

## 실내 무선 채널에서 OFDM 시스템의 등화 기법

한 문 용, 이 영 진, 김 근 회, 서 종 수  
연세대학교 전기전자공학과  
전화 : 02-2123-2878 / 핸드폰 : 017-289-2418

### An Equalization Technique for OFDM Systems in Indoor Wireless Channel

Mun-Yong Han, Young-Jin Lee, Geun-Hoe Kim, Jong-Soo Seo  
Dept. of Electrical and Electronic Eng., Yonsei University  
E-mail : necesario@hanmail.net

#### Abstract

Recently, as demands for super-high speed broad band wireless multimedia service increase, variable researches to develop wireless LAN have been carried out. In this paper, we propose and analyze LS(Least Squares)-PSA(Pilot Symbol Assisted) equalizer which compensates for each subcarrier of different attenuations and phase response for OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing)-based indoor wireless LAN systems. The proposed equalizer enhances the  $E_b/N_0$  performance of 3dB and 4dB at BER=  $10^{-2}$  as compared with LS equalizer in AWGN channel and indoor wireless channel respectively.

#### I. 서론

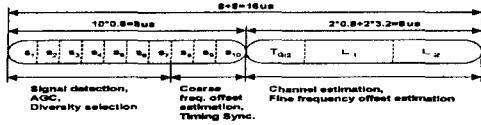
최근 초고속 광대역의 무선 멀티미디어 서비스를 제공하기 위한 전송방식으로 OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 방식 IEEE 802.11a 에 대한 연구개발이 활성화되고 있다. OFDM 전송시스템은 다중반송파를 사용하여 부채널의 개수가 클 때 채널특성은 각각의 부채널 대역폭 내에서 주파수 비선형적 페이딩이 되며 이상적인 수신을 위해서는 각 부채널이 flat한 진폭과 선형적인 위상응답을 가져야 한

다. OFDM 전송시스템에서는 부채널들이 각기 다른 감쇄와 위상 응답을 가지므로 부채널 각각에 대한 채널 등화가 필요하다[1]. OFDM 전송시스템에서는 수신기의 복잡도를 고려하여 전송된 패킷 데이터의 훈련심볼열을 이용하여 채널을 등화하는 LS(Least Squares) 알고리즘[2]을 이용한다. LS 알고리즘을 이용한 등화는 채널 추정시간이 짧으며 복잡도가 낮다. 그러나 LS 등화는 SNR이 높은 경우에는 채널 추정의 정확도가 높지만, SNR이 낮은 경우에는 그 정확도가 크게 떨어지고 채널에서 첨가되는 잡음 및 채널의 시변 특성에 따라 영향을 크게 받는 단점이 있다. 따라서 본 논문에서는 LS 등화의 단점을 보완하기 위해서 파일럿 심볼을 이용한 LS(Least Squares)-PSA(Pilot Symbol Assisted) 등화기를 제안하고 그 성능을 분석한다.

#### II. OFDM 방식 실내 무선 LAN 시스템

IEEE 802.11a에서는 5 GHz 대역을 사용하는 OFDM 방식 고속 무선 LAN의 물리계층 및 PLCP(Physical Layer Convergence Procedure)를 규정하고 있다[3]. 그림 1은 10개의 짧은 훈련 심볼( $s_1 \sim s_{10}$ )과 2개의 긴 훈련 심볼( $L_1, L_2$ )로 구성된 IEEE 802.11a WLAN 전치부호를 나타낸다. 짧은 훈련 심볼( $s_1 \sim s_7$ )이 전송될 때에 신호 검출, AGC(Automatic Gain Control)와 Diversity를 선택하게 되고 짧은 훈련 심볼( $s_8 \sim s_{10}$ )이 전송될 때는 대략적 주파수 율셋을 추정하고 타이밍 동기를 수행하게 된다. 긴 훈련 심볼  $L_1$ 과

$L_2$ 가 전송될 때에는 채널 추정, 미세 주파수 오프셋을 추정하게 된다.



$T_{GI2}$  : 훈련심볼 보호구간 주기

그림 1. IEEE 802.11a WLAN 전치부호

IEEE 802.11a WLAN은 48개의 데이터 부반송파와 4개의 파일럿 부반송파로 구성되는 총 52개의 부반송파를 사용하여  $3.2\mu s$  주기의 유효 데이터 심볼을 생성하며  $0.8\mu s$ 의 보호구간을 갖는다. 52개의 부반송파는 64-point FFT를 사용하여 다중화되며, 총 64개의 부반송파 중에서 52개를 제외한 나머지 12개 부반송파는 가상 부반송파로서 주파수 영역 펄스 성형 효과를 나타낸다. 샘플링 주기는  $T_s = T_{FFT}/64 = 50$  ns이고 전송 대역폭은 20MHz이며 DC를 나타내는 0번 부반송파를 포함한 실제 부반송파들의 점유 대역폭은  $20MHz \times 53/64 = 16.6MHz$ 이다. 부호화율과 변조 방식은 전송 속도에 따라 다르게 적용되며 심볼 주기는 전송 속도에 관계없이  $4\mu s$ 로 일정하다. IEEE 802.11a WLAN 시스템의 동작구성도는 그림 2와 같다.

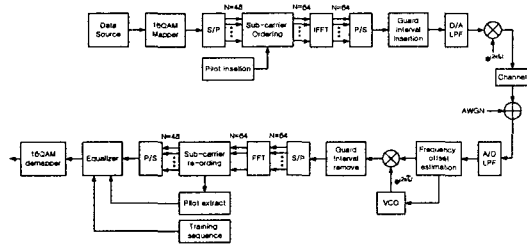


그림 2. IEEE 802.11a WLAN 시스템 동작구성도

### III. 제안한 채널 등화 기법

그림 3은 주파수 영역의 긴 훈련 심볼을 나타내며 그림 1과 같이  $L_1$ 과  $L_2$ 로 구성된 긴 훈련 심볼은 52개의 부반송파에 이미 알고 있는 BPSK 시퀀스를 전송하여 채널을 추정한다. 이렇게 추정된 주파수 영역 채널 응답을 이용하여 등화를 수행하고 4개의 파일럿 신호를 이용하여 위상 회전을 검출하는 PSA 등화 방법으로 유효 데이터의 위상을 보상해준다.

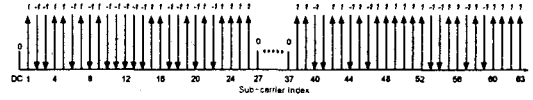


그림 3. 주파수 영역의 긴 훈련심볼

주파수 영역에서 채널을 통과한 수신된 신호  $Y(k)$ 는 식 (1)과 같다.

$$Y(k) = H(k) \cdot X_L(k) + W(k) \quad (1)$$

여기서,  $X_L(k)$ 는 주파수 영역에서의 긴 훈련 심볼

$H(k)$ 는 주파수 영역에서의 채널 응답

$W(k)$ 는 가산 백색 가우시안 잡음(AWGN)

LS 채널 추정 방법을 이용하여 구한 채널 응답  $C(k)$ 는 식 (2)와 같이 표현되며 주파수 영역의 긴 훈련 심볼  $X_L(k)$ 는 그림 3과 같이  $-1, 0, 1$ 로만 구성되어 있으므로  $(-1)^a$ 으로 표현할 수 있다.

$$C(k) = \frac{Y(k)}{X_L(k)} = Y(k) \cdot X_L^*(k) \quad (2)$$

LS 채널 추정 방법으로 구한 채널 응답  $C(k)$ 를 이용하여 등화를 하면 잔여 주파수 오프셋이 존재하므로 추정된 채널 응답이 시변 특성을 보이게 되며 이러한 시변 특성에 따른 위상 변화가 생긴다. 시변 특성의 주요 원인이 잔여 주파수 오프셋에 따라 동일한 심볼 내에 각 부반송파의 위상 변화는 동일하므로 파일럿 신호를 이용하여 위상 회전을 검출하고 보상한다. AWGN 및 잔여 위상 오프셋의 존재에 따라 식 (3)과 같이 부반송파의 위치에 따른 위상 변화가 나타난다. 긴 훈련심볼과 유효데이터 심볼의 파일럿 심볼간의 위상차를 얻기 위해 식 (4)와 같이 공액 복소쌍곱을 연산하고 4개의 파일럿 신호를 이용하여 식 (5)와 같이 측정된 위상을 평균하여 보상한다.

$$Y_{l,k} = \frac{\sin \pi f_r}{N \sin \pi \frac{f_r}{N}} e^{j\pi f_r(N-1)/N} \cdot P_{l,k} + ISI(f_r) + AWGN \quad (3)$$

$$\text{여기서, } ISI(f_r) = P_{l,k} \sum_{m=0}^{N-1} \frac{\sin \pi f_r}{N \sin \frac{\pi(m-k+f_r)}{N}} \cdot e^{j\pi f_r(N-1)/N} e^{-j\pi(m-k)/N}$$

## 실내 무선 채널에서 OFDM 시스템의 등화 기법

$$Z_{l,k} = Y_{l,k}^* \cdot P_{l,k} \quad (4)$$

$$\theta_r = \arg \left( \sum_{k=0}^3 Z_{l,k} \right) \quad (5)$$

여기서,  $P_{l,k}$ 는  $l$  번째 OFDM 심볼의  $k$  번째 파일럿 신호이며  $f_r$ 는 잔여 주파수 오프셋이다.

식 (2)과 같이 LS 채널 추정 방법을 이용하여 구한 주파수 영역 채널 응답과 식 (5)에서 구한 위상 회전값을 이용하여 유효데이터 심볼을 다음과 같이 보상해준다.

$$\hat{Y}_{l,k} = \frac{Y_{l,k}}{C_k} \cdot e^{-j\theta_r} = \frac{Y_{l,k}}{\hat{C}_{l,k}} \quad (6)$$

$$\text{여기서, } \hat{C}_{l,k} = C_k \cdot e^{j\theta_r}$$

그림 4는 제안한 LS-PSA 등화기 동작 구성도를 보인다. 주파수 영역의 긴 훈련심볼을 이용하여 구한 채널 응답  $C_k$ 와 긴 훈련심볼의 파일럿 심볼과 유효 데이터 심볼의 파일럿 심볼간의 위상차  $Z_{l,k}$ 을 곱하여 부채널의 각기 다른 잡음과 위상 응답  $\hat{C}_{l,k}$ 를 구한다. 채널로 인하여 왜곡된 수신 신호  $Y_{l,k}$ 를 채널 응답  $\hat{C}_{l,k}$ 로 나눔으로서 보상된 수신신호  $\hat{Y}_{l,k}$ 를 얻는다.

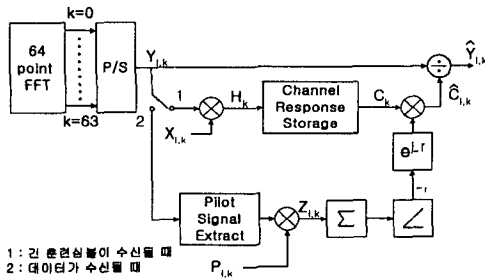


그림 4. 제안한 LS-PSA 등화기 동작구성도

## IV. 전산모의 실험 및 성능 분석

### 1) AWGN 채널에서 LS-PSA 등화기의 성능

그림 5(a)는 LS 등화기를 사용한 경우 OFDM-16QAM의 수신신호 성상도이다. 한번의 채널

추정으로 100 바이트의 데이터를 보상해야 하므로 채널에서 첨가되는 잡음 및 채널의 시변 특성에 따라 영향을 받게 되며 잔여주파수 오프셋의 영향으로 ICI가 발생하므로 채널 추정의 정확도가 크게 떨어진다. 그림 5(b)는 LS-PSA 등화기를 사용한 경우 OFDM-16QAM의 성상도이다. LS-PSA 등화기는 추정된 채널 응답을 이용하여 등화를 한 뒤에 파일럿 신호를 이용하여 시변 특성에 따른 위상 변화를 측정하고 보상함으로써 정확한 채널 추정을 할 수 있다. 그림 6은 AWGN 채널에서 패킷 길이가 다른 LS 등화기와 LS-PSA 등화기를 사용하였을 때 OFDM-16QAM의 수신 BER 성능을 비교하였다. 패킷 길이가 100바이트일 때 LS 등화기와 비교하여 LS-PSA 등화기는 BER =  $10^{-2}$  에서 약 3dB의  $E_b/N_0$  성능 향상을 가진다. 또한 LS-PSA 등화기는 패킷 길이 증가에 따른 성능 열화가 거의 없음을 알 수 있다.

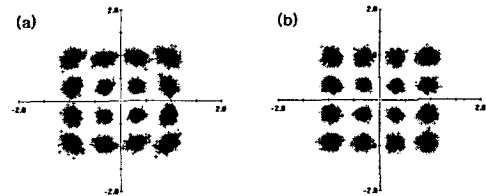


그림 5. AWGN 채널에서 OFDM-16QAM의 성상도( $E_b/N_0=20\text{dB}$ )

- (a) LS 등화기를 사용한 경우
- (b) LS-PSA 등화기를 사용한 경우

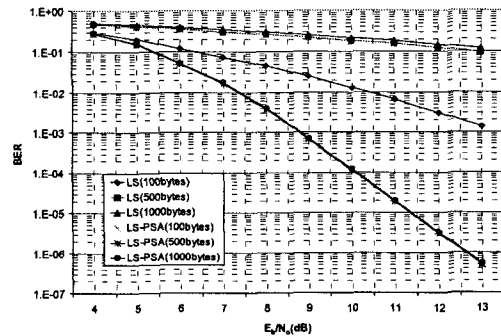


그림 6. AWGN 채널에서 LS-PSA 등화기를 사용한 OFDM-16QAM의 BER 성능

### 2) 실내 무선 채널에서 LS-PSA 등화기의 성능

그림 7(a)는 실내무선 채널에서 LS 등화기를 사용한 경우 OFDM-16QAM의 수신신호 성상도이다. 실내

무선 채널의 특성에 따라 AWGN 채널보다 위상회전 효과가 더욱 크게 나타나며 이로 인해 시스템의 성능 열화가 발생한다. 그림 7(b)는 LS-PSA 등화기를 사용한 경우 OFDM-16QAM의 수신신호 정상도이며 실내 무선 채널에서 정확한 채널 추정과 채널 등화가 이루어졌음을 알 수 있다. 그림 8은 실내 무선 채널에서 패킷 길이가 다른 LS 등화기와 LS-PSA 등화기를 사용하였을 때 OFDM-16QAM의 수신 BER 성능을 비교하였다. 패킷 길이가 100바이트일 때 LS 등화기와 비교하여 LS-PSA 등화기는 BER=10<sup>-2</sup>에서 약 4dB의 E<sub>b</sub>/N<sub>0</sub> 성능 향상을 가진다. 또한 LS-PSA 등화기는 패킷 길이가 증가함에 따라 파일럿 심볼을 이용하여 채널에 의한 잔여 주파수 율셋을 효율적으로 보상함으로써 실내 무선 채널에서도 성능 열화가 거의 없음을 알 수 있다.

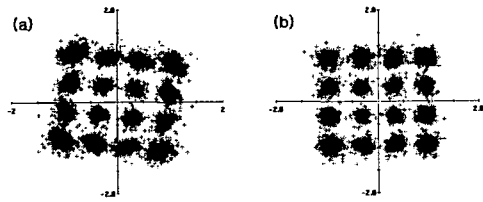


그림 7. 실내 무선 채널에서 OFDM-16QAM의 정상도(E<sub>b</sub>/N<sub>0</sub>=20dB)  
 (a) LS 등화기를 사용한 경우  
 (b) LS-PSA 등화기를 사용한 경우

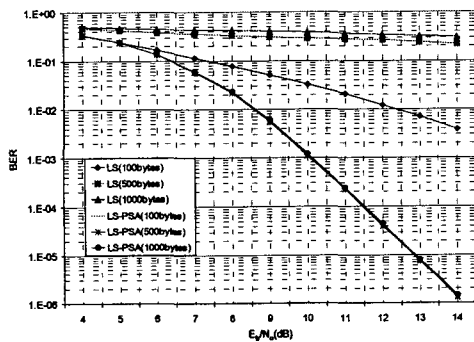


그림 8. AWGN 채널에서 LS-PSA 등화기를 사용한 OFDM-16QAM의 BER 성능

## V. 결론

제한한 채널 등화 기법은 다중경로 전파전파 환경에서 OFDM 방식 실내 무선 LAN 수신신호의 진폭과

위상에 대한 주파수 선택적 왜곡을 정확하게 추정하기 위해 LS 알고리즘을 사용하고 시변 특성에 따른 위상 변화를 보상해 주기 위해 파일럿 심볼을 이용한다. LS-PSA 등화기를 사용한 경우 패킷 길이가 100바이트일 때 AWGN 채널과 실내 무선 채널에서 OFDM-16QAM의 수신 BER 성능은 BER=10<sup>-2</sup>에서 각각 3dB와 4dB의 E<sub>b</sub>/N<sub>0</sub> 성능 향상을 가진다. 또한 제한한 채널 등화 기법은 패킷 길이가 증가함에 따라 파일럿 심볼을 이용하여 잔여 주파수 율셋을 정확하게 보상함으로써 실내 무선 채널에서도 성능 열화가 거의 없다. 모의실험결과, 본 논문에서 제안한 채널 등화기는 구조가 간단하고 효율적으로 채널을 등화하므로 OFDM 방식 실내 무선 LAN 시스템의 채널 등화 기술로서 적합하다.

## 참고문헌

- [1] H. Sari, G. Karam, and I. J. Claude, "Transmission Techniques for Digital Terrestrial TV Broadcasting", IEEE Communication Magazine, pp.100-109, February 1995
- [2] Steven M. Kay, Fundamentals of Statistical Signal Processing, Prentice Hall, Inc., 1993
- [3] IEEE 802.11, "Supplement to IEEE standard for information technology specific requirements. Part 11 : Wireless LAN Medium Access Control and Physical Layer specifications : High Speed Physical Layer in the 5 GHz Band," IEEE Std 802.11a, December 1999