
MIMO-OFDM을 위한 LMS 알고리즘 기반의 채널추정

황석승*

Channel Estimation Based on LMS Algorithm for MIMO-OFDM System

Suk-Seung Hwang*

요약

고속 이동통신 시스템의 핵심 기술인 다중입력 다중출력(MIMO; Multi-Input Multi-Output) 직교주파수분할(OFDM ; Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 기술은 신뢰성 있는 데이터 수신을 위하여 낮은 추정 오차와 복잡도를 가지는 효과적인 채널추정 기법을 필요로 한다. 본 논문은 MIMO-OFDM 통신시스템에서 주로 사용되어 왔던 LS(Least Square)와 같은 기존의 채널추정 방식에 비해 낮은 채널추정 오차를 가지면서, MMSE(Minimum Mean Square Error) 기반의 채널추정 방식과는 유사한 추정 오차를 가지고 복잡도는 MMSE보다 월등히 낮은 채널추정 기법과 이를 위한 프리앰블(preamble) 파일럿 구조를 제안한다. 제안된 방식은 시간영역에서 LMS (Least Mean Square) 적응 알고리즘을 기반으로 채널을 추정하고, 추정된 채널벡터는 FFT(Fast Fourier Transform)를 거쳐 검파기로 보내진다. 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 제안된 MIMO-OFDM 채널추정 방식의 성능을 확인한다.

ABSTRACT

MIMO-OFDM which is one of core techniques for the high-speed mobile communication system requires the efficient channel estimation method with low estimation error and computational complexity, for accurately receiving data. In this paper, we propose a channel estimation algorithm with low channel estimation error comparing with LS which is primarily employed to the MIMO-OFDM system, and with low computational complexity comparing with MMSE. The proposed algorithm estimates channel vectors based on the LMS adaptive algorithm in the time domain, and the estimated channel vector is sent to the detector after FFT. We also suggest a preamble architecture for the proposed MIMO-OFDM channel estimation algorithm. The computer simulation example is provided to illustrate the performance of the proposed algorithm.

키워드

MIMO-OFDM, Channel estimation, LMS, Preamble
다중입력 다중출력 직교주파수분할, 채널추정, 적응알고리즘, 프리앰블

1. 서론

이동통신 시스템은 고속화와 대용량의 데이터 전송을 목적으로 많은 연구가 진행되어 왔다. 지금까지

개발되었고 연구가 진행 중인 다양한 고속 이동통신 시스템의 대표적인 핵심기술은 MIMO-OFDM[1-3]을 기반으로 한 무선통신 시스템이다. 정확하고 빠른 데이터 전송을 위해 MIMO-OFDM은 낮은 추정오류와

* 조선대학교 메카트로닉스공학과(hwangss@chosun.ac.kr)

접수일자 : 2012. 06. 31

심사(수정)일자 : 2012. 11. 21

게재확정일자 : 2012. 12. 10

낮은 복잡도를 가지는 채널추정 기법을 필요로 한다. 기존의 MIMO-OFDM 채널추정 방식은 대부분 LS[4] 또는 MMSE[5-6] 기법을 사용한다. LS 기법을 이용한 OFDM 채널추정 방식은 성능이 잡음에 민감하고, MMSE 기법을 이용할 경우 보다 나은 성능을 얻을 수 있지만 자기공분산(auto-covariance) 행렬과 교차공분산(cross-covariance) 행렬 계산으로 인하여 상당히 많은 계산량을 요하게 된다. 또한, MIMO 시스템에서 LS 기법을 이용할 경우에는 수신 안테나들과 송신 안테나들에 대한 모든 채널들을 추정하여야 하므로, 선형 보간법(linear interpolation)이 필요하며 이에 따른 성능 저하를 유발하게 된다.

MIMO-OFDM은 채널추정을 위해 프리앰블 데이터를 사용하는데, 프리앰블 파일럿(pilot) 배열은 크게 block-type 파일럿 배열과 comb-type 파일럿 배열로 나뉘어 진다. block-type 파일럿 배열은 일정 주기를 가지는 OFDM 심볼(symbol)들의 모든 부반송파들에 파일럿 톤(tone)을 심는 것을 의미하고, comb-type 파일럿 배열은 각 OFDM 심볼에 일정량의 파일럿 톤들을 심는 것을 의미한다[7]. 본 논문에서는 block-type 파일럿 배열만을 고려한다.

본 논문에서는 block-type 파일럿 배열 채널 추정을 LMS[8]와 같은 적응 알고리즘을 이용하여 LS 기법에 비해 상당히 향상된 성능을 얻는 채널추정 기법을 제안한다. 제안된 알고리즘은 시간영역에서 LMS 적응 알고리즘을 이용하여 채널을 추정하고 추정된 벡터를 FFT를 통해 주파수 영역으로 변환한 다음 원하는 신호의 검출을 위해 검파기로 보낸다. 이 방식은 전송 데이터와 수신 데이터의 단순 비교 방법을 사용하는 LS 기법에 비해 낮은 추정오차를 가질 뿐만 아니라, 자기공분산 행렬 및 교차공분산 행렬을 계산할 필요가 없으므로 MMSE와 비교하여 낮은 복잡도를 가진다. 또한, 제안된 기법을 MIMO에 적용하기 위해 수정된 block-type 파일럿 배열 프리앰블 구조를 제시한다. 제안된 LMS 알고리즘 기반의 채널추정 방식과 프리앰블 구조는 MIMO를 위한 선형 보간법이 필요 없으므로 선형 보간법으로 인한 성능 저하의 문제점이 없다는 장점을 가진다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 2장에서는 MIMO-OFDM 시스템의 채널추정을 위한 수신신호 모델을 제시하였고, 3장에서는 제안된 LMS 기반의

채널추정 알고리즘 및 프리앰블 구조에 대하여 설명하였다. 4장에서는 제안된 채널추정 방식의 성능평가를 위한 컴퓨터 시뮬레이션 결과를 제시하였으며, 마지막으로 5장에서 본 논문의 결론을 맺는다.

II. 수신신호 모델

MIMO-OFDM 통신 시스템은 다중 송신/수신 안테나를 사용하므로, 송신안테나와 수신안테나의 수를 N_T 와 N_R 로 가정한다. 시간영역의 이산 샘플 인덱스 k 에서, j 번째 수신안테나에 대한 수신신호는 식 (1)로 주어진다.

$$\begin{aligned} \underline{r}^{(j)}(k) = & \underline{h}^{(n,j)H} \underline{s}^{(n)}(k) + \sum_{i=1, i \neq n}^{N_T} \underline{h}^{(n,j)H} \underline{s}^{(i)}(k) \\ & + \underline{v}^{(j)}(k), \\ & n = 1, \dots, N_T, j = 1, \dots, N_R \end{aligned} \quad (1)$$

식 (1)에서 $\underline{h}^{(n,j)} = [\underline{h}_L^{(n,j)}, \dots, \underline{h}_1^{(n,j)}]^T$ 는 (n,j) 번째 송/수신안테나에 대한 채널 탭(tap)들을 포함하는 크기 L 의 채널 벡터이고, n 과 j 는 송신안테나와 수신안테나의 인덱스들이며, L 은 탭 수를 나타낸다. 또한, $\underline{s}^{(n)}(k)$ 는 n 번째 송신안테나에 대한 시간영역 신호이고 $\underline{v}^{(j)}(k)$ 는 j 번째 안테나에 대한 평균이 0이고 분산이 σ^2 인 백색 가우시안 잡음(AWGN; additive white Gaussian noise)이다. 식 (1)에서 H 는 켈레복소수 전치(transpose)를, $\underline{\cdot}$ 는 시간영역 신호 및 데이터를 나타내며, $\sum_{i=1, i \neq n}^{N_T} \underline{h}^{(n,j)H} \underline{s}^{(i)}(k)$ 은 (n,j) 번째 송/수신안테나에 대한 신호의 간섭신호로서 작용하게 된다. 채널의 출력은 송신신호와 채널 탭들의 컨벌루션(convolution) 형태이므로 탭 벡터들의 원소들은 L 부터 1로의 역순으로 표현되었다. 본 논문에서는 한 심볼안에서 채널은 변하지 않는다고 가정한다.

III. MIMO-OFDM 시스템을 위한 LMS 기반의 채널추정

Block-type 프리앰블 기반의 MIMO-OFDM 채널

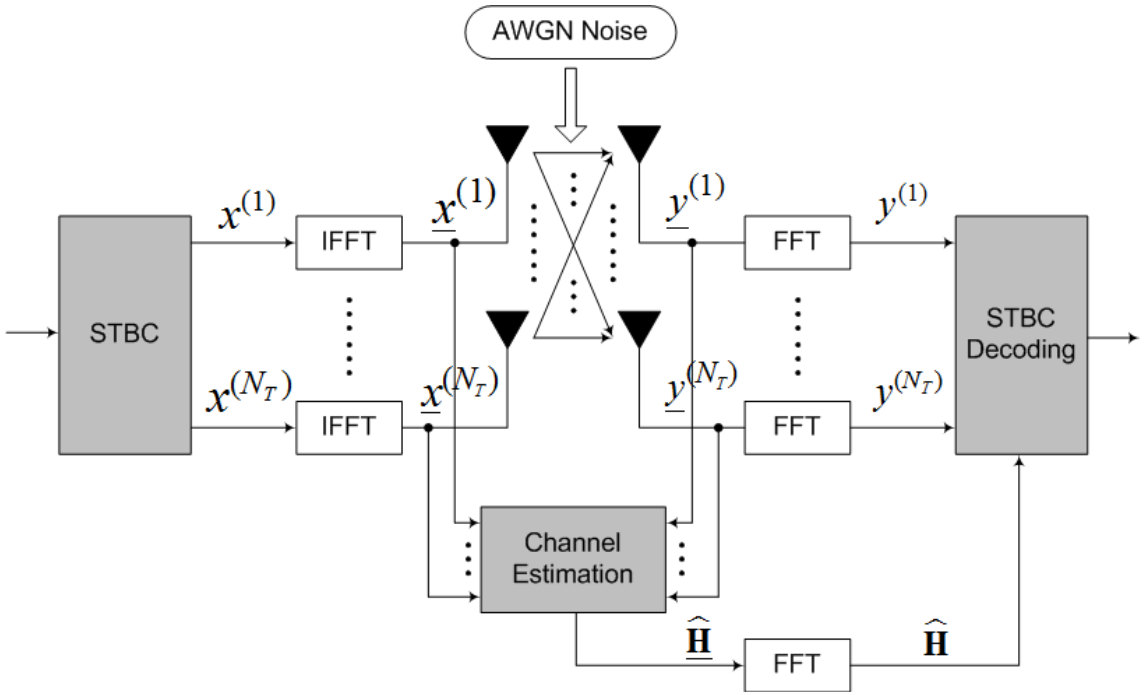


그림 1. LMS 적응 알고리즘 기반의 MIMO-OFDM 채널추정 구조
 Fig. 1 Architecture of MIMO-OFDM channel estimation based on LMS adaptive algorithm

추정에 주로 사용되는 LS와 선형 보간법 혼용 방법은 잡음에 민감하고 선형 보간법에 의한 성능저하 등의 문제점을 가진다. 이를 개선하기 위해 MIMO-OFDM 통신시스템을 위한 LMS 적응 알고리즘 기반의 채널추정 기법[9]과 제안된 시스템에 적합한 프리앰블 파일럿 구조를 제안한다. 그림 1은 본 논문에서 제안한 MIMO-OFDM 기반의 통신 시스템 구조를 나타낸다. IFFT(inverse fast Fourier transform) 후의 시간 영역 데이터로 LMS 알고리즘의 입력 데이터로 사용하여 각각의 채널을 추정하게 되고, 추정된 채널에 FFT를 취한 뒤 각 사용자별 신호를 검출하는데 사용한다.

3.1. 채널 추정을 위한 LMS 적응 알고리즘

그림 1에서 $x^{(n)}$ 은 block-type 배열을 가지는 n 번째 송신안테나에 대한 주파수영역 프리앰블 파일럿이고, $\underline{x}^{(n)}$ 은 IFFT 후의 시간영역 프리앰블 데이터를,

$y^{(j)}$ 는 시간영역에서의 j 번째 수신안테나에 대한 출력값을 의미한다. 본 논문에서는 $\underline{x}^{(n)}$ 을 LMS 알고리즘의 입력신호로 $y^{(j)}$ 을 LMS 알고리즘의 학습신호(reference signal)로 사용하여 채널을 추정한다.

채널추정을 위한 LMS 알고리즘 구조는 그림 2에서 보여진다. LMS 알고리즘에 사용되는 수식표현은 다음과 같다. LMS 알고리즘 출력값은 식 (2)로 주어진다.

$$\underline{u}^{(n,j)}(k) = \hat{\underline{h}}^{(n,j)H}(k) \underline{x}^{(n)}(k) \quad (20)$$

식 (2)에서 $\hat{\underline{h}}^{(n,j)}(k) = [\hat{h}_L^{(n,j)}, \dots, \hat{h}_1^{(n,j)}]^T$ 는 (n,j) 번째 송/수신안테나에 대해 추정되어 지는 탭 벡터이고, $\underline{x}^{(n)}(k) = [x_1^{(n)}, \dots, x_L^{(n)}]^T$ 는 입력신호들을 원소로 가지는 크기 L 의 입력 벡터이다. 추정하고자 하는 $\hat{\underline{h}}^{(n,j)}(k)$ 는 식 (3)의 LMS 알고리즘에 의해 적응된다.

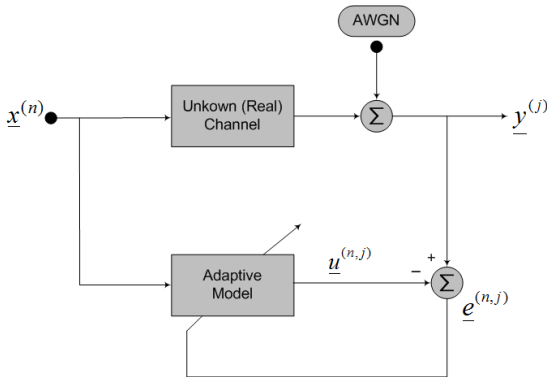


그림 2. MIMO-OFDM 채널추정을 위한 LMS 알고리즘 구조

Fig. 2 Architecture of LMS algorithm for MIMO-OFDM channel estimation

$$\hat{\mathbf{h}}^{(n,j)}(k+1) = \hat{\mathbf{h}}^{(n,j)}(k) + 2\mu \mathbf{x}^{(n)}(k) e^{(n,j)*}(k) \quad (3)$$

식 (3)에서 $\mu (> 0)$ 는 알고리즘의 수렴속도를 제어하는 스텝 크기(step-size) 매개변수이고, *는 복소수 켄쥬게이션 (complex conjugation)을 나타낸다. 추정 오차 신호는 식 (4)로 주어진다.

$$e^{(n,j)}(k) = y^{(j)}(k) - \underline{u}^{(n,j)}(k) \quad (4)$$

정확한 L 을 모르는 경우에는 탭수 추정 알고리즘을 사용하거나, L 값보다 충분히 큰 수의 탭 벡터를 사용한다. 충분히 큰 수의 탭 벡터를 사용할 경우, 채널추정 후 다른 값들에 비해 현저히 작은 절대 값을 가지는 탭들은 무시한다(예를 들어 잡음 분산보다 작은 전력을 가지는 탭들은 무시한다). LMS 알고리즘을 사용하여 추정된 채널벡터들은 FFT를 거쳐 검파기로 보내지고, 원하는 신호 추출을 위해 사용된다.

3.2. 채널 추정을 위한 프리앰블 구조

수식 (4)의 j 번째 수신안테나에 대한 출력은 식 (5)로 주어진다.

$$y^{(j)}(k) = \underline{\mathbf{h}}^{(n,j)} H \underline{\mathbf{x}}^{(n)}(k) + \sum_{i=1, i \neq n}^{N_T} \underline{\mathbf{h}}^{(n,j)} H \underline{\mathbf{x}}^{(i)}(k) + v^{(j)}(k) \quad (5)$$

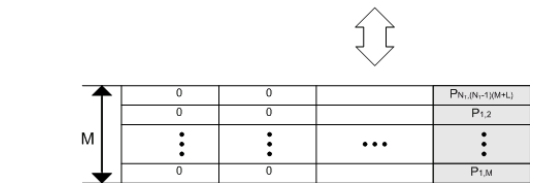
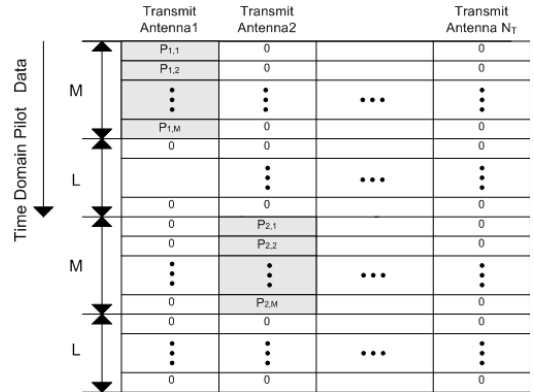


그림 3. LMS 적응 알고리즘 기반 채널추정을 위한 IFFT 후의 시간영역 Block-Type 파일럿 프리앰블 구조

Fig. 3 Structure of block-type pilot preamble in time domain after IFFT for channel estimation based on LMS adaptive algorithm

식 (5)의 $\sum_{i=1, i \neq n}^{N_T} \underline{\mathbf{h}}^{(n,j)} H \underline{\mathbf{x}}^{(i)}(k)$ 는 (n,j) 번째 송/수

신안테나에 대한 채널 $\underline{\mathbf{h}}^{(n,j)}$ 를 추정할 시 간섭신호로 간주되므로, 일반적인 프리앰블 구조를 가지는 파일럿 데이터로는 원하는 채널을 추정하기 어렵다. 이와 같은 문제없이 LMS 알고리즘을 사용하여 채널을 추정하기 위하여, 그림 3에서 제시된 IFFT후의 시간영역 프리앰블 파일럿 구조를 사용한다. 그림 3에서 M 은 LMS 알고리즘의 채널 임펄스 응답(impulse response)을 의미한다. 예를 들어 각 안테나에 대하여 LMS 알고리즘으로 채널추정을 위해 500개의 시간영역 파일럿 데이터를 사용하였다면, $M=500$ 이 된다. 제안된 구조는 (n,j) 번째 송/수신안테나에 대한 채널 탭들을 추정할 시에 해당 채널의 입력 값들만 0이 아닌 값을 가지고, 다른 채널에 대한 입력 값들은 0을 가지므로 다른 채널에 대한 영향을 받지 않는다. 또한, block-type 배열 프리앰블을 MIMO 시스템에서 사용할 시 다른 채널의 영향을 제거하기 위해 고려되는 선형 보간법을 사용하지 않으므로 선형 보간으

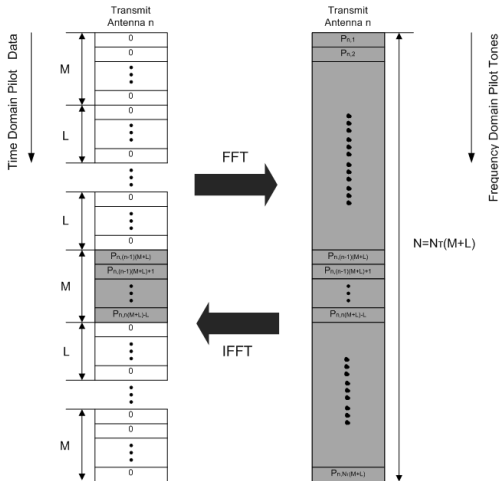


그림 4. n 번째 수신 안테나를 위한 시간영역과 주파수영역에서의 프리앰블 파일럿 구조

Fig. 4 Structure of preamble pilot in time domain and frequency domain for n th receiving antenna

로 인한 오차를 제거 할 수 있다. 제안된 프리앰블에 FFT를 취하면 일반적인 block-type 배열 프리앰블 파일럿 구조를 가진다. 그림 4는 n 번째 수신 안테나를 위한 시간영역과 주파수영역에서의 프리앰블 파일럿 구조를 보인다. 제안된 파일럿 구조는 시간영역에서 프리앰블 데이터를 조절할 수 있으므로 낮은 PAPR(peak-to-average power)[10]을 얻을 수 있다.

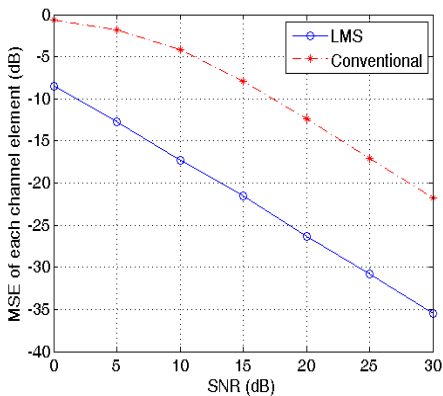


그림 5. 802.11n 채널모델 D에 대한 LMS와 LS 및 선형보간법 기반의 채널추정 성능 비교

Fig. 5 Comparison of channel estimation performance of LMS and LS with linear Interpolation for 802.11n channel model D

IV. 컴퓨터 시뮬레이션

본 장에서는 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 제안된 LMS 적응 알고리즘 기반의 시간영역 채널추정 방식의 성능을 LS와 선형보간법을 혼용한 방법과 비교한다. 시뮬레이션을 위해 2×2 MIMO-OFDM 시스템과 1024 포인트 FFT/IFFT를 고려하였다. 또한, LMS 알고리즘에 대한 시뮬레이션을 위해 본 논문에서 제안된 프리앰블 구조를 갖는 파일럿을 사용하였고, LS를 기반으로 하는 기존의 채널추정 방식을 위해서는 일반적인 MIMO-OFDM 프리앰블 파일럿 구조를 사용하였다. 본 시뮬레이션에서는 채널추정 성능 비교를 위하여 MSE(Mean-Square Error)를 사용 하였는데, 모든 채널에 대한 MSE 값을 구한 뒤 평균을 취한 최종 값을 비교하였다.

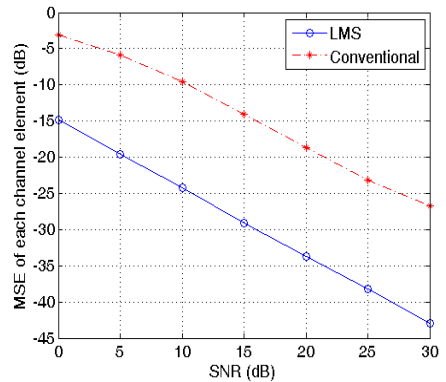


그림 6. ITU Pedestrian 채널 A에 대한 LMS와 LS 및 선형보간법 기반의 채널추정 성능 비교

Fig. 6 Comparison of channel estimation performance of LMS and LS with Linear Interpolation for ITU Pedestrian Channel A

그림 5는 802.11n 채널모델 D[11]에 대한 LMS 기반의 제안된 시간영역 채널추정 알고리즘과 LS 및 선형보간법 기반의 채널추정 성능 비교를 위해 주파수 영역의 각 톤별 채널 추정 MSE 값을 비교해 놓은 결과이다. 그림으로부터 각각의 프리앰블 구조를 사용하였을 경우, 제안된 LMS 채널추정 알고리즘과 선형보간법 기반의 채널추정은 10dB 이상의 MSE 성능차이를 가지는 것을 확인할 수 있다. 그림 6은 ITU Pedestrian A 채널모델에 대한 두 채널추정 방식의

성능 비교 결과이다. 그림 5와 유사하게 두 방식 사이에는 10dB 이상의 MSE 성능차이가 나타난다. 그림 7과 그림 8은 각각 ITU Vehicular A 채널모델과 i.i.d 12-tap exponential decaying FIR(finite impulse

된 방식과 기존의 채널추정 방식에 5dB 이상의 MSE 성능차이가 있는 것을 확인할 수 있다. 그림 7과 그림 8에서 고려된 채널들에 그림 5와 그림 6에서 고려된 채널들에 비해 보다 큰 탭 지연이 존재하여 두 방식 간에 작은 MSE 성능차이가 발생하였다.

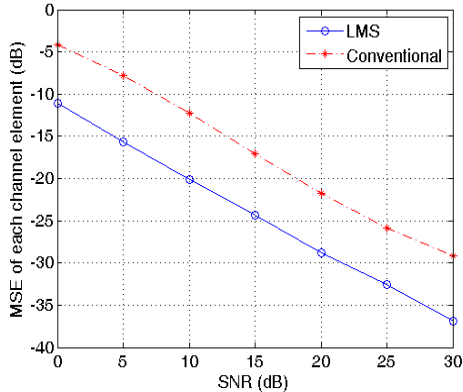


그림 7. ITU Vehicular 채널 A에 대한 LMS와 LS 및 선형보간법 기반의 채널추정 성능 비교
Fig. 7 Comparison of Channel Estimation Performance of LMS and LS with Linear Interpolation for ITU Vehicular Channel A

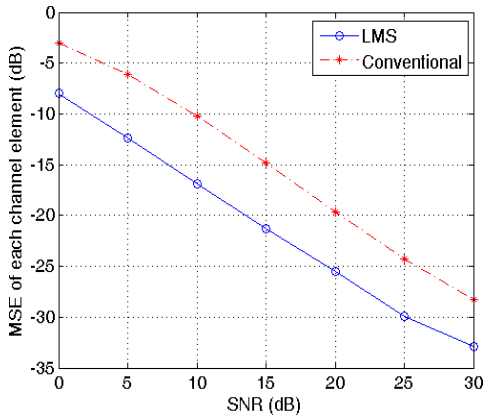


그림 8. i.i.d 12-tap Exponential Decaying FIR 채널에 대한 LMS와 LS 및 선형보간법 기반의 채널추정 성능 비교

Fig. 8 Comparison of Channel Estimation Performance of LMS and LS with Linear Interpolation for i.i.d 12-tap Exponential Decaying FIR Channel

response)[12] 채널에 대한 제안된 방식과 기존의 방식에 대한 성능 비교 결과이다. 두 그림으로부터 제안

V. 결론

본 논문에서는 고속 및 대용량의 데이터 전송을 위한 이동통신 시스템의 핵심 기술인 MIMO-OFDM을 위한 효율적인 채널추정 방식을 제안하였다. 제안된 채널추정 방식은 시간영역에서 LMS 적응 알고리즘을 사용하여 채널을 추정하고, FFT를 취한 뒤 원하는 신호 검출을 위해 검파기로 채널추정 결과를 전송한다. 이 방식은 기존의 LS와 선형 보간법을 혼용하여 사용한 채널추정 방식에 비해 낮은 추정오류를 가지며, 채널추정 성능이 우수한 MMSE 방식의 채널추정 방식에 비해 낮은 계산 복잡도를 가진다. 또한, MIMO-OFDM 시스템과 제안된 채널추정 방식에 적합한 프리앰블 파일럿 구조는 다른 안테나의 송수신에 의한 간섭에 영향을 받지 않고, 선형 보간법으로 인한 성능 저하를 제거할 수 있도록 설계되어 있다. 제안된 채널추정 알고리즘과 프리앰블 파일럿 구조의 성능은 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 확인 되었다.

감사의 글

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2012-0008837)
이 논문은 2012학년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었음.

참고 문헌

- [1] Y. Jung, J. Him, S. L. H. Y, and J Kim, "Design and implementation of MIMO-OFDM baseband processor for high-speed sireless LANS", IEEE Trans. on Circuit and Systems-II: Express Briefs, Vol. 545, No. 7, pp.

631-635, July 2007.

- [2] 박기식, "페이딩 채널에서 MMSE-OSUC 수신기를 적용한 MIMO 시스템의 성능 분석", 한국전자통신학회논문지, 6권, 5호, pp. 732-729, 2011.
- [3] 김성권, "저전력 OFDM 모뎀 구현을 위한 IVC 설계", 한국전자통신학회논문지, 3권, 2호, pp. 90-96, 2008.
- [4] W.G. Jeon, K.H. Paik, and Y.S. Cho, "An Efficient Channel Estimation Technique for OFDM Systems with transmitter diversity", IEICE Trans. on Communications, Vol. E84-B, pp. 967-974, April 2001.
- [5] Y. Li, "Simplified Channel Estimation for OFDM Systems with Multiple Transmit antennas", IEEE Trans. on Wireless Communications, Vol. 1, pp. 67-75, Jan. 2004.
- [6] S. Zhou, B. Muquet, and G.G. Giannakis, "Subspace-Based (Semi-) Blind Channel Estimation for Block Precoded Space-Time OFDM". IEEE Trans. on Signal Processing, Vol. 50, pp. 1215-1228, May 2002.
- [7] Sinem Coleri, Mustafa Ergen, Anuj Puri, and Ahmad Bahai, "Channel Estimation Techniques Based on Pilot Arrangement in OFDM Systems", IEEE Trans. on Broadcasting, Vol. 48, pp. 223-229, Sept. 2004.
- [8] B. Widrow and S. D. Stearns, Adaptive Signal Processing. Englewood Cliffs, NJ : Prentice-Hall, 1985.
- [9] 황석승, "적응 알고리즘을 이용한 MIMO-OFDM 통신환경에서의 채널추정 기법", 한국전자통신학회 2009년 춘계 종합학술대회, 3권, 1호, pp. 376-379, 2009.
- [10] S. H. Muller and J. B. Huber, "OFDM with reduced peak-to-average power ratio of multicarrier modulation by selected mapping", Elec. Lett., Vol. 32, No. 22, pp. 2056-2057, Oct. 1996.
- [11] C. Yin, G. Wen, and Z. Feng, "Simulation research of 802.11n channel model D in NS2", In Proceedings of Computer Science and Information Technology (ICCSIT), 2010 3rd IEEE International Conference, Vol. 7, pp. 530-533, July, 2010
- [12] A. V. Oppenheim and R. W. Schaffer, Discrete-Time Signal Processing(3rd Edition), Englewood Cliffs, NJ : Prentice Hall Signal Processing, 2009.

저자 소개



황석승(Suk-Seung Hwang)

1997년 2월 광운대학교 제어계측공학과 졸업

2001년 6월 University of California, Santa Barbara, Electrical & Computer Engineering Department 대학원 졸업(공학석사)

2006년 University of California, Santa Barbara, Electrical & Computer Engineering Department 대학원 졸업(공학박사)

2006.5~2008.3 삼성전자 통신연구소 책임연구원

2008.4~현재 조선대학교 메카트로닉스공학과 조교수

※ 관심분야 : 적응신호처리, 위치추정, 채널추정, 이동로봇용 위치추정, 간섭제거