

지연-도플러 영역에서의 픽셀 기반 보간 기법을 통한 OTFS 시스템의 통신 성능 개선

김준호, 박정훈*, 박소윤, 이성욱

중앙대학교, *서울대학교

keemjuno@cau.ac.kr, *hoon0337@maxwell.snu.ac.kr, thdb0711@cau.ac.kr, seongwooklee@cau.ac.kr

Improving Communication Performance of OTFS Systems Using Pixel-based Interpolation in Delay-Doppler Domain

Junho Kim, Jeong-Hoon Park*, Soyeon Park, Seongwook Lee

Chung-Ang Univ., *Seoul National Univ.

요약

본 논문은 Orthogonal time frequency space (OTFS) 시스템의 통신 성능을 개선하기 위한 지연-도플러 영역에서의 픽셀 기반 보간 기법을 제안하였다. 기존 OTFS 시스템의 지연-도플러 영역 채널 모델은, 연속적인 지연-도플러 값을 정수 격자로 근사하기 때문에 표현 오차가 발생한다. 이를 해결하기 위해 본 논문에서는 검출된 피크 주변의 픽셀 정보를 활용하여 2차 포물면 기반 보간을 수행함으로써 비정수 지연-도플러 성분을 추정하고 왜곡된 채널 응답을 보정하였다. 시뮬레이션 결과, 제안된 보간 기법을 적용한 경우 기존 방식 대비 Bit error rate이 개선됨을 확인하였다.

I. 서론

6G 고속 이동통신 환경에서는 큰 도플러 편이로 인해 전통적인 Orthogonal frequency-division multiplexing (OFDM) 시스템이 심볼 간 간섭과 반송파 간 간섭에 취약해지며, 채널 추정 및 등화 성능이 저하되는 한계가 존재한다 [1]. 이러한 한계를 극복하기 위해 Orthogonal time frequency space (OTFS) 변조 기법이 제안되었다 [2]. OTFS는 심볼을 지연-도플러 영역에 맵핑하고, Inverse symplectic fast Fourier transform (ISFFT)을 통해 시간-주파수 신호로 변환하여 전송함으로써, 고속 이동 환경에서도 각 심볼이 유사한 평균 채널 이득을 갖도록 한다.

OTFS 시스템에서는 채널 응답을 지연-도플러 영역의 이산화된 격자 위에 표현한다. 그러나 실제 무선 채널에서는 각 경로의 지연과 도플러 주파수 성분이 연속적인 값으로 존재하므로, 이를 이산 격자로 표현할 경우 지연-도플러 영역 채널 응답이 단일 셀에 집중되지 못하고 인접한 여러 셀로 분산되는 에너지 누설 현상을 초래한다. 그 결과, 채널 추정 과정에서 잘못된 다중경로 위치 추정과 응답 왜곡이 발생하고, 등화 과정에서 지연-도플러 영역 상의 셀 간 간섭 증가로 Bit error rate (BER) 성능이 저하된다.

본 논문에서는 지연-도플러 영역에서 연속 성분의 이산화로 인해 발생하는 성능 저하를 완화하기 위한 픽셀 기반 보간 기법을 제안한다. 제안 기법은 초기 채널 응답으로부터 검출된 피크 주변의 국부 영역을 활용하여 2차 포물면 기반 보간을 수행함으로써, 경로의 연속적인 지연 및 도플러 주파수 성분을 추정하고 채널 응답을 보정한다.

II. 본론

가. OTFS 시스템 모델

OTFS 시스템에서 송신단은 $M \times N$ 크기의 지연-도플러 영역 상의

이산화된 셀에 데이터 심볼 $x_{DD}[k, l]$ 을 맵핑한 후, ISFFT 및 Heisenberg 변환을 적용하여 시간 영역 송신 신호를 생성한다. 수신단에서는 Wigner 변환과 Symplectic fast Fourier transform (SFFT)을 통해 수신신호를 지연-도플러 영역으로 변환하며, 이때 수신신호는

$$y_{DD}[k, l] = \sum_{k'=0}^{N-1} \sum_{l'=0}^{M-1} h[k', l'] e^{j2\pi(\frac{[l-l']M}{M})\frac{(k')N}{N}} \alpha_i[k, l] \quad (1)$$
$$x[[k-k']_N, [l-l']_M]$$

와 같이 송신 심볼과 지연-도플러 채널 응답 간의 2차원 순환 컨볼루션 형태로 표현된다. 여기서 k 와 l 은 각각 도플러 인덱스 및 지연 인덱스를 의미하며, $h[k', l']$ 는 지연-도플러 영역에서의 채널 임펄스 응답을 나타낸다. 또한 $[\cdot]_M$ 과 $[\cdot]_N$ 은 각각 M 과 N 에 대한 모듈로 연산을 의미한다. 위 식에서 $\exp(j2\pi(\frac{[l-l']M}{M})\frac{(k')N}{N})$ 및 $\alpha_i[k, l]$ 항은 지연 축의 순환과 도플러 성분이 결합되면서 발생하는 추가 위상 항으로 OTFS의 지연-도플러 입출력 관계가 단순한 2차원 컨볼루션이 아니라 위상 결합이 포함됨을 보여준다. 이 때,

$$\alpha_i[k, l] = \begin{cases} 1, & l' \leq l < M \\ \exp(j2\pi \frac{k}{N}), & 0 \leq l < l' \end{cases} \quad (2)$$

와 같이 정의된다.

이상적인 경우, 각 경로는 지연-도플러 영역에서 단일 이산 셀에 대응되는 희소 채널로 표현된다. 그러나 실제 환경에서는 경로의 지연 및 도플러 주파수 성분이 연속적인 값으로 존재하므로, 이를 이산 격자로 표현할 경우 식 (1)에서 가정한 이상적인 2차원 컨볼루션 구조에서 벗어나게 되며, 채널 응답의 피크가 단일 셀에 집중되지 못하고 인접한 다수의 셀로 분산되어 나타난다. 그림 1의 (a)는 단일 경로에 대해 지연 및 도플러 축에서의 위치가 각각 격자의 0.47, 0.33 만큼 어긋난 경우, 지연-도플러 영역

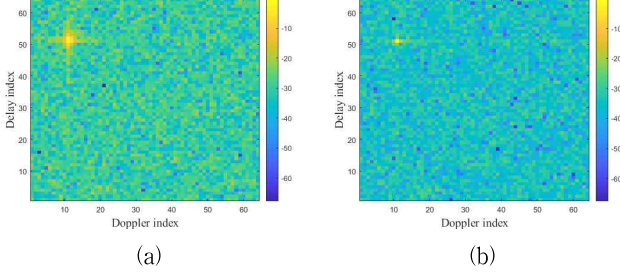


그림 1. (a) 보간 기법 적용 전과 (b) 적용 후의 지연-도플러 영역 채널 응답

에서 채널 응답이 단일 셀에 집중되지 않고 여러 이산 셀로 분산되어 나타나는 예를 보여준다.

나. 픽셀 기반 2차 포물면 보간 기법

본 논문에서는 지연-도플러 영역에서의 격자 근사 오차로 인해 분산된 채널 응답을 보정하기 위해, 주변 이산 셀 정보를 활용한 픽셀 기반 2차 포물면 보간 기법을 제안한다. 우선, 파일럿 심볼을 이용한 초기 채널 추정을 수행하여 지연-도플러 영역 채널 응답 행렬 $\hat{H}[k, l]$ 을 얻은 후, 가장 큰 크기 값을 가지는 이산 셀의 위치 $[k_0, l_0]$ 를 검출한다. 이후 해당 중심 셀과 인접한 8개 셀로 구성된 3×3 국부 영역을 고려하며, 이때 각 셀의 값은

$$P_{i,j} = |\hat{H}[k_0 + i, l_0 + j]|, (i, j \in -1, 0, 1) \quad (3)$$

와 같이 정의된다. 피크 주변의 국부적인 채널 응답은 2차 곡면 형태로 근사될 수 있으므로,

$$q(\delta k, \delta l) = a\delta k^2 + b\delta l^2 + c\delta k\delta l + d\delta k + e\delta l + f \quad (4)$$

와 같은 2차 곡면 모델을 가정한다. 여기서 $\delta k, \delta l$ 은 각각 $[k_0, l_0]$ 를 기준으로 한 도플러 및 지연 축의 보정량을 의미한다. 2차 곡면의 계수는 3×3 국부 영역 샘플을 이용하여 중심 차분 기반의 미분 근사를 통해 계산된다. 구체적으로, 지연 축과 도플러 축 방향의 1차 기울기 성분은 인접 셀 간 차분으로부터 근사되며, 2차 곡률 성분은 중심 셀과 주변 셀 간의 차이를 통해 계산된다. 또한, 지연 및 도플러 축 간의 교차 곡률 성분은 대각선 방향 셀 간의 차분으로부터 근사 된다. 이후 δk 와 δl 은

$$\delta k = \frac{ce - 2bd}{4ab - c^2}, \delta l = \frac{cd - 2ae}{4ab - c^2} \quad (5)$$

와 같이 추정하며, 최종적으로 보정된 도플러 및 지연 축 상의 정규화된 값은 각각 $k_0 + \delta k$ 와 $l_0 + \delta l$ 로 표현된다. 해당 보정 정보를 이용해 채널 응답을 재구성함으로써, 지연-도플러 영역에서의 격자 근사 오차로 인한 채널 추정치의 분산을 효과적으로 줄일 수 있다.

다. 시뮬레이션 결과

제안 기법의 효과를 검증하기 위한 시뮬레이션을 수행하였다. 단일 경로에 대해 지연 및 도플러 축에서의 위치가 각각 격자의 0.47, 0.33 만큼 어긋난 경우에 대해 수행하였으며, 주요 파라미터는 표 1에 나타내었다.

그림 1은 보간 적용 전후의 지연-도플러 영역 채널 응답을 비교한 결과이다. 그림 1의 (a)는 보간을 적용하지 않은 경우로, 연속적인 도플러 주파수를 이산 셀로 근사함에 따라 채널 응답이 단일 셀에 집중되지 못하고 여러 셀에 걸쳐 분산되는 현상을 보여준다. 반면 그림 1의 (b)는 제안한 보간기법 적용 후, 해당 경로 에너지가 하나의 셀에 보다 집중되며 주변 간섭이 감소한 것을 확인할 수 있다. 한편, 그림 2는 제안된 보간 기법의

표 1. OTFS 시스템 시뮬레이션 파라미터

파라미터	값
중심주파수	60 GHz
서브캐리어 간격	1.25 MHz
심볼 타임	0.8 μ s
지연 인덱스 수	64
도플러 인덱스 수	64

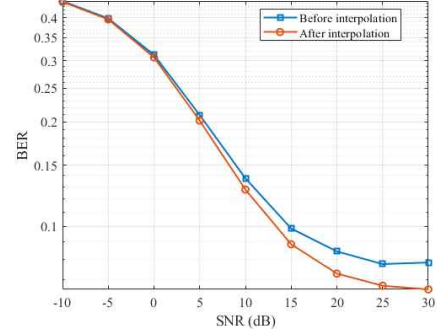


그림 2. 보간 기법 적용 전후의 BER 성능 비교

성능 개선 효과를 BER 관점에서 정량적으로 비교한 결과를 나타낸다. Line-of-sight 경로가 하나만 있는 이상적인 Additive white Gaussian noise 환경에서 추정된 채널을 기반으로 복조를 진행하여 데이터 심볼을 복원한 결과, 기존 방식 대비 더 낮은 BER을 달성함을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 제안된 픽셀 기반 2차 포물면 보간 기법이 지연-도플러 영역에서의 격자 근사 오차로 인해 발생하는 성능 저하를 효과적으로 완화함을 보여준다.

III. 결론

본 논문에서는 OTFS 시스템의 지연-도플러 영역에서 격자 근사 오차로 인해 발생하는 BER 성능 저하 문제를 제시하고, 이를 해결하기 위한 픽셀 기반 보간 기법을 제안하였다. 제안된 보간 기법은 지연-도플러 영역의 채널 응답에 대해 2차 포물면 기반 보간을 적용함으로써, 채널 응답의 세부 지연 및 도플러 주파수 값을 추정하고 왜곡을 보정한다. 시뮬레이션 결과, 제안 기법을 적용한 경우 BER 성능이 개선되어 OTFS 시스템의 통신 성능을 효과적으로 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

ACKNOWLEDGMENT

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. RS-2024-00405510).

참고 문헌

- [1] A. M. Jaradat, J. M. Hamamreh, and H. Arslan, "Modulation options for OFDM-based waveforms: classification, comparison, and future directions," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 17263–17278, January 2019.
- [2] R. Hadani, S. Rakib, M. Tsatsanis, A. Monk, A. J. Goldsmith, A. F. Molisch, and R. Calderbank, "Orthogonal time frequency space modulation," *2017 IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, San Francisco, CA, USA, pp. 1–6, March 2017.