

WAVE 시스템에서 PER 성능 향상을 위한 개선된 MMSE 채널 추정 기법

김대희*, 장영호, 임성묵**

*한국교통대학교 교통·에너지 융합 전공, **한국교통대학교 전자공학과

*rlaeo@gmail.com, **smlim@ut.ac.kr

Advanced MMSE Channel Estimation Scheme for Improving Packet Error Rate in WAVE Systems

Dae Hee Kim*, Young Ho Jang, Sungmook Lim**

Korea National University of Transportation

요약

기존 time truncation 기반 MMSE (Minimum Mean Square Error) 채널 추정 기법은 채널의 공분산 행렬을 LS 기법으로 추정된 초기 채널값을 사용함으로써 낮은 SNR (Signal to Noise Ratio) 환경에서는 잡음에 의해 채널 추정 정확도가 낮아서 PER (Packet Error Rate) 성능이 열화되는 문제점을 가지고 있다. 본 논문에서는 낮은 SNR에서도 높은 PER 성능을 보장하기 위하여 SNR이 낮은 환경에서는 time truncation 기법 적용 후 추정 채널값을 이용하여 채널의 공분산 행렬을 유도한 뒤 이를 MMSE에 적용하는 기법을 제안한다. 모의 실험 결과 제안 기법의 PER 성능은 기존 time truncation 기반 MMSE 기법 대비 낮은 SNR에서 최대 5dB 성능 향상을 볼 수 있다.

I. 서론

차량 간 무선 통신을 위해 IEEE 802.11p의 표준이 만들어졌지만, 차량의 이동성으로 인해 시간에 따라 크게 변화하는 채널이 형성되는 상황에서는 IEEE 802.11p 표준에서 사용하는 4개의 기준신호 부반송파로는 채널 변화를 정확히 예측할 수 없기 때문에 성능을 보장할 수 없다. 따라서 패킷의 각 심볼이 겪는 채널을 갱신하며 추정하는 방식이 필요하다.

최근까지 차량 간 통신을 위한 채널 추정 기법에 관한 연구가 활발히 진행되었으며, 여러 방안이 제시되었다. 그 중 낮은 SNR (Signal to Noise Ratio) 환경에서 큰 성능을 보인 주파수 축 채널 정보를 IDFT (Inverse Discrete Fourier Transform)하여 채널 tab 이외에 다른 tab을 제거하여 DFT (Discrete Fourier Transform)를 진행하는 time truncation 기법이 제시되었으며[1], 높은 SNR 환경에서 가장 큰 성능을 보인 채널의 통계적 특성을 채널의 공분산 행렬(Covariance Matrix)로 연산하여 채널 추정 오차를 줄이는 MMSE (Minimum Mean Square Error) 기법이 제시되었다.[2]

그리고 두 개의 기법을 결합한 time truncation 기반 MMSE 기법 또한 제시되었다.[3] 두 기법을 결합한 time truncation 기반 MMSE 기법은 높은 SNR 환경에서는 단일 MMSE 기법보다 좋은 성능을 보이지만 낮은 SNR 환경에서는 time truncation 기법을 적용했음에도 성능 향상 정도가 미비하다. 이러한 문제점은 MMSE 적용 시 필요한 채널 공분산 행렬을 LS (Least Square) 채널 추정 방식 기반의 초기 채널 추정값을 이용하기 때문에 채널 추정 정확도가 낮아지는 데에서 기인한다.

따라서, 본 논문에서는 기존 time truncation 기반의 MMSE 기법에서 LS 채널 추정값 대신 time truncation 이후 업데이트된 채널 추정값을 이용하여 채널 공분산 행렬을 구성하는 방식을 새롭게 제안한다. 제안 기법에서는 일차적으로 해당 수신 신호의 SNR을 측정 후 임계값과 비교하여 임계값보다 낮은 SNR에서는 새롭게 제안하는 채널 공분산 행렬을 이용하여 MMSE를 적용하고, 높은 SNR에서는 기존의 time truncation 기반 MMSE를 적용하여 채널을 추정한다.

SNR에 따라 채널의 공분산 행렬을 달리 적용함으로써 낮은 SNR 환경에서도 PER (Packet Error Rate) 성능을 향상시킬 수 있다.

II. 본론

II-1 시스템 모델

주파수 5.9GHz 대역에서 10MHz 대역폭을 사용하며 프리앰블 (Short Training Symbol, Long Training Symbol), Signal Field, 그리고 Data Symbols로 구성된 IEEE 802.11p Frame 구조의 표준을 기준으로 진행한다. 이때 Short Training Symbol을 제외한 모든 구조에서 샘플링 시간은 100ns로 진행하며 Preamble을 제외한 구조들은 64개의 부반송파 중에 -32번째부터 -27번째, DC 그리고 27번째부터 31번째를 제외한 52개의 부반송파에 data를 실어서 보내며, -21번째, -7번째, 7번째, 21번째는 기준신호 부반송파를 실어서 보낸다.

II-2 Time-Truncation 기반 MMSE 기법

기존 Time-Truncation 기반 MMSE 기법은 LS기법으로 추정된 채널 정보를 IDFT를 진행하여 Time-Truncation 기법을 적용한 채널 정보를 가상 기준신호로 지정하여 LS 기법으로 추정된 채널 정보와 지정된 가상 기준신호와 공분산 행렬과 가상 기준신호를 서로 행렬 곱한 공분산 행렬을 구성한다. 이후, 가상 기준신호 간 공분산 행렬에 잡음 파워가 요소인 대각행렬을 더한 후, 행렬을 역행렬을 취한다. 이후 LS 기법으로 추정된 채널 정보와 가상 기준신호 간 공분산 행렬과 역행렬을 취한 행렬간 행렬 곱을 하여 MMSE 행렬을 구한 후, MMSE 행렬과 가상 기준신호를 곱한 값을 최종 채널 추정치로 계산한다.

위 방식은 High SNR 환경에서 우수한 성능을 보이지만 MMSE 기법과 같이 Low SNR 환경에서는 잡음의 영향으로 인해 LS 기법으로 추정된 채널 정보가 정확하지 않기에 채널의 통계적 특성을 이용하여도 성능 열화를 보인다. 그래서 다음과 같은 채널 추정 기법 운용을 제안한다.

II-3 제안하는 채널 추정 기법

먼저 주파수 축에서 LS 기법을 이용해 채널 추정값 $\widehat{H}_{LS}(k,i)$ (k 는 OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)의 부반송파의 인덱스이며, i 는 OFDM 데이터 심볼의 인덱스이다.)를 계산한다. 이후 LS 기법으로 추정된 채널을 다음과 같이 $52 \times L$ DFT Matrix($\mathbf{W}$)를 이용하여 IDFT를 진행한 결과인 $\hat{h}_{LS}$ 을 다시 DFT를 진행한다.

$$\mathbf{W} = [\cdot \cdot \exp(-j*2\pi*(n-1)*(l-1)/52) \cdot \cdot] (1 \leq n \leq 52, 1 \leq l \leq L) \quad (1)$$

$$\widehat{H}_{LS}(k,i) = \frac{Y(k,i)}{\text{Demapping}(Y(k,i)/H_{proposed}(k,i-1))} \quad (2)$$

$$\hat{h}_{LS}(1:L,i) = \mathbf{W}^H \widehat{H}_{LS}(1:52,i) \quad (3)$$

$$\mathbf{P}_i(1:52,i) = \mathbf{W}^* \hat{h}_{LS}(1:L,i) \quad (4)$$

$Y(k,t)$ 는 주파수 축에서 k 번째 부반송파 인덱스이며 t 번째 OFDM 데이터 심볼이다. 그리고 $L=7$ 로 설정했다.

이후 SNR을 수신단에서 각 OFDM 데이터 심볼의 null 부반송파에서 파워를 구한 후 평균을 구하는 방식으로 잡음 파워(σ^2)를 계산한 후, SNR(dB)을 15dB를 기준으로 초기 추정 채널 정보를 아래와 같이 설정한다.

$$\sigma^2 = \sum_{k=-32}^{-27} |Y_r(k,i)|^2 + \sum_{k=27}^{31} |Y_r(k,i)|^2 + |Y_r(0,i)|^2 \quad (5)$$

$$\mathbf{H}_r(1:52,i) = \begin{cases} \mathbf{P}_i(1:52,i) \cdots np \leq 10^{-15/10} \\ \widehat{H}_{LS}(1:52,i) \cdots else \end{cases} \quad (6)$$

이후 $\mathbf{P}_i$ 를 가상 기준신호로 정의한다. 그리고 아래와 같이 초기 추정 채널 정보와 가상 기준신호와의 공분산 행렬($\mathbf{R}_{hp}$)과 가상 기준신호의 공분산 행렬($\mathbf{R}_{pp}$)을 계산한다.

$$\mathbf{R}_{hp} = \mathbf{H}_r(1:52,i) * (\mathbf{P}_i(1:52,i))^H \quad (7)$$

$$\mathbf{R}_{pp} = \mathbf{P}_i(1:52,i) * (\mathbf{P}_i(1:52,i))^H \quad (8)$$

그리고 null 부분에서 계산된 잡음 파워가 요소인 대각행렬을 생성하고 이를 가상 기준신호의 공분산 행렬에 더한다. 그리고 구한 행렬의 역행렬과 위에서 구한 공분산 행렬 $\mathbf{R}_{hp}$ 를 행렬 곱하여 MMSE matrix인 $\mathbf{W}_{mmse}$ 를 구성한다.

$$\mathbf{W}_{mmse} = \mathbf{R}_{hp} * ((\mathbf{R}_{pp} + \sigma^2 * \mathbf{I})^{-1}) \quad (9)$$

(여기서 $\mathbf{I}$ 는 52×52 단위행렬이다.)

$$\mathbf{H}_{proposed}(1:52,i) = \mathbf{W}_{mmse} * \mathbf{P}_i(1:52,i) \quad (10)$$

그리고 $\mathbf{W}_{mmse}$ 와 가상 기준신호인 $\mathbf{P}_i$ 를 행렬 곱하여 추정하는 채널인 $\mathbf{H}_{proposed}$ 를 구할 수 있다.

III. 결과

III-1 실험 환경

실험은 다음 아래 표와 같은 환경에서 진행했다.

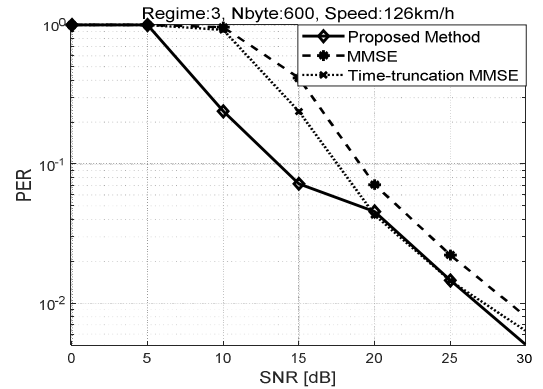
표 1. 시뮬레이션 파라미터

Parameters	Value
Pass band Frequency	5.9 GHz
bandwidth	10 MHz
Sample period	100 ns
SNR(dB scale)	0:5:30(dB)

Modulation/Coded rate	QPSK / 1/2
Speed	126 km/h
frame numbers	10,000
channel environment	Cohda wireless channel mode 3(crossing NLOS)

III-2 결과 그래프 및 분석

아래 그래프는 제안한 기법과 LS 기법으로 구한 채널 정보를 가상 기준신호로 지정하여 이를 공분산 행렬을 이용한 MMSE 기법, 그리고 LS 기법을 이후, time-truncation 기법을 사용하여 얻는 채널 정보를 가상 기준신호로 지정하여 공분산 행렬을 이용한 MMSE 기법을 PER 성능으로 비교하는 그래프이다.



〈그림 1〉 PER 성능 비교 (Crossing NLOS 채널, QPSK, code rate=1/2)

위 그래프에서 보였듯이, 본 논문에서 제안한 기법이 Low SNR 환경에서 초기 추정 채널 정보를 Time-Truncation 기법을 이용한 추정 채널을 사용하는 것이 잡음에 영향을 완화할 수 있기에 기존 time-truncation 기법 기반 MMSE보다 최소 4dB에서 최대 5dB까지의 성능 향상을 볼 수 있으며 SNR이 15dB보다 낮은 환경임에도 불구하고 10^{-1} 이하의 PER의 성능을 가져올 수 있음을 확인할 수 있다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 2020년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임.(No. NRF-2018R1D1A3B07049913)

참 고 문 헌

- [1] M. M. Awad, K. G. Seddik, and A. Elezabi, "Low-complexity semi-blind channel estimation algorithms for vehicular communications using the IEEE 802.11p standard," *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 20, no. 5, pp. 1739-1748, May 2018.
- [2] 최주영, 유강희, 문철, "IEEE 802.11p/WAVE 시스템을 위한 가상 기준신호를 이용한 MMSE 채널 추정 기법," 한국정보기술학회논문지, 제14권, 제6호 pp. 51-57, 2016년 6월.
- [3] 최주영, 문철, 육종관, "IEEE 802.11p를 위한 향상된 가상 기준 신호 기반 MMSE 채널 추정 기법," 한국통신학회논문지, 제 44권, 제12호, pp.2227-2230, 2019년 12월.