의실험 결과, $|G_k|$ 가 증가할수록 BER이 낮아지며, $|G_k| = 38$ 인 경우, BER 하한과 같은 성능에 도달함을 확인하였다. 즉, 단일톤 채널 추정 방법을 활용한 OTFS 시스템에선, 도플러 보호 심볼 길이를 전체 길이 대비 약 40.6% 줄여도 BER 성능에 열화가 없음을 확인하였다.

V. 결론

본 논문에선 OTFS 시스템 단일톤 채널 추정 방법이 갖는 채널 추정 오버헤드에 따라 파일럿 심볼이 겪는 간섭 신호 크기를 확인하고, BER 성능을 평가하였다. 간섭 신호를 유도하여, 도플러 보호 심볼 길이가 감소할수록 간섭 신호 크기가 증가함을 확인했다. 모의실험 결과, 도플러 보호 심볼 길이를 전체 대비 40.6% 줄여도 BER 성능 열화 없음을 확인하였다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원(2022R1A2C1003750)과 정보통신기획평가원의 지원(2021-0-00874, 시공간 선 부호 기반 차세대 무선 접속 기술 개발, 30%; 2022-0-00635, 28GHz 대역/특화망대역/NR-U 대역을 지원하는 5G 산업용 단말 기술 개발, 20%)을 받아 수행된 연구임.

참고 문헌

- [1] Y. Hong, T. Thaj, and E. Viterbo, *Delay-Doppler Domain Communications: Principles and Applications*, Cambridge, MA, USA: Academic, 2022.
- [2] H.-G. Lee, K. Kim, J. Kim, and J. Joung, "직교 시간 주파수 공간 시스템을 위한 단일톤 기반 채널 추정 방법," in *Proc. Summer Annual Conf. IEIE*, Jeju, Korea, Jun. 2023, pp. 864-868.