Journal of KIIT. Vol. 20, No. 1, pp. 141-147, Jan. 31, 2022. pISSN 1598-8619, eISSN 2093-7571 141
http://dx.doi.org/10.14801/jkiit.2022.20.1.141

시변 채널에서 K-means 기반 채널 추정 기법의 성능 평가

왕 한 호*

Performance Evaluation of K-Means-based Channel Estimation Scheme in Time Varying Channel

Hanho Wang*

본 연구는 2021학년도 상명대학교 교내연구비를 지원받아 수행하였음.

요 약

PCE는 파일럿 신호를 사용하지 않음에도 불구하고 일정 개수 이상의 데이터 심볼만으로 파일럿 신호를 사용하는 최소제곱(LS, Least Square) 채널추정기 대비 우수한 평균제곱오차(MSE, Mean Squared Error) 성능을 가지고 있음이 알려져 있다. 그러나 기존의 연구는 스냅샷(Snapshot) 채널에 대한 채널추정 성능만을 제시해왔을 뿐, 이동 통신 시변 채널에서의 성능은 제시하지 못하였다. PCE는 이전 채널 추정 값을 기준으로 다음 채널을 추정하는 채널 추정기인 만큼 시변 채널에서의 성능 평가는 필수적이다. 본 논문에서는 이동 통신 시변 채널에서 PCE의 채널 추정 성능을 평가하였다. 이를 통하여 PCE가 시변 채널에서도 LS 채널추정기 대비 동일 MSE에 대해서 4 내지 6 dB 신호 대 잡음비 이득이 있음을 보였다. 또한 단말의 이동 속도를 고려한 자원 할당 기법을 제안함으로써 PCE는 채널 환경에 적응하여 최선의 채널 추정 정밀도를 제공할 수 있게 되었다.

Abstract

PCE with a certain number of data symbols has superior mean squared error(MSE) performance compared to a least square(LS) channel estimator using pilot signal. However, in PCE studies conducted so far, only the channel estimation performance for the snapshot channel has been presented, but the performance in the time-varying channel has not been presented. Since the PCE is a channel estimator that estimates the channel based on the previous channel estimation, performance evaluation in the time-varying channel is essential. In this paper, the channel estimation performance of the PCE is evaluated in time-varying channel of a mobile communication environment. Through this evaluation, It is shown that the PCE has superior MSE performance with SNR gain between 4 and 6 dB compared to the LS channel estimator even in time-varying channels. In addition, mobility adaptive resource allocation scheme for the PCE is proposed, which makes the PCE provide the best MSE performance in a channel environment

Keywords
pilotless channel estimation, pilot overhead reduction, time varying channel

* 상명대학교 스마트정보통신공학과
- ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0672-7775

· Received: Sep. 24, 2021, Revised: Oct. 22, 2021, Accepted: Oct. 25, 2021
· Corresponding Author: Hanho Wang
Dept. of Smart Information and Telecommunication Engineering, Sangmyung Univ. Korea,
Tel.: +82-41-550-5404, Email: hhwang@smu.ac.kr

Ⅰ. 서 론

이동 통신 시스템에서 사용자 단말(UE, User Equipment)들은 이동하기 때문에 UE와 기지국(BS, Base Station) 사이의 채널 환경은 지속적으로 변화한다. 채널의 변화는 두 가지 측면에서 나타나는데 하나는 UE와 BS사이의 다중경로채널(Multipath channel)의 변화이고 다른 하나는 UE와 BS 사이의 상대적인 속도 변화에 따른 도플러 주파수 편이(Doppler frequency shift) 발생이다[1][2]. UE와 BS가 위치한 장소의 전파 반사 환경이 다중경로채널의 특징을 결정하고, 그 결과로 주파수 선택적 페이딩(Frequency selective fading)이 나타나며, 도플러 주파수는 시변 채널에서 시간 선택적 페이딩(Time selective fading)의 상관 시간(Coherence time)을 결정한다. 이동 통신 시스템은 이러한 시변 채널을 추정하여 통신을 하므로 데이터를 송수신하기 위한 무선 자원 단위는 채널의 상관 시간과 상관 주파수(Coherence frequency)를 고려하여 설계되어 있다.

시변 채널에서는 UE가 이동함에 따라 채널이 변화하므로, BS와 UE는 상관 시간 내에서 채널을 반복적으로 추정한다. 일반적으로 시변 채널을 추정하기 위하여 BS와 UE는 양 측이 모두 알고 있는 파일럿 신호(Pilot signal)을 전송한다. 그러나 파일럿 신호는 데이터가 전송될 수 있는 무선 자원을 소비하기 때문에 이동 통신 시스템의 실질적인 전송 용량은 사용되는 파일럿 신호의 양에 반비례한다. 따라서 파일럿 신호를 적게 사용하면서도 채널을 정밀하게 추정할 수 있는 채널 추정 기법에 대한 연구가 이루어져 왔다[3]-[6]. 특히 [6]에서는 K-means 알고리즘을 이용하여 데이터 심볼을 군집화함으로써 파일럿 신호를 사용하지 않고도 채널을 추정할 수 있는 채널 추정기(PCE, Pilotless Channel Estimator)를 제안하였다.

PCE는 QPSK 내지 256QAM에서 파일럿을 사용하는 최소제곱(LS, Least Square) 채널 추정기보다 정밀한 채널 추정을 할 수 있다[6]-[8]. 다만, 기존 연구에서 PCE 성능 평가는 고정된 무선 자원 단위에 대해서 실시되었고 스냅샷(Snapshot) 채널 환경을 가정하였다[6][7]. PCE는 최초 채널 추정 값이 주어진 상태에서 다음 시간 슬롯의 채널을 추정하기 때문에, 시간적으로 상관관계를 가지고 변화하는 이동 통신 채널이 반영된 연속적인 시간 슬롯에서 채널 추정 성능을 평가하는 것이 합리적일 것이다. 특히 UE의 이동 속도가 빠른 환경에서 PCE의 이전 채널 추정 정확도는 다음 채널 추정 성능에 영향을 줄 수 있다. 따라서 UE의 속도에 따른 채널 추정 성능의 변화는 실질적인 이동 통신 환경을 고려하여 평가되어야 한다.

본 논문에서는 UE의 이동성을 고려하여 시변 채널에서 PCE의 성능을 평가하였다. 현재 개발되어 사용되고 있는 4세대 및 5세대 이동통신 시스템에서 실제 사용되고 있는 무선 자원 블록(RB, Resource Block)을 사용하여 성능 평가를 진행함으로써 연구 결과의 현실 적용 가능성을 높였다[9]. 또한 이동통신 시스템에서 UE의 이동성이 증가함에 채널의 상관 시간이 감소하는 것에 대응하여 UE의 속도가 증가하여도 PCE의 채널 추정 성능을 개선할 수 있는 자원 할당 기법을 제안하였다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. II장에서는 본 논문이 고려하고 있는 시스템 모델이 제시된다. III장에서는 UE의 이동성 변화에 따른 PCE의 연속 채널 추정 성능이 평가된다. IV장에서는 UE의 이동속도를 고려하여 PCE에 적용하여 성능을 개선할 수 있는 자원 할당 기법이 제안되고 그 성능이 평가된다. V장에서는 결론과 향후 추가 연구 계획이 제시된다.

Ⅱ. 시스템 모델

PCE가 채널을 추정하기 위하여 사용하는 데이터 심볼은 그림 1에 도시되어 있다. 한 개의 서브프레임 내의 데이터 신호 구역(DSR, Data Signal Region)에 전송된다. 그림 1의 예는 4세대 및 5세대 이동통신에서 공통적으로 사용되고 있는 전형적인 RB이다[8][9]. 제어 신호 구역(Control signal region)에는 데이터를 수신하기 위한 제어 정보가 전송되며 실제 구현되어 있는 시스템에 적용해 보면 PDCCH 또는 CORESET에 대응된다[9]. DSR에서 PCE가 사용하는 데이터 심볼은 L개의 부반송파와 K개의 OFDM 심볼로 구성되는 한 개의 PCE 블록(PCE-B)이다.

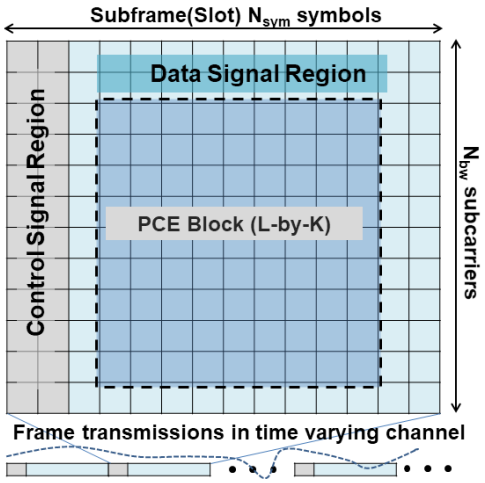

그림 1. 자원 블록 및 PCE 블럭
Fig. 1. Resource block and PCE block

PCE-B 내의 데이터 심볼들은 PCE에 입력으로 주어지며, PCE는 K-means 군집화 알고리즘 연산 [6][10]을 통해서 네 개의 군집 중심점(Cluster center) $c_{i\in 1,2,3,4}$을 출력한다.

시변 채널에서 PCE를 평가하기 위하여 본 논문에서는 OFDMA 기반 이동통신 시스템을 가정하였다. 시변 채널은 MEDS 기법을 이용하여 발생시켰고[2], 발생된 채널의 일부를 도시하면 그림 2와 같다. PCE-B 별로 스냅샷 채널이 사용된 기존 연구들 [6][7]과 달리 본 논문에서는 시간적으로 연속된 PCE-B들에 시간적으로 연속되며 상관도를 갖는 채널이 적용되었다. 최초 채널 값 h_o은 동기 신호 또는 제어 신호 구역에 전송되는 파일럿 신호에 의해서 최초 일 회 획득될 수 있으며, N개의 연속된 PCE-B에 대하여 PCE 채널 추정을 하는 동안 추가적인 파일럿 신호 사용은 없다.

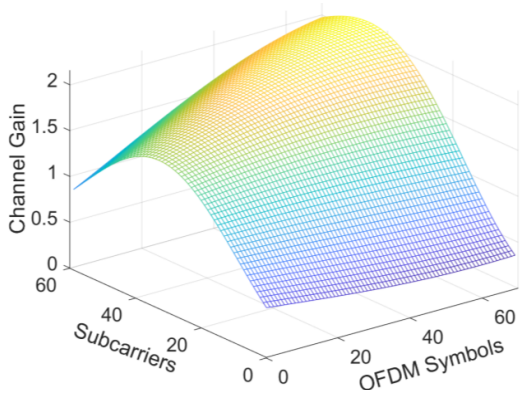

그림 2. 시변 채널
Fig. 2. Time varying channel

III. 시변 채널 환경에서 PCE 성능 평가

3.1 시변 채널에서 PCE 채널 추정

i번째 PCE-B에 대하여 수신 신호는 다음과 같이 표현된다.

$$y_i = h_i x + n \tag{1}$$

x는 $L\times K$개의 QPSK 심볼을 포함하는 벡터, h_i은 i 번째 PCE-B가 전송되는 시점의 채널이며 복소 가우시안(Complex gaussian) 분포의 랜덤 변수(Random variable)이다. n은 열잡음(Thermal noise)으로 평균이 0이고 표준편차가 1인 복소 가우시안 분포를 따르는 $L\times K$개의 랜덤 변수이다. (1)의 수신 신호는 PCE를 수행하는 함수 $f_{PCE}()$에 입력으로 주어지며, 이 함수는 다음과 같이 군집 중심점을 출력한다.

$$f_{PCE}: y_i \rightarrow c_i \tag{2}$$

[6]으로부터 c_i는 QPSK가 가지고 있는 네 종류의 심볼에 채널이 반영된 것이므로 c_i가 포함하는 값은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$c_i = \left\{A_i e^{j\left(\frac{\pi}{4}+\theta_i\right)}, A_i e^{j\left(\frac{3\pi}{4}+\theta_i\right)}, A_i e^{j\left(\frac{5\pi}{4}+\theta_i\right)}, A_i e^{j\left(\frac{7\pi}{4}+\theta_i\right)}\right\} \tag{3}$$

군집 중심점에서 QPSK 심볼에 의한 위상(Phase)를 제거하면 추정된 채널의 후보군 h_i^C은 다음과 같이 표현된다.

$$h_i^C = \left\{A_i e^{j\theta_i}, A_i e^{j\left(\frac{\pi}{2}+\theta_i\right)}, A_i e^{j(\pi+\theta_i)}, A_i e^{j\left(\frac{3\pi}{2}+\theta_i\right)}\right\} \tag{4}$$

i번째 채널 추정은 $i-1$번째 추정 이후 상관 시간 이내에 이루어진다. 따라서 h_i^C와 h_{i-1} 차이에 대한 절대 값을 비교하여 차이가 최소인 것을 선택한다. 이로부터 최종 추정된 채널은 다음과 같다.

$$\hat{h}_i = \arg\min\left(\left|h_i^C - h_{i-1}\right|\right) \quad (5)$$

그림 3에는 PCE를 이용하여 채널을 추정하는 과정이 도시되어 있다. 수신된 데이터 심볼들 y_i는 ○으로 표시되어 있다. 수식 (2)번 과정을 통하여 각 군집의 중심점 c_i가 계산되며 그림 3에 네 개의 △으로 표시되어 있다. c_i에서 QPSK 심볼의 위상인 $\pi/4$를 제거한 h_i^C는 *으로 표시되어 있다. 최종적으로 h_{i-1}과 비교하여 추정해야 하는 ★으로 표시된 실제 채널 값 h_i에 가장 근접해 있는 3사분면에 위치한 값이 h_i^C에서 선택되어 $\hat{h}_i$가 최종적으로 계산된다.

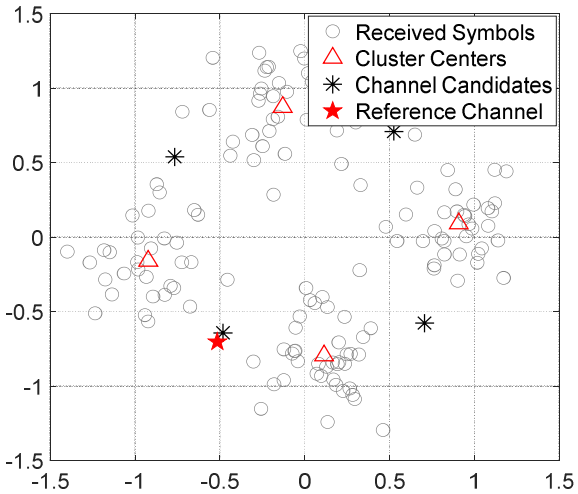

그림 3. PCE를 이용한 채널 추정
Fig. 3. Channel estimation by using PCE

3.2 PCE 성능 평가

시변 채널에서 PCE의 성능은 MSE로 측정된다. UE의 이동 속도 v, h_0의 획득 주기 N, PCE-B의 OFDM 심볼 수 K를 변화시키면서 MSE를 관찰하고 결과를 분석한다. 모든 실험에서 반송파 주파수(Carrier frequency)는 2GHz이며 부반송파의 대역폭은 15kHz를 사용하였다. 1024 포인트 FFT(Fast Fourier Transform)을 사용하였고 다중경로 페이딩 채널의 최대 지연(Maximum delay spread)는 $1\mu s$이며 지연 프로파일(Delay profile)에는 지수 감쇄(Exponentially decaying)모델이 적용되었다.

그림 4에는 UE 이동 속도 변화에 따른 PCE 채널 추정성능이 도시되어 있다. 이 결과에서 N=5, PCE-B의 크기는 L=12, K=12이다. 144개는 UE의 이동성을 고려하지 않은 상황에서 PCE가 LS 채널 추정기 보다 낮은 MSE를 달성할 수 있는 충분한 데이터 심볼 수이다[6]. 전반적으로 UE의 이동성이 증가함에 따라 PCE의 MSE 성능이 열화 되고 있음을 알 수 있다. 특히 30km/h 이상에서 SNR이 증가함에도 불구하고, MSE 성능이 개선되는 기울기가 감소함을 것을 확인할 수 있다.

그림 4와 같은 결과가 나오는 이유는 UE의 이동 속도가 증가함에 따라 채널의 상관 시간이 감소하고, 그 결과 수식 (5)과정에서 이전 채널 추정 결과와 현재 채널 추정 결과 사이에 오차가 증가하기 때문이다. PCE 채널 추정이 반복되면서 중간에 발생한 채널 추정 오류는 이후 채널 추정에 지속적으로 영향을 주기 때문에 N을 감소시킴으로써 채널 추정 오류가 발생하더라도 그 영향이 이후 채널 추정에 미치는 영향을 제한시킬 수 있다.

그림 5에는 h_0획득 주기 N에 따른 PCE의 MSE가 도시되어 있다. h_0을 획득 주기가 감소함에 따라 채널 추정 오류에 영향을 받는 PCE-B 수가 감소하므로 동일한 이동 속도에 대해서 개선된 채널 추정 성능을 얻을 수 있다. 현재 실험은 K=12이므로 하나의 PCE-B가 LTE 시스템 기준 하나의 부프레임(Subframe) 에 해당되므로[9], 세 개 이하의 부프레임 전송 주기로 h_0를 획득할 수 있다면 시변 채널에서도 파일럿 신호 없이 LS 채널추정기 성능 대비 개선된 채널 추정 성능을 얻을 수 있다.

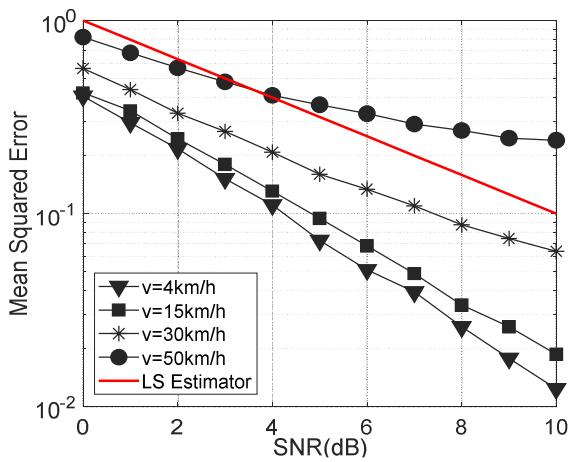

그림 4. 속도에 따른 PCE MSE 성능
Fig. 4. PCE MSE performance depending on velocity

특히 UE의 이동 속도가 증가할수록 h_0획득 주기 N의 증가에 따른 성능 열화가 더 크게 발생하였다. 이것은 시간 영역 채널 추정 주기 K 보다 채널이 더 빠르게 변하기 때문이므로 채널 추정 주기를 감소시켜 PCE의 성능을 개선해 보고자 한다.

그림 6에는 N을 5로 고정하고, 채널 추정 주기 K 변화에 따른 PCE의 성능이 도시되어 있다. 그림 5까지 제시한 성능 평가에서는 K가 12로 고정되어 있었으나, 그림 6에서는 K가 6,3,2로 감소하였다. 이것은 채널 추정 주기가 $1/2, 1/3, 1/4$로 감소했음을 의미한다. SNR 6dB 이하에서는 K=6으로 설정된 PCE가 가장 우수한 성능을 나타내었으나, SNR이 6dB을 초과하는 영역에서는 K=3인 PCE가 가장 우수한 성능을 보임을 알 수 있다.

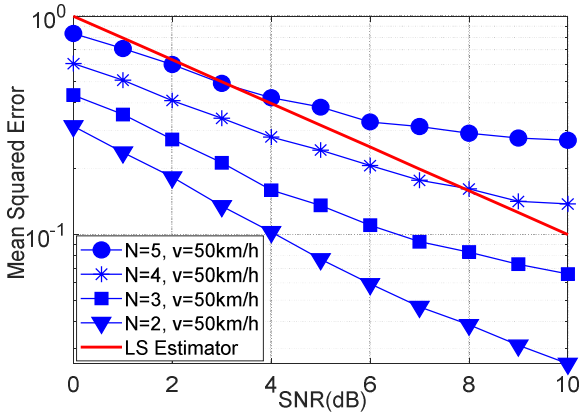

그림 5. h_0획득 주기 변화에 따른 MSE 성능
Fig. 5. MSE performance according to h_0 obtaining durations

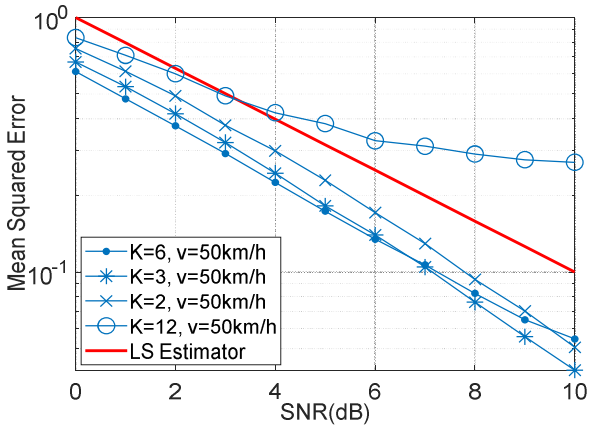

그림 6. 채널 추정 빈도 증가를 통한 채널 추정 성능 개선
Fig. 6. Channel estimation performance improvement by increasing channel estimation frequency

SNR 6dB에서 MSE 성능이 역전되는 것은 SNR이 낮은 영역에서 PCE에 사용되는 심볼의 수가 많은 것이 성능에 더 큰 영향을 주기 때문이다[6][7]. K=6과 K=3은 각각 72개와 36개의 데이터 심볼을 사용한 것이다. K=2인 것은 데이터 심볼을 24개만 사용하므로 빠른 채널 변화를 추정하는 것에는 유리하지만 데이터 심볼 수의 부족으로 SNR 전 영역에서 K=3인 PCE보다 열등한 성능을 보여준다.

Ⅳ. 시변채널에서 PCE를 위한 자원 할당 방법

시변 채널에서 PCE 채널 추정 성능은 PCE-B가 포함하는 데이터 심볼 수, h_0획득 주기 N, 채널 추정 주기 K에 영향을 받는다는 것을 위의 결과로부터 알 수 있었다. 본 논문의 연구 주제는 파일럿 신호를 감소시키거나, 사용하지 않고 채널을 추정하는 것이기 때문에 N을 감소시키는 것은 본 연구의 목적에 맞지 않다. 또한, 대부분의 이동통신 시스템[9]에서 N은 정해져 있기 때문에 PCE를 위해서 임의로 변경할 수 없다.

그림 6의 결과로부터 K를 감소시키면서 채널 추정 주기를 낮춰줌으로써 시변 채널의 변화에 대응하여 PCE의 성능을 개선할 수 있음을 알 수 있었다. 현재 사용 중인 이동통신 시스템은 12개의 OFDM 심볼로 구성된 RB를 최소 자원할당 단위로 사용하므로, BS와 UE는 12의 약수로 K값을 선택하여 PCE를 동작시킬 수 있으며, 이것은 4세대, 5세대 이동통신 표준에 부합한다[9].

그러나, 그림 1에서 PCE-B의 L을 12개로 고정하고 K를 감소시키면 PCE에 사용되는 데이터 심볼 수의 감소로 PCE의 성능이 열화 된다. 따라서 PCE를 사용하는 UE나 BS는 RB 할당 시 주파수 영역에서 2개 이상의 RB를 인접하여 할당함으로써 PCE-B의 L을 24로 설정하여 PCE를 동작시킬 수 있다. 다중 경로 페이딩의 최대 지연 값에 따라서 선택 가능한 가장 큰 L값이 표 1에 제시되어 있으며 24는 어떤 경우에도 선택 가능한 값이다.

표 1. 최대 지연 값에 대응되는 L 최대값
Table. 1. Max. L values depending on max. delay spread

Max. delay	1.0μs	1.5μs	2.0μs	2.5μs
Max. L value	66	44	33	26

최대 지연이 $T_{\max}$이고 부반송파 대역폭이 B일 때 $L=(1/T_{\max})/B$로 계산된다.

그림 7에는 RB가 주파수 영역에서 인접하게 할당되어 L=24로 설정된 PCE의 성능이 도시되어 있다. 범례에서 괄호 안의 값은 (L,K)이다. L=24일 때 전체적인 MSE 성능의 경향은 그림 6의 결과와 동일하지만 L=12인 경우 대비 충분한 데이터 심볼을 채널 추정에 사용하므로 MSE가 개선된 것을 확인할 수 있다.

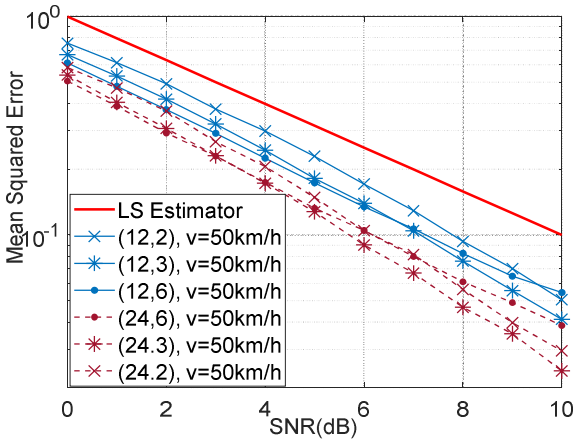

그림 7. PCE 성능 개선을 위한 PCE-B 구조
Fig. 7. PCE-B structures for PCE performance enhancement

V. 결 론

시변 채널에서 PCE의 성능을 검증하였다. PCE 시간적으로 과거의 채널 추정 결과가 현재의 채널 추정에 영향을 미치므로 채널 추정 빈도를 높일 수 있도록 PCE-B의 크기를 조정할 수 있다. 이 연구 결과로부터 이동 속도가 50km/h 이하일 때 데이터 전송 영역에 파일럿 신호를 전송하지 않고도 PCE로 채널을 추정할 수 있음을 확인하였으며, 채널 추정 정확도는 파일럿을 사용하는 LS 채널추정기 보다 우수함이 밝혀졌다. 또한 PCE를 4G와 5G 전송 규격에 적용함으로써 실제 환경에서 적용될 수 있음을 확인할 수 있었다.

References

[1] R. Hasan, M. Mowla, A. Rashid, K. Hosain, and I. Ahmad, "A Statistical Analysis of Channel Modeling for 5G mmWave Communications", 2019 International Conference on Electrical, Computer and Communication Engineering(ECCE), Cox'sBazar, Bangladesh, Feb. 2019. https://doi.org/10.1109/ECACE.2019.8679507.

[2] M. Patzold, "Mobile Fading Channels 2nd Ed.", Wiley, pp. 33-53, Oct. 2011. https://doi.org/10.1002/9781119974116.

[3] R. Apelfrojd, W. Zirwas, and M. Sternad, "Low-Overhead Cyclic Reference Signals for Channel Estimation in FDD Massive MIMO", IEEE Transactions on Communications, Vol. 67, No. 5, pp. 3279-3291, Jan. 2019. https://doi.org/10.1109/TCOMM.2019.2895059.

[4] K. Upadhya, Sergiy A. Vorobyov, and M. Vehkapera, "Downlink performance of superimposed pilots in massive MIMO systems in the presence of pilot contamination", IEEE Transactions on Wireless Communications, Vol. 17, No. 10, pp. 6630-6644, Oct. 2018. https://doi.org/10.1109/GlobalSIP.2016.7905925.

[5] J. Shen, J. Zhang and Khaled B. Letaief, "Downlink User Capacity of Massive MIMO Under Pilot Contamination", IEEE Transactions on Wireless Communications, Vol. 14, No. 6, pp. 3183-3193, Jun. 2015. https://doi.org/10.1109/TWC.2015.2403317.

[6] H. Wang, "Performance Evaluation of Channel Estimation Scheme Using Clustering Algorithm", Journal of Korean Institute Of Information Technology, Vol. 16, No. 2, pp. 61-66, Feb. 2018. http://dx.doi.org/10.14801/jkiit.2018.16.2.61.

[7] H. Wang, "Channel Estimation Scheme for High-Order Modulation Using Sequential K-means Clustering", Journal of Korean Institute Of Information Technology, Vol. 17, No. 6, pp. 95-102, Jun. 2019. http://dx.doi.org/10.14801/jkiit.2019.17.6.95.

[8] H. Wang, "K-means-Based Channel Estimation Scheme using Other User's Signal", Journal of Korean Institute Of Information Technology, Vol. 18, No. 11, pp. 81-88, Nov. 2020. http://dx.doi.org/10.14801/jkiit.2020.18.11.81.

[9] E Dahlman, S. Parkvall, and J. Skold, "5G NR: The Next Generation Wireless Access Technology", 1st Edition, Academic Press, pp. 97-99, Aug. 2018.

[10] Coates A. and Ng A.Y, "Learning Feature Representations with K-means", Lecture Notes in Computer Science, Vol. 7700, pp 561-580, 2012. https://doi.org/10.1007/978-3-642-35289-8_30.

저자소개

왕 한 호 (Hanho Wang)

2004년 2월 : 연세대학교
전기전자공학과(공학사)
2010년 8월 : 연세대학교
전기전자공학과(공학박사)
2012년 3월 ~ 현재 : 상명대학교
스마트정보통신공학과 부교수
관심분야 : 이동통신, 채널추정