ISSN : 1226-7244 (Print)
ISSN : 2288-243X (Online)
논문번호 22-02-19
j.inst.Korean.electr.electron.eng.Vol.26,No.2,287~291,June 2022
https://doi.org/10.7471/ikeee.2022.26.2.287
147

양방향 평균화를 이용한 새로운 Mid-amble 기반 V2X 채널추정 기법에 관한 연구

A Study on Mid-amble based V2X Channel Estimation Techniques Using Bidirectional Averaging

김 주 혁*, 송 창 익*★

Ju-Hyeok Kim*, Changick Song*★

Abstract

In general, as the amplitude and phase information of the physical layer channel impulse response change rapidly in time and frequency according to the high-speed movement of the vehicles in V2X communication systems, it is difficult to accurately estimate these channels at the receiving end. In order to effectively overcome this problem, midamble-based channel estimation methods in which mid-ambles are periodically inserted into a packet have been recently considered. However, as the number of midambles increases, we suffer from the spectral efficiency loss. To relieve such a loss, in this paper, we propose a new bidirectional averaging channel estimation method that combines the existing data pilot-based channel estimation methods and the mid-ambles. Finally, through the simulation results, we demonstrate that the proposed method outperforms the existing mid-amble method in terms of packet error rate with fewer number of mid-ambles.

요 약

일반적으로 V2X 통신은 차량의 고속이동에 따라 물리계층 채널 임펄스 응답의 진폭과 위상정보가 시간 및 주파수에서 빠르게 변화하기 때문에, 수신단에서 이러한 채널을 정확하게 추정하는 것이 매우 어려운 일이다. 이러한 문제를 효과적으로 극복하기 위해 최근 패킷 내부에 주기적으로 미드앰블을 삽입하는 미드앰블 기반 채널추정 방식이 고려되고 있다. 하지만 단순히 미드앰블을 삽입하는 방법은 미드앰블의 수가 증가할수록 성능 이득 대비 주파수 효율이 빠르게 감소하는 문제점을 가지고 있다. 본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해 기존의 데이터 파일럿 기반 채널추정방법과 미드앰블 방법을 결합한 새로운 양방향 평균화 채널추정 기법을 제안한다. 제안하는 기법은 이러한 평균화 과정과 미드앰블의 위치 최적화를 통해 보다 적은 수의 미드앰블로 채널 추정의 정확도를 비약적으로 향상시킬 수 있다. 마지막으로 미드앰블의 수에 따른 패킷오류율 시뮬레이션을 통해 주파수 효율 관점에서 제안하는 기법의 우수성을 입증한다.

Key words : V2X, IEEE802.11p/bd, Mid-amble, Data Pilots, Channel Estimation, Bidirectional Averaging

---

* Department of Electronics Engineering, Korea National University of Transportation
★ Corresponding author
E-mail : c.song@ut.ac.kr, Tel : +82-43-841-5363

※ Acknowledgment
This work was supported by the National Research Foundation of Korea, South Korea through the Korea government under grants NRF-2021R1A2C2012558 and in part by Institute of Information & communications Technology Planning & Evaluation (IITP) grant funded by the Korea government(MSIT) (No.2022-0-01053, Development of Network Load Balancing Techniques Based on Multiple Communication/Computing/Storage Resources)
Manuscript received Jun. 10, 2022; revised Jun. 13, 2022; accepted, Jun. 18, 2022.
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Ⅰ. 서론

최근 자율주행자동차 산업이 급격하게 성장함에 따라 세계 각국의 정부 및 기업들이 자율주행자동차 연구에 막대한 인력과 자본을 투자하고 있다. 이에 따라 차량이 다른 차량 및 인프라와 정보를 교환함으로써 보다 높은 수준의 자율주행을 가능케 하는 V2X(Vehicle to Everything) 통신 기술도 함께 성장하고 있으며 IEEE802.11p/bd, LTE/5G-V2X 등 V2X통신 표준화에 대해서도 심도 깊은 연구들이 활발하게 이루어지고 있다.

일반적으로 V2X 통신은 차량의 고속이동에 따라 물리계층 채널 임펄스 응답의 진폭과 위상정보가 시간 및 주파수에서 빠르게 변화하기 때문에, 수신단에서 이러한 채널정보를 정확하게 측정하는 것이 매우 어렵다. 부정확하게 측정된 채널정보는 수신데이터의 신뢰성을 저하시키기 때문에 V2X시스템 구현에 있어 가장 시급하게 해결해야 할 문제 중 하나로 여겨지고 있다.

주파수축 채널 변화를 추적하기 위해 IEEE802.11p에서는 OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 심볼 당 4개의 파일럿(Pilot) 신호를 정의하고 있지만 시간 축 채널변화를 추적하기 위한 파일럿은 특별히 정의하지 않고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 복원된 데이터 심볼을 다시 파일럿으로 재활용하여 연쇄적으로 채널을 추정하는 DPA(Data Pilot Aided) 채널추정 방식에 대한 연구가 활발하게 이루어져 왔으며, 특히 STA (Spectral Temporal Averaging)[1], CDP(Constructed Data Pilots)[2], 그리고 TRFI(Time domain Reliability test and Frequency domain Interpolation)[3] 기법들이 복잡도 대비 성능이 우수하여 많은 연구자들의 관심을 받았다.

DPA기법은 비록 파일럿 신호의 추가 없이 채널추정의 정확도를 향상시킬 수 있는 좋은 방법이나, 차량의 고속이동에 따라 도플러 주파수 전이가 커지고 패킷의 길이가 길어질수록 오류 전파 효과로 인해 성능이 빠르게 감소하는 문제점을 갖는다. 따라서 이러한 DPA기법은 빠른 이동 환경에서 높은 용량의 데이터 서비스를 제공해야 하는 차세대 자율주행 시스템의 신뢰성 요구사항을 만족하기 어렵다.

이러한 문제를 해결하기 위해 차세대 V2X규격으로 다루어지고 있는 802.11bd에서는 패킷의 시작부분인 프리앰블(pre-amble)의 긴 훈련(long training)신호와 유사하게 데이터 필드(data field)에 블록타입 파일럿을 추가하는 미드앰블(mid-amble)기법을 고려하고 있다[4]. 일반적으로 채널추정의 정확도는 사용되는 파일럿의 개수와 비례하여 증가하지만, 과다한 파일럿의 사용은 주파수 효율을 낮추는 문제점이 있다. 따라서 적은 수의 미드앰블로 성능을 극대화 하는 새로운 채널추정 기술에 대한 연구가 필요하다. 현재까지 미드앰블에 관한 여러 연구결과들이 발표된 바 있지만, 이에 대한 연구는 아직 초기상태에 머물러 있는 상황이다.

본 논문에서는 기존의 DPA기법과 미드앰블 기법을 결합하여 전방 미드앰블(혹은 프리앰블)로부터 순방향으로 DPA채널추정을 수행한 결과와 후방 미드앰블로부터 역방향으로 DPA채널추정을 수행한 결과를 평균화하여 잡음 성분을 완화시킴으로써 성능이득을 극대화 하는 DPA-Midamble 양방향 평균화 채널추정기법을 제안한다. 또한 시뮬레이션 결과를 통해 기존의 채널추정 기법 대비 제안하는 기법이 보다 적은 수의 미드앰블로 보다 우수한 성능을 얻을 수 있음을 입증한다.

Ⅱ. 본론

1. 시스템 모델

본 논문에서는 OFDM을 기반으로 한 단일 안테나 송·수신 환경을 고려하였다. IEEE802.11p/bd 공통 규격을 따라 그림 1과 같이 하나의 패킷은 동기화를 수행하는 짧은 훈련장(short training field), 초기 채널 추정을 수행하는 긴 훈련장(long training field), 제어정보를 포함하는 신호장, 그리고 정보를 전송하는 데이터장(data field)으로 구성된다. 데이터장은 총 N개의 OFDM심볼로 구성되고 각 OFDM 심볼은 index set $\mathbb{S}_T$ = {-32, …, 31}에 해당하는 총 64개의 부반송파를 가진다. 이 때, index set $\mathbb{S}_P$ = {-21, -7, 7, 21}에 해당하는 4개의 부반송파에는 채널 추정과 위상 추적을 위한 파일럿 부반송파가 할당되고 index set $\mathbb{S}_V$ = {-32, …, -27, 0, 27, …, 31}에 해당하는 부반송파는 DC 성분과 guard-band로써 활용되어 사용하지 않는다. 따라서 메시지 정보는 남아있는 index set $\mathbb{S}_D = \mathbb{S}_T \cap (\mathbb{S}_P \cup \mathbb{S}_V)^c$에 해당하는 48개의 부반송파를 통해 전송한다.

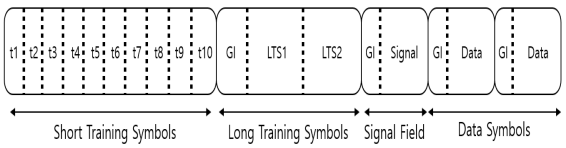

Fig. 1. Packet structure in physical layer.
그림 1. 물리계층 패킷 구조

만약, guard interval이 충분히 길고, 심볼 간 간섭과 부반송파 간 간섭을 무시할 수 있다고 가정한다면, 데이터장의 i번째 OFDM심볼 k번째 부반송파에서 수신한 신호는 다음과 같이 모델링할 수 있다.

$$Y_i(k) = H_i(k)X_i(k) + W_i(k) \quad (1)$$

여기서, $Y_i(k), H_i(k), X_i(k)$, 그리고 $W_i(k)$는 각각 i번째 OFDM 심볼의 k번째 부반송파에 대한 수신신호, 채널 주파수 응답(channel frequency response, CFR), 송신신호, 그리고 가우시안 잡음을 의미하며, $i=0$번째 OFDM심볼은 프리앰블의 긴 훈련장에 해당한다. 본 논문의 목적은 시간과 주파수 영역에서 빠르게 변화하는 채널정보 $H_i(k)$를 부족한 파일럿 및 미드앰블 자원을 이용하여 수신단에서 정확하게 추정하고 이를 통해 수신 데이터의 신뢰성을 높이는 것에 있다.

11p 규격과 달리 본 논문에서는 데이터 필드에 총 $M(<N)$개의 미드앰블을 주기적으로 삽입하여 전송하는 구조를 사용한다. 이 때 미드앰블은 긴 훈련신호의 시퀀스를 그대로 활용하였다. 제안하는 기법의 패킷구조를 시간-주파수 격자로 표현하면 아래 그림 2와 같다.

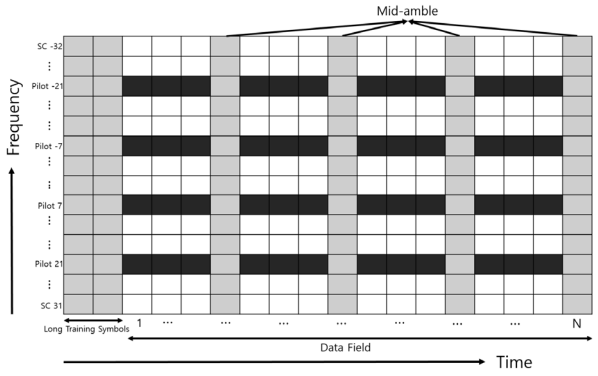

Fig. 2. Packet structure with mid-ambles (M=4).
그림 2. 미드앰블이 삽입된 물리계층 패킷 구조(M=4)

2. 제안하는 알고리즘

이 섹션에서는 DPA채널추정기법과 미드앰블이 결합된 새로운 V2X 채널추정 알고리즘을 제안한다. 제안하는 기법의 핵심 아이디어는 두 미드앰블 사이에서 순방향과 역방향으로 DPA 채널추정을 수행한 후 동일한 시간-주파수에서 추정된 두 개의 서로 다른 채널 추정 값들을 평균을 취하고 이를 통해 잡음 성분을 완화시켜 성능을 극대화 하는 것이다. 이 때 $m=0$번째 미드앰블은 프리앰블의 긴 훈련장에 해당한다.

따라서 기존 기법과 달리 제안하는 기법에서 미드앰블의 위치는 평균화 이득의 극대화를 위해 데이터 필드의 제일 마지막 OFDM심볼에 위치하도록 한다. 이후 미드앰블의 개수가 늘어나면 그림 2와 같이 데이터 필드 내에서 균등하게 삽입할 수 있다.

제안하는 채널추정기법의 상세 과정은 다음과 같다. 먼저 프리앰블 단에서 수신한 두 개의 긴 훈련신호 $Y_{LTS1}(k)$와 $Y_{LTS2}(k)$를 이용하여 아래 수식 (1)과 같이 LS(Least square)방식으로 초기 채널추정 값 $H_0(k)$를 얻는다.

$$\widehat{H}_0(k) = \frac{Y_{LTS1}(k) + Y_{LTS2}(k)}{2X_0(k)},\ k \in \mathbb{S}_D \cup \mathbb{S}_P \quad (1)$$

이와 동시에 m번째 미드앰블이 삽입된 i번째 OFDM 심볼에서는 수신신호 $Y_i^{(m)}(k)$와 송신신호 $X_i^{(m)}(k)$를 이용하여 아래와 같이 채널을 추정한다.

$$\widehat{H}_i^{(m)}(k) = \frac{Y_i^{(m)}(k)}{X_i^{(m)}(k)},\ k \in \mathbb{S}_D \cup \mathbb{S}_P \quad (2)$$

이후 m번째 미드앰블에서 추정된 채널을 기준으로 $m+1$번째 미드앰블까지 시간 축 순방향으로 DPA채널추정을 수행하고, 이와 동시에 $m+1$번째 미드앰블에서 추정된 채널을 기준으로 시간 축 역방향으로 m번째 미드앰블까지 DPA 채널 추정을 수행한 이후 그 두 결과를 평균을 취하여 최종적으로 채널 추정을 완료한다.

순방향 DPA 채널추정은 먼저 아래와 같이 이전 OFDM 심볼에서 추정된 채널 값을 이용하여 현재 수신신호를 등화한다.

$$\widehat{T}_i(k) = \frac{Y_i(k)}{\widehat{H}_{i-1}^{forward}(k)} \quad (3)$$

이후 $\widehat{T}_i(k)$는 심볼 디매핑 과정 $Q(\bullet)$을 통하여 송신신호 $\widehat{X}_i(k) = Q(\widehat{T}_i(k))$를 추정하게 되고, 다시 추정된 송신 심볼을 파일럿으로 이용하여 수신신호 $Y_i(k)$를 등화하여 채널을 추정한다. 이렇게 추정된 채널을 수식으로 나타내면 아래와 같다.

$$\widetilde{H}_i(k) = \frac{Y_i(k)}{Q\left(\frac{Y_i(k)}{\widehat{H}_{i-1}^{forward}(k)}\right)},\ \text{for}\ \ k \in \mathbb{S}_D \quad (4)$$

이후 STA, CDP, TRFI 등 기존 오류보정기법들을 (4)에 적용하게 되면 최종적으로 순방향 채널추정 값

$\hat{H}_i^{forward}(k)$를 얻는다.

반대로 역방향 DPA채널 추정은

$$\tilde{H}_i(k) = \frac{Y_i(k)}{Q\left(\frac{Y_i(k)}{\hat{H}_{i+1}^{backward}(k)}\right)}, \quad \text{for} \quad k \in \mathbb{S}_D \tag{5}$$

와 같이 다음 OFDM심볼 채널정보로부터 이전 OFDM 심볼의 채널을 연쇄적으로 추정한다. 이 때 순방향과 동일한 오류보정기법을 (5)에 적용하여 $\hat{H}_i^{backward}(k)$를 얻는다. 최종적으로 순방향과 역방향 두 결과를 평균하여 아래와 같이 i번째 부반송파와 k번째 부반송파의 채널 값을 추정한다.

$$\hat{H}_i(k) = \frac{\hat{H}_i^{forward}(k) + \hat{H}_i^{backward}(k)}{2} \tag{6}$$

기존 기법 대비 제안하는 기법의 경우 동일 심볼에 대해서 두 번의 DPA과정과 평균화 연산이 필요하기 때문에 비록 수신 복잡도는 증가할 수 있지만, 다음 섹션에서 확인할 수 있듯이 동일한 성능지표에서 요구되는 미드앰블 수를 최소화 할 수 있다는 측면에서 우수성을 갖는다.

3. 시뮬레이션 결과

Table 1. System parameters.

표 1. 시스템 파라미터

Parameters	Value
Bandwidth	10 MHz
Subcarrier Spacing	156.25 KHz
Modulation	QPSK
Code rate	1/2
Guard interval	1.6μs
Symbol length	6.4μs
# OFDM symbols in data field (N)	100, 102, 104
# mid-ambles (M)	0, 2, 4
Mid-amble location	{}, {51,102}, {26,52,78,104}
DPA scheme	TRFI

본 논문에서는 시뮬레이션을 위해 Cohda Wireless채널모델 중 Crossing NLoS(Non Line Of Sight)와 Highway NLoS 모델을 가정하였다[5]. 이 두 채널환경은 시간과 주파수 축에서 모두 채널이 빠르게 변하는 이중 선택적(doubly selective) 채널 특성을 갖기 때문에 LoS 환경 대비 보다 도전적이다. 표 1은 본 논문의 시뮬레이션을 위해 사용한 시스템 파라미터를 보여준다. 미드앰블을 제외한 파라미터들은 기존 11p규격을 따랐으며 DPA채널오류 보정을 위해 본 논문에서는 높은 SNR에서 가장 좋은 성능을 보이는 TRFI기법을 적용하였으나, STA, CDP와 같은 다른 오류보정 기법들도 쉽게 적용할 수 있다.

그림 3과 4는 각각 Crossing 환경과 Highway NLOS 환경에서 기존의 미드앰블 채널추정 기법과 제안하는 기법을 적용시킨 성능 결과를 보여준다. 서로 다른 두 환경 모두에서 제안하는 미드앰블 기법이 기존 기술 대비 보다 적은 미드앰블 수로 보다 우수한 성능을 얻을 수 있음을 확인할 수 있다. 비록 본 논문에서는 보이지 않았지만 LoS환경에서는 NLoS환경대비 주파수축 채널 변화가 적기 때문에 주파수축에서 평균화 과정을 수행하는 STA 기법이 본 논문에서 적용한 TRFI대비 우수한 성능을 보인다.

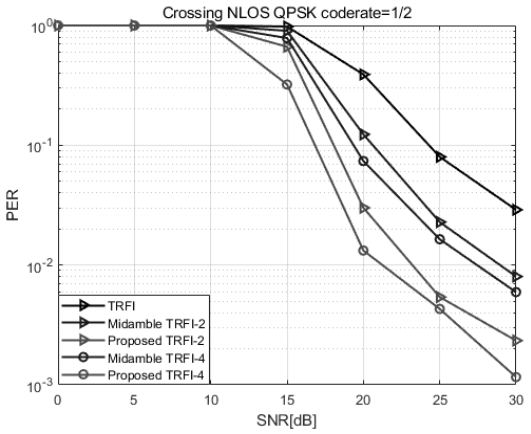

Fig. 3. Performance results of the Crossing channel environment.

그림 3. Crossing 채널환경의 성능 결과

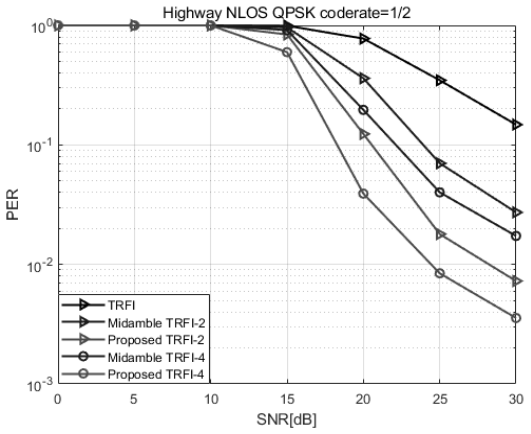

Fig. 4. Performance results of the Highway NLOS channel environment.

그림 4. Highway NLOS 채널환경의 성능결과

그림 5는 Crossing 환경에서의 미드앰블 수에 따른 PER 성능을 나타낸다. 제안하는 채널추정 기법이 동일한 PER성능 지표에서 요구되는 미드앰블 수를 비약적으로 감소시키고 있음을 확인할 수 있다. 따라서 제안하는 기법은 향후 미드앰블을 활용하는 V2X시스템 구현 시 주파수 효율 감소 문제를 개선하는데 많은 도움을 줄 것으로 기대할 수 있다.

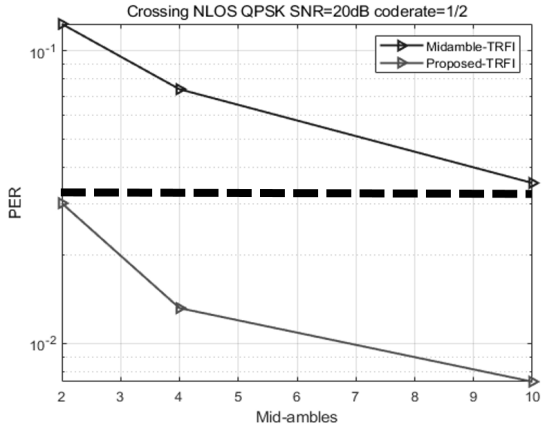

Fig. 5. PER performance according to the number of mid-ambles.
그림 5. 미드앰블 수에 따른 PER 성능

Ⅲ. 결론

본 논문에서는 기존의 미드앰블 기반의 채널추정 기법이 가지는 주파수 효율 감소 문제를 보완하기 위하여 최소한의 미드앰블로 채널추정 정확도를 극대화 할 수 있는 DPA와 미드앰블이 결합된 양방향 평균화 채널추정 기법을 제안하였다. 또한 시뮬레이션 결과를 통하여 제안하는 기법이 기존기법 대비 요구되는 미드앰블의 수를 비약적으로 감소시키고 주파수 효율을 극대화 할 수 있음을 입증하였다.

References

[1] J. A. Fernandez, K. Borries, L. Cheng, B. V. K. Vijaya Kumar, D. D. Stancil, and F. Bai, "Performance of the 802.11p Physical Layer in Vehicle-to-Vehicle Environments," *IEEE Trans. Veh. Tech.*, Vol.61, No.1, pp.4-13, 2012.
DOI: 10.1109/TVT.2011.2164428
[2] Z. Zhao, X. Cheng, M. Wen, C. X. Wang, and B. Jiao, "Channel estimation schemes for IEEE 802.11p standard," *IEEE Intelligent Trans. System Mag.*, Vol.5, No.4, pp.38-49, 2013.
DOI: 10.1109/MITS.2013.2270032
[3] Y. K. Kim, J. M. Oh, Y. H. Shin, and C. Mun, "Time and frequency domain channel estimation scheme for IEEE 802.11p," *in proc.IEEE ITSC'14*, pp.1085-1090, 2014.
DOI: 10.1109/ITSC.2014.6957832
[4]G. Naik, B. Choudhury, and J. M. Park, "IEEE 802.11bd&5G NR V2X: Evolution of Radio Access Technologies for V2X Communications," *IEEE Access*, Vol.7, pp.70169-70184, 2019.
[5] M. Kahn, "IEEE802.11 Regulatory SC DSRC Coexistence Tiger Team - V2V Radio Channel Models," 2014.

BIOGRAPHY

Ju-Hyeok Kim (Member)

2021 : BS degree in Information and Communication Engineering, Korea National University of Transportation.

Changick Song (Member)

2007 : BS degree in Electrical Engineering, Korea University.
2012 : PhD degree in Electrical Engineering, Korea University.
2013~2014 : Postdoctoral Research Associate, Imperial College London.
2014~2018 : Assistant Professor, Korea National University of Transportation
2018~present : Associate Professor, Korea National University of Transportation