

적은 파일럿 심벌수를 갖는 IEEE 802.11p/OFDM System에서 TDA-WSUM 기반 채널추정에 관한 연구

김대영*¹, 허성철*², 왕한호**³, 고균병***⁴

A Study on TDA-WSUM based Channel Estimation in IEEE 802.11p/OFDM System with a Small Number of Pilot Symbols

Dae-Yeong Kim*¹, Seong-Cheal Heo*², Hanho Wang**³, and Kyunbyoung Ko***⁴

본 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임
(No. NRF-2020R1A2C1005260, NRF-2021R1A2C1014063)

요 약

본 논문은 IEEE 802.11p/OFDM 시스템에서, 기존의 채널추정 기법보다 향상된 성능의 TDA-WSUM 채널추정 기법을 제안한다. 제안된 기법은 기존 CDP 기반 WSUM 채널추정 기법에 TDA 방식을 적용한 개선된 TDA-WSUM 구조를 갖는다. 제안된 기법의 성능 검증을 위하여 Cohda Wireless 사에서 제시하는 Rural 및 Highway LOS 채널 환경에서 QPSK와 16QAM 변조 기법에 대한 모의실험을 수행하였다. 모의실험을 통하여 다양한 기존 기법들과 BER 및 PER 성능을 비교하였다. 특히, 고속 시변 채널인 Highway LOS 환경 및 16QAM 변조 방식에서 PER=0.01 기준으로 제안된 TDA-WSUM 기법은 CDP, WSUM, WSUM-TDA 기법 대비 각각 약 10.0dB, 3.2dB, 1.4dB의 SNR 이득을 갖는 것을 확인하였다.

Abstract

This paper proposes an enhanced TDA-WSUM channel estimation method with improved performance compared to existing methods in the IEEE 802.11p/OFDM system. The proposed method has an improved TDA-WSUM structure by applying the TDA scheme to the existing CDP based WSUM channel estimation method. To verify the performance of the proposed method, simulations were performed for QPSK and 16QAM modulation in the Rural and Highway LOS channel environments presented by Cohda Wireless. Through simulation, the BER and PER performances of various existing schemes were compared. In particular, at PER=0.01 under a fast time-varying Highway LOS channel environment and 16QAM, it was confirmed that the proposed TDA-WSUM method has SNR gains of about 10.0dB, 3.2dB, and 1.4dB, respectively, compared to CDP, WSUM, and WSUM-TDA schemes.

Keywords

IEEE 802.11p, OFDM, TDA-WSUM, CDP

* 한국교통대학교 전자공학과 학사과정

- ORCID¹: <https://orcid.org/0009-0007-0398-1325>

- ORCID²: <https://orcid.org/0009-0003-2009-1894>

** 상명대학교 스마트정보통신공학과 교수

- ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0672-7775>

*** 한국교통대학교 전자공학과 교수(교신저자)

- ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0192-0269>

· Received: Jun. 14, 2023, Revised: Jul. 11, 2023, Accepted: Jul. 14, 2023

· Corresponding Author: Kyunbyoung Ko

Dept. of Electronics Engineering, Korea National University of Transportation

Tel.: +82-43-841-5463, Email: kbko@ut.ac.kr

1. 서 론

최근 자율주행 자동차 기술의 발달로 사회적으로 관심이 몰리는 추세이다. 자율주행 자동차는 사람의 운전 오류를 줄이고 효율적인 교통 시스템을 구축하기 위해 개발되었다. 이러한 자율주행 차량은 교통 안전성을 향상시킬 수 있고, 도로 혼잡을 완화하며, 에너지 소비를 줄일 수 있다[1]-[12]. 또한, 노인이나 장애인과 같은 이동에 어려움을 겪는 사람들에게 도움을 줄 수 있다. 자율주행 자동차는 SAE(Society of Automotive Engineers)에서 제정한 자율주행 수준에 따라 정의된다[9]. 현재는 조건부 자율주행 수준으로, 일부 상황에서 운전자의 개입이 필요하지 않다. 하지만 특정 조건에서만 자율주행이 가능하며, 운전자가 상황 변화에 따라 제어를 재확인할 수 있어야 한다. 예를 들어, 고속도로 주행 중에는 자율주행이 가능하고, 운전자는 일부 시간 동안 운전을 하지 않아도 되나, 복잡한 도로 상황에서는 운전자가 직접 운전해야 하는 것이다. 완전한 자율주행으로 나아가기 위해서는 더욱 발전된 여러 기술과 요소들이 필요하다[9]. 그중 무선 통신 시스템 기술 측면에서는 사물인터넷 네트워크망에서의 V2V(Vehicle-to-Vehicle) 기술과 V2I(Vehicle to Infrastructure) 통신 기술 등이 미래 스마트 자동차 및 스마트 교통의 핵심 기술로 자리 잡아가고 있다. IEEE 802.11 표준에 차량 이동 환경에서의 무선 액세스(WAVE, Wireless Access in Vehicular Environments)를 추가한 IEEE 802.11p를 기반으로, 고속 시변 채널 환경에서 원활한 주행과 사고율 감소를 위한 차량 간 통신 서비스 제공을 위한 채널 추정 기법의 성능 향상을 위한 연구들이 지속적으로 진행되고 있다[2]-[12].

그러나 채널추정 기술은 실제 도심환경에서 도로 환경, 인접한 차량, 장애물 등과 같은 주변 요소들에 의해 성능의 영향을 많이 받으며, 특히 주행속도에 따라 민감하게 변화한다. 이로 인하여 기존의 채널추정 기법들이 실제 도심 환경에서 심각한 성능 열화를 보인다. 따라서 주행 중인 차량에게 교통정보, 충돌 가능성 등의 정보를 안정적으로 제공하기 위해서는 환경에 따라 급격히 변하는 채널 값을 정확히 추정하여 신뢰성이 있는 데이터를 송수신할

수 있는 기법이 요구된다[1][9].

이에 맞추어 64-point FFT(Fast Fourier Transform)에 기반한 IEEE 802.11p/OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 시스템은 OFDM 심벌당 4개의 파일럿 심벌만을 갖기에 고속 시변 채널 환경에서 채널추정 성능이 저하되는 문제점이 있으며 이를 해결하기 위한 다양한 채널추정 기법들이 계속 연구되고 있다[2]-[12]. 그중 LS(Least Square)[5] 채널추정 기법, STA(Spectral Temporal Averaging)[5] 채널추정 기법, CDP(Constructing Data Pilot)[5] 채널추정 기법, WSUM(Weighted Sum using Update Matrix)[10] 채널추정 기법이 제안되었으나 자율주행 자동차 서비스에서 요구하는 PER(Packet Error Rate) 성능을 제공하지 못하고 있다. 기존 채널추정 기법들의 연구 방향은 다음과 같다. 낮은 변조지수와 저속 환경에서 비교적 안정적으로 동작하는 STA[5] 기법이 높은 변조지수 및 고속 환경에서 갖는 단점을 극복하기 위하여 CDP[5] 기법이 제안되었다. 또한 높은 변조지수에서 CDP 방식보다 우수한 성능을 나타내는 기법으로 TRFI(Time Reliability test Frequency Interpolation)[6] 기법이 제안되었다. 또한 이러한 TRFI 방식의 단점을 극복할 수 있는 방식으로 WSUM[10] 기법이 제안되었지만 낮은 SNR(Signal to Noise Ratio)에서 STA 채널 추정 기법만큼의 성능을 제공하지 못한다[10]. 디코딩 정보[9] 혹은 MMSE(Minimum Mean Square Error) 기법[11][12]에 기반한 기법들에 관한 연구들도 진행되고 있으나 매 OFDM 심벌마다 채널 상관행렬의 역행렬을 수행하는 등의 높은 복잡도 문제가 남아있는 상황이다[11][12].

본 논문에서는 기존의 업데이트 매트릭스를 사용하여 주파수축에서 선택적으로 평균을 취하는 WSUM 채널추정 기법의 앞단에 시간 영역 평균화(TDA, Time Domain Averaging) 기법을 활용하는 채널추정 기법을 제안하고자 한다.

본 논문의 구성을 다음과 같다. 2장은 관련 연구로 기존의 채널추정 기법에 관한 설명을 나타내고 있다. 3장에서는 본 논문에서 제안하는 새로운 채널추정 기법에 대하여 설명한다. 4장에서는 모의실험에서 사용된 파라미터를 확인하고 기존의 채널추정 기법 대비 제안하는 채널추정 기법의 성능을 비교

검증한다. 마지막으로 5장에서는 결론에 대해 기술하고 본 연구가 갖는 한계점 및 향후 연구에 대하여 언급한다.

II. 관련 연구

본 장에서는 기존의 채널 추정기법들을 비교 설명한다. 이를 위해 OFDM에 기반을 둔 IEEE802.11p 표준의 물리계층 및 수신신호 모델을 먼저 기술한다. IEEE802.11p 표준의 FFT 및 IFFT(Inverse-FFT) 크기는 $N=64$ 이고 한 패킷당 OFDM 심볼수는 N_{data} 이다. 한 OFDM 심볼은 4개의 파일럿 심볼과 12개의 가상(null) 부반송파를 갖는다. 본 논문에서는 파일럿 부반송파의 위치, 가상 부반송파의 위치 및 사용되는 52개 부반송파의 위치를 나타내는 집합을 각각 다음과 같이 정의한다.

$$\begin{aligned} S_p &= \{-21, -7, 7, 21\} \\ S_v &= \{-32, \dots, -27, 0, 27, \dots, 31\} \\ S_u &= \{-26, -25, \dots, -1, 1, \dots, 25, 26\} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 데이터 부반송파의 위치를 나타내는 집합을 S_d 라 하면 $S_u = S_p \cup S_d$ 를 만족한다.

2.1 LS(Least Square) 채널추정 기법

LS 채널추정 기법은 수신단에서 전송받은 수신 신호와 사전에 알고 있는 룭 트레이닝 심볼을 이용하여 채널을 추정하는 기법으로 가장 간단한 채널 추정 기법으로 시변 채널에 적합한 기법이다[5]. 또한 STA[5], CDP[5], TRFI 기법[6]에 있어서 초기 채널 추정값을 구하는데 사용된다. 각 패킷의 시작 부분에서 전송되는 룭 트레이닝 심볼로부터 채널 추정값을 구하고, 이를 이용하여 각 패킷에 속해있는 데이터 심볼을 복원한다.

수신된 두 룭 트레이닝 심볼 신호를 FFT하여 k 번째 부반송파에 해당하는 주파수 영역 수신 심볼을 $Y_{T,1}(k)$ 와 $Y_{T,2}(k)$ 로 정의한다. 따라서, 사전에 약속된 k 번째 부반송파의 트레이닝 심볼 $X_T(k)$ 를 이용하여 k 번째 부반송파의 LS 채널 추정값은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$H_{LS}(k) = \frac{Y_{T,1}(k) + Y_{T,2}(k)}{2X(k)}, \quad k \in S_u \quad (2)$$

위와 같이 얻어진 채널 추정값 $H_{LS}(k)$ 는 이후 $i \in \{1, 2, \dots, N_{\text{data}}\}$ 번째 데이터 심볼의 k 번째 부반송파 데이터 심볼 $Y_i(k)$ 를 등화하는데 사용된다. LS 채널추정 기법은 가장 간단한 채널추정 기법이지만 패킷 초기에 추정된 채널 값인 $H_{LS}(k)$ 로 패킷 내의 모든 심볼을 복원하기 때문에 패킷 후반부에 위치한 데이터 심볼 복원 과정에서 실제 채널과 추정된 채널 값과의 오차가 커지는 단점이 있다. 따라서 채널의 시변 특성이 강한 실제 환경에서는 성능이 저하되는 단점이 있다.

2.2 STA 채널추정 기법

차량이 고속으로 주행할 때와 같은 시변 채널에 적용하기 위한 추정기법으로 STA 기법이 제안되었다[5]. 이 기법은 주파수 영역과 시간 영역에서 연속적으로 채널 추정값을 누적 업데이트하는 채널추정 기법이다. 다음과 같이 i 번째 심볼의 k 번째 부반송파 데이터 심볼인 $Y_i(k)$ 을 $(i-1)$ 번째 채널 추정값인 $H_{i-1}(k)$ 를 이용하여 등화한다.

$$\hat{S}(k) = Y_i(k)/H_{i-1}(k), \quad k \in S_d \quad (3)$$

여기서 $i=1$ 일 경우 식 (2)의 LS 기법에 의한 초기 채널 추정값을 $H_0(k) = H_{LS}(k)$ 로 사용한다.

데이터 파일럿 구성(Constructing Data Pilot): 식 (3)의 등화된 데이터 심볼 $\hat{S}(k)$ 는 디매핑 후 변조 심볼 $\hat{X}_i(k)$ 로 결정한다.

$$\hat{X}_i(k) = \begin{cases} D(\hat{S}(k)), & k \in S_d \\ X_i^p(k), & k \in S_p \end{cases} \quad (4)$$

여기서 $D(r)$ 은 등화된 신호 r 을 해당하는 변조 방식으로 디매핑하여 변조 심볼을 생성하는 함수이며, $X_i^p(k)$ 는 $k \in S_p$ 인 i 번째 OFDM 신호의 k 번째 반송파의 파일럿 심볼이다.

LS(Least Square) 기법: 식 (4)의 디매핑된 데이터 파일럿 $\hat{X}_i(k)$ 를 이용하여 수신된 데이터 심볼 $Y_i(k)$ 를 등화 함으로써 i 번째 심볼에 대한 초기 채널 추정값 $\hat{H}_i(k)$ 를 다음과 같이 구한다.

$$\hat{H}_i(k) = Y_i(k)/\hat{X}_i(k), \quad k \in S_u \quad (5)$$

주파수 영역 평균화(Frequency domain averaging): 식 (4)의 $\hat{S}_i(k)$ 를 디매핑 하는 과정에서 디매핑 오류(Demapping error)가 발생하여 초기 채널 추정값 $\hat{H}_i(k)$ 에 오차가 발생할 수 있다. 따라서 잡음에 의한 채널추정 오류를 완화시키기 위해 주파수 영역과 시간 영역에서 추정된 채널값의 평균을 취할 수 있다. 주파수 영역에서의 채널 평균값 $H_i^F(k)$ 은 다음과 같다.

$$H_i^F(k) = \sum_{\lambda=-\beta}^{\beta} \omega_{\lambda} \hat{H}_i(k+\lambda), \quad k \in S_u \quad (6)$$

여기서 ω_{λ} 는 단위 합이 가중치 계수를 나타내며, $\omega_{\lambda} = 1/(2\beta+1)$ 이다. 이때 $2\beta+1$ 은 평균 연산을 수행하는 부반송파의 수를 나타낸다.

시간 영역 평균화(Time domain equalization): 다음으로 시간 영역 채널 평균화 과정을 통하여 STA 기법의 최종 채널 추정값을 다음과 같이 얻는다.

$$H_i(k) = \frac{\alpha-1}{\alpha} H_{i-1}^F(k) + \frac{1}{\alpha} H_i^F(k), \quad k \in S_u \quad (7)$$

여기서 α 는 시간 영역의 시간영역의 평균 가중치를 의미하며 $(i-1)$ 번째 채널 추정값과 i 번째 초기 채널 추정값에 대한 가중합을 의미한다. 본 논문의 모의실험 성능 비교 분석에서는 [5]에서 제안된 $\alpha = \beta = 2$ 를 사용하였다. 식 (3)-(7)의 과정은 $i \in \{1, 2, \dots, N_{\text{data}}\}$ 에 대하여 순차적으로 적용된다. STA 기법은 차량이 고속으로 주행하였을 때의 시변 채널에 적용하기 위한 채널 추정기법이다. 따라서 지속적으로 채널 추정값이 업데이트되고, 주파수 영역과 시간 영역에서의 평균화 과정을 통하여 디매핑 오차에 의한 채널 추정 오류를 감소 시킨다. 그러나

어느 한 부분의 데이터 부반송파의 채널 추정값에 오류가 발생한 경우 시간 및 주파수 영역에서의 평균화 과정에서 인접 부반송파에 영향을 미치므로 오류가 전파되는 단점이 있다. 이러한 단점을 극복할 수 있는 기법으로 WSUM 기법에 제안되었다[10].

2.3 WSUM 채널추정 기법

WSUM 기법은 업데이트 매트릭스를 이용한 종합 채널추정 기법이다[10]. 우선 STA 기법의 식 (3)-(5)의 과정을 수행한다. 그리고 시간 영역에서의 연속된 두 OFDM 심볼의 높은 채널 상관 특성을 이용하는 CDP 기법의 신뢰도 테스트를 위해 다음의 연산을 수행한다.

등화와 디매핑(Equalization and demapping): 식 (5)의 초기 채널 추정값 $\hat{H}_i(k)$ 와 이전 $(i-1)$ 번째 수신 심볼의 채널 추정값 $H_{i-1}(k)$ 을 이용하여 이전 수신신호 $Y_{i-1}(k)$ 를 다음과 같이 등화하고 디매핑한다.

$$\hat{X}'(k) = \begin{cases} D(Y_{i-1}(k)/\hat{H}_i(k)), & k \in S_d \\ X_{i-1}^p(k), & k \in S_p \end{cases} \quad (8-1)$$

$$\hat{X}''(k) = \begin{cases} D(Y_{i-1}(k)/H_{i-1}(k)), & k \in S_d \\ X_{i-1}^p(k), & k \in S_p \end{cases} \quad (8-2)$$

신뢰도 테스트(Reliability test): 시간과 영역에서 인접한 두 개의 부반송파가 갖는 높은 채널 상관 특성을 갖는다. 따라서 초기 채널 추정값 $\hat{H}_i(k)$ 가 정확하게 추정되었다면 이 값과 이전 $(i-1)$ 번째 심볼의 최종 채널 추정값 $H_{i-1}(k)$ 는 유사할 것이다. 이러한 특성을 이용해 업데이트 매트릭스 $M_{up,i}(k)$ 를 다음으로 설정한다.

$$M_{up,i}(k) = \begin{cases} 1, & \text{if } k \in S_p \cup (\hat{X}'(k) \equiv \hat{X}''(k)) \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (9)$$

$k \in S_p$ 혹은 $\hat{X}'(k) \equiv \hat{X}''(k)$ 의 경우, 초기 채널 추정값 $\hat{H}_i(k)$ 를 상대적으로 신뢰할만한 채널 추정값이라고 판단하고 업데이트 매트릭스값은 $M_{up,i}(k) = 1$ 로 설정한다.

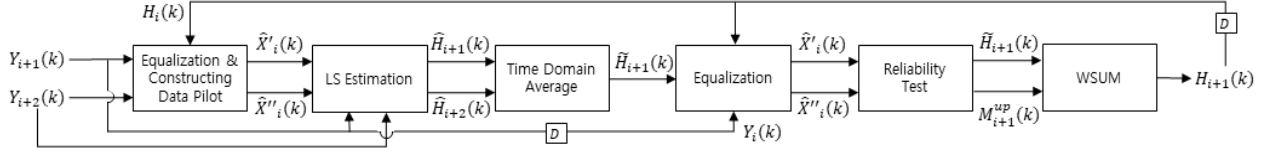


그림 1. 제안된 TDA-WSUM 채널 추정기 구조도

Fig. 1. Channel estimator structure for TDA-WSUM

반면에 $\hat{X}'(k) \neq \hat{X}''(k)$ 인 경우, 초기 채널 추정값 $\hat{H}_i(k)$ 의 신뢰도가 이전 채널 추정값보다 상대적으로 낮다고 판단하여 업데이트 매트릭스 값은 $M_{up,i}(k)=0$ 로 설정한다.

주파수 영역에서 인접한 두 개의 부반송파가 갖는 채널 상관 특성을 이용하여 최종 채널 추정값 $H_i(k)$ 를 가중합 과정을 통하여 다음으로 얻는다.

$$H_i(k) = \begin{cases} \frac{\sum_{\lambda=-\beta}^{\beta} \hat{H}_i(k+\lambda) M_{up,i}(k+\lambda) \omega_{\lambda}}{\sum_{\lambda=-\beta}^{\beta} M_{up,i}(k+\lambda) \omega_{\lambda}} & \text{if } A \geq N \\ H_{i-1}(k) & \text{else} \end{cases} \quad (10)$$

여기서 $A = \sum_{\lambda=-\beta}^{\beta} M_{up,i}(k+\lambda)$ 이다. 본 논문에서는 $w_{\lambda} = [w_{-1}, w_0, w_{-1}] = [0.5, 1.0, 0.5]$ 와 $\beta = 1$, $N = 2$ 을 사용한다[10]. 신뢰도가 높은 채널 추정값을 얻기 위하여 인접한 세 개의 부반송파에 윈도우 구간을 설정하고 윈도우 구간 내에 특정조건 ($A \geq N$)을 만족할 경우, 초기 채널 추정값인 $\hat{H}_i(k)$ 에 가중합을 취하여 최종 채널 추정값 $H_i(k)$ 를 얻는다. 반면에, $A \geq N$ 를 만족하지 못하는 경우, 윈도우 구간 내에 신뢰할만한 채널 추정값이 상대적으로 적다고 판단하여 이전 채널 추정값 $H_{i-1}(k)$ 를 최종 채널 추정값으로 결정한다. 그리고, 식 (8)~(10)의 과정은 $i \in \{1, 2, \dots, N_{\text{data}}\}$ 에 대하여 순차적으로 적용된다. 또한, 식 (8)에서 $i = 1$ 일 때, $Y_{-1}(k) = Y_{T,2}(k)$ 를 사용하며 $H_0(k)$ 는 식 (2)의 $H_{LS}(k)$ 에 대하여 가중합을 적용하여 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$H_0(k) = \frac{\sum_{\lambda=-\beta}^{\beta} H_{LS}(k+\lambda) \omega_{\lambda}}{\sum_{\lambda=-\beta}^{\beta} \omega_{\lambda}} \quad (11)$$

III. 제안하는 채널추정 기법 (TDA-WSUM)

본 장에서는 제안하는 TDA-WSUM 채널추정 기법에 대하여 설명한다. 그림 1은 제안된 TDA-WSUM 채널 추정기의 구조도를 나타낸다. 그림과 본 장에서는 편의상 $(i+1)$ 번째 수신신호를 기준으로 알고리즘을 제시한다.

3.1 등화 및 디매핑

이전 i 번째 단계에서 구한 채널 추정값 $H_i(k)$ 를 이용하여 $(i+1)$ 번째 및 $(i+2)$ 번째 수신 OFDM 신호의 k 번째 부반송파 데이터 심볼 $Y_{i+1}(k)$ 및 $Y_{i+2}(k)$ 를 각각 등화하고 디매핑 과정을 수행한다.

$$\hat{X}'(k) = \begin{cases} D(Y_{i+1}(k)/H_i(k)), & k \in S_d \\ X_{i+1}^p(k), & k \in S_p \end{cases} \quad (12)$$

$$\hat{X}''(k) = \begin{cases} D(Y_{i+2}(k)/H_i(k)), & k \in S_d \\ X_{i+2}^p(k), & k \in S_p \end{cases} \quad (13)$$

3.2 순시 채널 추정값: $\hat{H}_{i+1}(k)$ 와 $\hat{H}_{i+2}(k)$

디매핑 된 데이터 파일럿 심볼 $\hat{X}'(k)$ 및 $\hat{X}''(k)$ 를 이용하여 $(i+1)$ 번째와 $(i+2)$ 번째 수신 심볼 $Y_{i+1}(k)$ 및 $Y_{i+2}(k)$ 를 등화함으로써 순시 채널 추정값 $\hat{H}_{i+1}(k)$ 및 $\hat{H}_{i+2}(k)$ 를 구한다.

$$\hat{H}_{i+1}(k) = \frac{Y_{i+1}(k)}{\hat{X}'(k)}, \quad k \in S_u \quad (14)$$

$$\hat{H}_{i+2}(k) = \frac{Y_{i+2}(k)}{\hat{X}''(k)}, \quad k \in S_u \quad (15)$$

3.2 TDA 기반 초기 채널 추정값: $\tilde{H}_{i+1}(k)$

순시 채널 추정값 $\hat{H}_{i+1}(k)$ 및 $\hat{H}_{i+2}(k)$ 에 대해 TDA 기법을 적용하여 다음과 같이 초기 채널 추정값을 얻는다.

$$\tilde{H}_{i+1}(k) \Big|_{k \in S_u} = \begin{cases} \frac{\hat{H}_{i+1}(k) + \hat{H}_{i+2}(k)}{2}, & i = 0, 1, \dots, N_{\text{data}} - 2 \\ \hat{H}_{i+1}(k), & i = N_{\text{data}} - 1 \end{cases} \quad (16)$$

단, $i+1 = N_{\text{data}}$ 인 경우 TDA를 적용할 수 없으므로 $\tilde{H}_{i+1}(k) \Big|_{i+1=N_{\text{data}}} = \hat{H}_{N_{\text{data}}}(k)$ 으로 한다.

3.3 신뢰도 테스트

$(i+1)$ 번째 초기 채널 추정값 $\tilde{H}_{i+1}(k)$ 와 i 번째 최종 채널 추정값 $H_i(k)$ 을 이용하여 다음과 같이 i 번째 수신 심벌 $Y_i(k)$ 을 등화 및 디맵핑한다.

$$\hat{X}'(k) = \begin{cases} D(Y_i(k)/\tilde{H}_{i+1}(k)), & k \in S_d \\ X_i^p(k), & k \in S_p \end{cases} \quad (17)$$

$$\hat{X}''(k) = \begin{cases} D(Y_i(k)/H_i(k)), & k \in S_d \\ X_i^p(k), & k \in S_p \end{cases} \quad (18)$$

초기 채널 추정값 $\tilde{H}_{i+1}(k)$ 가 정확하게 추정되었다면 시간과 주파수 영역에서 인접한 두 개의 부반송파가 갖는 높은 채널 상관 특성에 따라 $\tilde{H}_{i+1}(k)$ 와 $H_i(k)$ 는 유사할 것이다. 이러한 특성을 이용해 초기 채널 추정값의 업데이트 유무를 표기하는 업데이트 매트릭스 $M_{i+1}^{up}(k)$ 를 다음과 같이 구한다.

$$M_{i+1}^{up}(k) = \begin{cases} 1, & \text{if } k \in S_p \cup (\hat{X}'(k) \equiv \hat{X}''(k)) \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (19)$$

3.4 WSUM

주파수 영역에서 인접한 두 개의 부반송파가 갖

는 채널 상관 특성을 이용하여 최종 채널 추정값인 $H_{i+1}(k)$ 를 다음과 같이 가중합 과정을 통하여 결정한다.

$$H_{i+1}(k) = \begin{cases} \frac{\sum_{\lambda=-\beta}^{\beta} \tilde{H}_{i+1}(k+\lambda) M_{i+1}^{up}(k+\lambda) \omega_{\lambda}}{\sum_{\lambda=-\beta}^{\beta} M_{i+1}^{up}(k+\lambda) \omega_{\lambda}} & \text{if } A \geq N \\ H_i(k) & \text{else} \end{cases} \quad (20)$$

여기서 $A = \sum_{\lambda=-\beta}^{\beta} M_{i+1}^{up}(k+\lambda)$ 이다. 본 논문에서는 $w_{\lambda} = [w_{-1}, w_0, w_{-1}] = [0.5, 1.0, 0.5]$ 와 $\beta = 1$, $N = 2$ 을 사용한다. 식 (20)은 다음을 의미한다. 신뢰도가 높은 채널 추정값을 얻기 위하여 인접한 세 개의 부반송파에 윈도우 구간을 설정하고 윈도우 구간 내에 특정조건 ($A \geq N$)을 만족할 경우, 초기 채널 추정값인 $\tilde{H}_{i+1}(k)$ 에 가중합을 취하여 최종 채널 추정값 $H_{i+1}(k)$ 를 얻는다. 반면에, $A \geq N$ 를 만족하지 못하는 경우, 윈도우 구간 내에 신뢰할만한 채널 추정값이 상대적으로 적다고 판단하여 이전 채널 추정값 $H_i(k)$ 를 최종 채널 추정값으로 결정한다. 또한, 식 (12)와 (13)에서 $i=0$ 인 경우 WSUM 기법과 동일하게 식 (11)의 $H_0(k)$ 를 사용한다.

MMSE 기반의 채널 추정기법[11][12]은 채널 상관행렬의 역행렬을 구해야하는 높은 복잡도 문제를 안고 있다. 본 논문에서는 복잡도를 고려하여 MMSE 기법을 적용하지 않는 향상된 채널추정 기법을 제안한다. 다만, 제안된 기법은 참고문헌[11]의 WSUM-TDA 대비 식 (13)과 (15)의 연산을 추가로 수행하는 복잡도를 갖는다.

IV. 모의실험 결과

본 장에서는 기존의 채널추정 기법들과 본 논문에서 제안하는 기법의 비트 오류율 및 패킷 오류율 성능을 Codha Wireless 사[13]에서 제시한 Rural 채널 및 Highway LOS 환경에서 비교 분석한다. 기존 채널추정 기법으로는 STA[5], TRFI[6], CDP[5], WSUM[10], WSUM-TDA[11] 기법을 고려하였다.

또한 제안된 기법에서 사용된 TDA 방식을 CDP에 적용한 TDA-CDP 기법의 성능 또한 제시하였다. 그리고 성능 비교분석의 기준을 위하여 하나의 OFDM 심볼 중간에 시변 채널 계수를 FFT 하여 채널 추정값을 구하는 ‘Ideal’ 성능을 제시하였다.

기본적으로 모의실험 변수들은 IEEE 802.11p 표준을 따르며, 변조 방식으로는 QPSK와 16QAM을 고려하였다. 패킷은 $100(=N_{data})$ 개의 OFDM 심볼로 구성되며 코드를 1/2을 사용하였다. IEEE 802.11p 물리계층 시뮬레이터를 MATLAB 소프트웨어로 구현하였으며 Rural 채널 및 Highway LOS 환경에서 10^5 랜덤 패킷을 발생하여 QPSK와 16QAM 변조 방식 각각에 대한 모의실험을 수행하였다.

그림 2와 그림 3은 Rural 채널 환경에서 BER 및 PER 결과를 QPSK와 16QAM에 대하여 각각 나타내고 있고, 그림 4와 그림 5는 Highway LOS 채널 환경에서 BER 및 PER 결과를 QPSK와 16QAM에 대하여 각각 나타내고 있다.

모의실험 결과를 통하여 다음의 기존 채널추정 기법에 대한 연구 방향을 확인할 수 있다. 낮은 변조지수 혹은 저속 환경(그림 2(a), 그림 2(b), 그림 4(a))에서 비교적 안정적으로 동작하는 STA[5] 기법이 높은 변조지수 혹은 고속 환경(그림 3(b), 그림 4(b), 그림 5(b))에서 갖는 단점을 극복하기 위하여 CDP[5] 기법이 제안되었다. 또한 높은 변조지수에서 CDP 방식보다 우수한 성능을 나타내는 기법으로 TRFI[6] 기법이 제안되었다(그림 3, 그림 5). 그

러나 QPSK의 경우에는 그림 2와 그림 4와 같이 TRFI와 CDP 성능이 동일함을 확인할 수 있다. 또한 이러한 TRFI 방식의 단점을 극복할 수 있는 방식으로 WSUM[10] 기법이 제안되었다.

그림 2에서 제안된 기법은 $BER=10^{-4}$ 기준으로 CDP, WSUM, WSUM-TDA 기법 대비 각각 약 7.0dB, 2.5dB, 1.0dB 이득을 보이고, $PER=10^{-2}$ 기준으로 각각 약 6.4dB, 2.5dB, 0.8dB 이득을 보인다. 그림 3에서 제안된 기법은 $BER=10^{-4}$ 기준으로 CDP, WSUM, WSUM-TDA 기법 대비 각각 약 10.0dB, 3.2dB, 1.2dB의 이득을 보이고, $PER=10^{-2}$ 기준으로 각각 약 9.0dB, 2.5dB, 1.0dB 이득을 보인다. 그림 4에서 제안된 기법은 $BER=10^{-4}$ 기준으로 CDP, WSUM, WSUM-TDA 기법 대비 각각 약 7.0dB, 2.3dB, 1.0dB의 이득을 보이고, $PER=10^{-2}$ 기준으로 각각 약 7.0dB, 2.0dB, 0.8dB 이득을 보인다. 그림 5에서 제안된 기법은 $BER=10^{-4}$ 기준으로 CDP, WSUM, WSUM-TDA 기법 대비 각각 약 10.0dB, 3.2dB, 1.4dB의 이득을 보이고, $PER=10^{-2}$ 기준으로 각각 약 8.5dB, 3.5dB, 1.0dB 이득을 보인다.

STA 기법의 경우 BER 측면에서 Ideal과 유사한 성능을 나타낸다. 하지만 그림 3(b)와 그림 5(b)의 16QAM 혹은 그림 4(b)와 그림 5(b)의 고속 시변 환경에서 PER 성능에서 오류 마루가 발생하는 경향의 단점이 있다[10]. 또한 TDA-CDP 기법에서도 CDP 대비 이러한 경향을 확인할 수 있다.

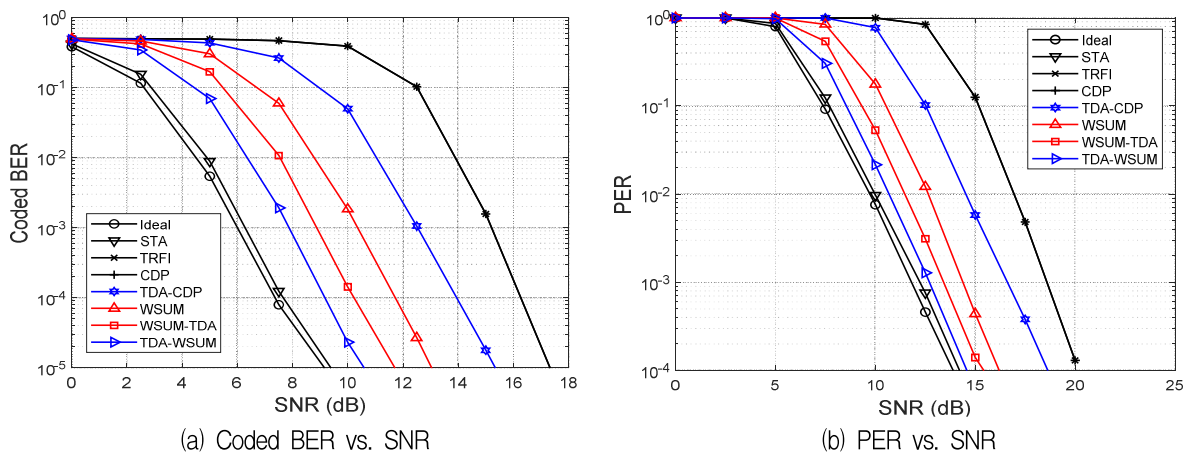
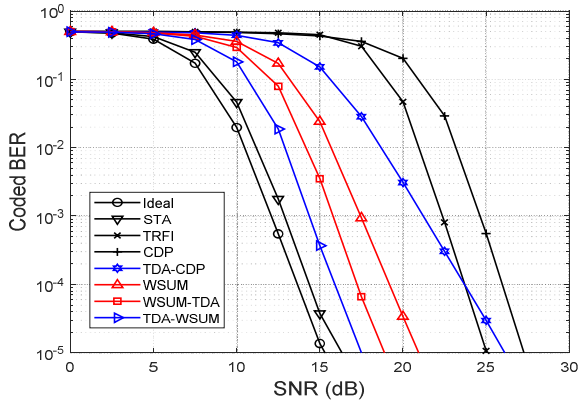
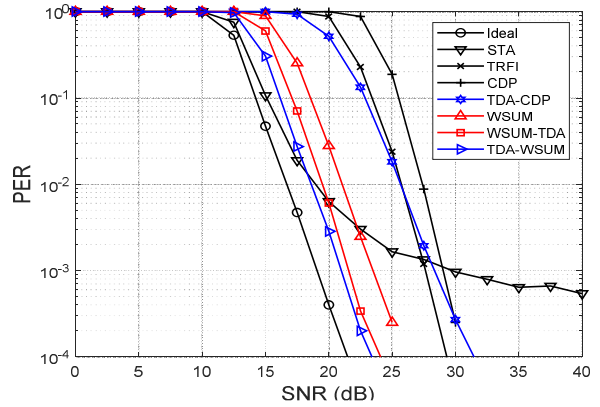


그림 2. TDA-WSUM 기반 BER 및 PER 성능 비교 (Rural 환경, 144km/h, QPSK, code rate=1/2)

Fig. 2. Comparison of BER and PER performance based on TDA-WSUM (Rural channel, 144km/h, QPSK, code rate=1/2)



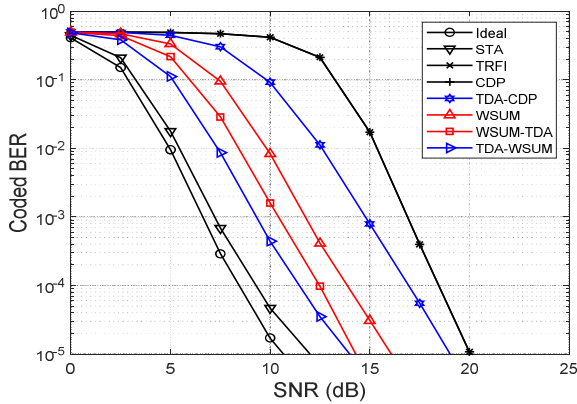
(a) Coded BER vs. SNR



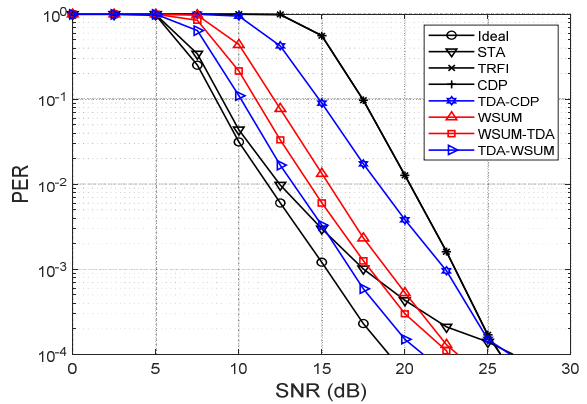
(b) PER vs. SNR

그림 3. TDA-WSUM 기반 BER 및 PER 성능 비교 (Rural 환경, 144km/h, 16QAM, code rate=1/2)

Fig. 3. Comparison of BER and PER performance based on TDA-WSUM (Rural channel, 144km/h, 16QAM, code rate=1/2)



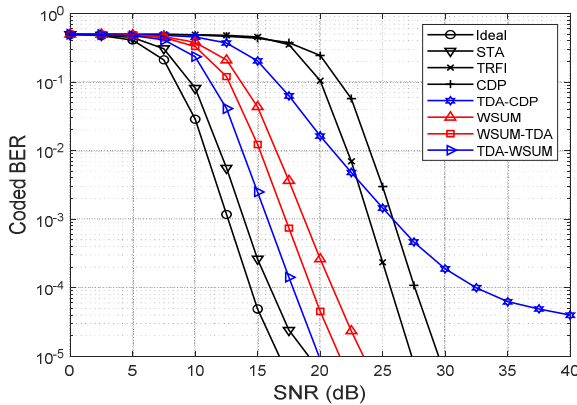
(a) Coded BER vs. SNR



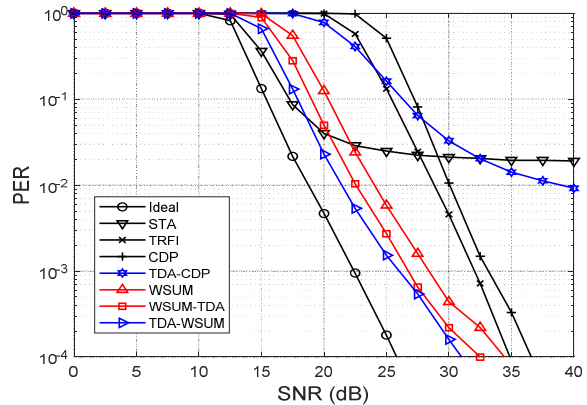
(b) PER vs. SNR

그림 4. TDA-WSUM 기반 BER 및 PER 성능 비교 (Highway LOS 환경, 252km/h, QPSK, code rate=1/2)

Fig. 4. Comparison of BER and PER performance based on TDA-WSUM (Highway LOS channel, 252km/h, QPSK, code rate=1/2)



(a) Coded BER vs. SNR



(b) PER vs. SNR

그림 5. TDA-WSUM 기반 BER 및 PER 성능 비교 (Highway LOS 환경, 252km/h, 16QAM, code rate=1/2)

Fig. 5. Comparison of BER and PER performance based on TDA-WSUM (Highway LOS channel, 252km/h, 16QAM, code rate=1/2)

반면에 제안된 TDA-WSUM 기법은 WSUM 및 WSUM-TDA 기법 대비 우수한 PER 성능을 Rural 채널(그림 3(b)) 및 Highway LOS 채널(그림 5(b)) 환경과 QPSK(그림 4(b)) 및 16QAM(그림 5(b)) 변조기

법에서 동일하게 확인할 수 있다. 또한 본 논문의 모의실험에서는 높은 변조지수로 16QAM에 대한 결과를 제시하고 있으나 64QAM에서 동일한 성능 경향을 확인할 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 Rural 채널 및 Highway LOS 환경에서 보다 정확한 채널추정 성능을 갖는 새로운 TDA-WSUM 채널추정 기법을 제안하고, 그 성능을 모의실험을 통하여 패킷 오류율 및 비트 오류율 관점의 검증하였다. 제안 기법은 기존의 WSUM 채널추정 기법 앞단에 시간 영역 평균화를 적용하여 Rural 채널 및 Highway LOS 채널 환경에서 패킷 오류율 및 비트 오류율 성능을 향상시킬 수 있음을 확인하였다. 또한 높은 변조지수를 갖는 고속 시변 환경에서도 안정적인 채널추정 성능을 나타냄을 확인하였다.

또한 향후 연구과제로 신뢰도 테스트 방식을 적용한 선택적 TDA 기법과 MMSE 기법과 연계된 채널추정 기법 연구가 필요하다고 판단된다. 또한 고속 시변 채널에 의한 ICI(Inter Carrier Interference) 제거가 가능한 채널추정 알고리즘의 개발이 수행되어야 할 것으로 판단된다.

References

- [1] IEEE, "1609.0-2019 - IEEE Guide for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) Architecture", IEEE Std 1609.0-2013, Apr. 2019. <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2019.8686445>.
- [2] Y. K. Kim and C.I Mun, "Performance Evaluation of Channel Estimations in IEEE 802.11p in Urban Environments", Proc. KIIT Summer Conference, Cheonan, Korea, pp. 267-271, May 2014.
- [3] X. Cheng, Q. Yao, M. Wen, C.-X. Wang, L. Song, and B. Jiao, "Wideband Channel Modeling and ICI Cancellation for Vehicle-to-Vehicle Communication Systems", IEEE J. Sel. Areas Commun., Vol. 31, No. 9, pp. 434-448, Sep. 2013. <https://doi.org/10.1109/JSAC.2013.SUP.0513039>.
- [4] 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. 3-14, Jan. 2012. <https://doi.org/10.1109/TVT.2011.2164428>.
- [5] J. Zhao, X. Cheng, M. Wen, B. Jiao, and C.-X. Wang, "Channel Estimation Schemes for IEEE 802.11p Standard", IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, Vol. 5, No. 4, pp. 38-49, winter. 2013. <https://doi.org/10.1109/MITS.2013.2270032>.
- [6] Y.-K. Kim, C. Mun, J.-T. Seo, and C.-K. Jung, "IEEE 802.11p Channel Estimation Scheme Using Frequency Domain Interpolation Based on Time and Frequency Domain Reliable Test", The Journal of KIIT, Vol. 14, No. 9, pp. 53-60, Sep. 2016. <https://doi.org/10.14801/jkiit.2016.14.9.53>.
- [7] S. Lim and K. Ko, "Performance Evaluation of MAC Layer Due to Vehicle Intensities in V2V Communications Based on IEEE 802.11p", Journal of KIIT, Vol. 14, No. 8, pp. 41-46, Aug. 2016. <http://dx.doi.org/10.14801/jkiit.2016.14.8.41>.
- [8] H.-J. Choi, J.-T. Seo, and K.-B. Ko, "Development and Analysis of Emergency Vehicle Right of Way Algorithm by PreScan", Journal of KIIT, Vol. 15, No. 5, pp. 105-113, May 2017. <https://doi.org/10.14801/jkiit.2017.15.5.105>.
- [9] H.-J. Choi, J.-T. Seo, and K.-B. Ko, "Development and Performance Analysis of Channel Estimation Schemes Using Decoding Information for WAVE System", Journal of KIIT, Vol. 15, No. 11, pp. 93-101, Nov. 2017. <https://doi.org/10.14801/jkiit.2017.15.11.93>.
- [10] C. Park and K. Ko, "Advanced Channel Estimation Schemes Using CDP based Updated Matrix for IEEE802.11p/WAVE Systems", International Journal of Contents, Vol. 14, No. 1, pp. 39-44, Mar. 2018. <https://doi.org/10.5392/IJoC.2018.14.1.039>.
- [11] D. S. Jang and K. Ko, "Advanced Channel Estimation Method for IEEE 802.11p/WAVE System", International Journal of Contents, Vol. 15, No. 4, pp. 27-35, Dec. 2019. <https://doi.org/10.5392/IJoC.2019.15.4.027>.

[12] S. Lim, H. Wang, and K. Ko, "Power-Delay-Profile-Based MMSE Channel Estimations for OFDM Systems", *Electronics*, Vol. 12, No. 3, pp. 510, 2023. <https://doi.org/10.3390/electronics12030510>.

[13] M. Kahn, "IEEE 802.11 Regulatory SC DSRC Coexistence Tiger Team V2V Radio Channel Models", Doc.: IEEE 802.11-14, Feb. 2014. <https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/14/11-14-0259-00-0reg-v2v-radio-channel-models.ppt> [accessed: Jul. 10, 2023]

고 균 병 (Kyunbyoung Ko)



1997년 2월 : 연세대학교
전자공학과(공학사)
1999년 8월 : 연세대학교
전기전자공학과(공학석사)
2004년 2월 : 연세대학교
전기전자공학과(공학박사)
2007년 3월 ~ 현재 :

한국교통대학교 전자공학과 교수
관심분야 : 이동통신/OFDM/C-V2X

저자소개

김 대 영 (Dae-Yeong Kim)



2018년 3월 ~ 현재 :
한국교통대학교 전자공학과
학부과정
관심분야 : 이동통신/OFDM

허 성 철 (Seong-Cheal Heo)



2017년 3월 ~ 현재 :
한국교통대학교 전자공학과
학부과정
관심분야 : 이동통신/OFDM

왕 한 호 (Hanho Wang)



2004년 2월 : 연세대학교
전자공학과(공학사)
2010년 2월 : 연세대학교
전자공학과(공학박사)
2012년 3월 ~ 현재 : 상명대학교
스마트정보통신공학과 교수
관심분야 : OFDM, ML, DL, C-ITS