OFDM 방식의 차세대 무선 LAN 환경에서 등화기의 성능 분석

The Performance Analysis of Equalizer for Next Generation W-LAN with OFDM System

한경수*, 윤희상*

Kyung-su Han*, Hee-sang Youn*

요 약

무선 LAN(W-LAN)은 IEEE 802.11a, 802.11b의 표준이 제정됨에 따라 전송 속도도 수십 Mbps까지 고속으로 발전되어 왔고, 현재 여러 대학과 기업체에서 무선 LAN(W-LAN)을 많이 보급하고 있으며, 또한 통신 사업자들도 일부 제한된 지역(지하철 구내)에서 W-LAN을 설치하여 일반인에게 서비스하고 있다. 이와 같이 무선 LAN의 확산으로 서비스를 이용하는 사람들이 날로 증가 추세에 있으나 서비스 면에서 문제점들도 대두되고 있다. 특히 건물과 전파의 방해물이 많이 존재하는 도심 지역에서 데이터를 고속으로 전송하려면 상대적으로 주파수가 높아짐에 따라 무선 접속 장치(AP : Access Point)와 이동국(노트북등 단말기)간에 ISI(Inter Symbol Interference)가 발생하여 주파수 선택성 페이딩 채널 환경이 되어 데이터의 끊김과 에러가 발생하는 등 사용자에게 양질의 서비스를 제공하지 못하는 사례가 자주 있어 왔다.

본 논문에서는 다중 경로 채널 환경에서 ISI 영향을 가장 적게 받을 수 있는 OFDM 시스템을 적용하여 성능을 분석 평가 하였다.

데이터 변조 방식으로는 IEEE 802.11a에 근거한 부 반송파의 수가 52개인 BPSK, QPSK, 16QAM 방식을 적용하였고, 구속장이 7이고 부호율이 1/2, 3/4인 천공된 컨벌루셔널 부호를 사용하였으며 성능이 개선됨을 확인하였다.

특히 페이딩의 영향을 많이 받는 무선 채널 환경에서 단일 텝 등화기 및 결정 궤환 등화기(DFE : Decision Feedback Equalizer)를 적용하여 성능이 월등히 향상되고 단말기가 이동 시에도 데이터의 단절 등이 없음을 시뮬레이션을 통해 입증 하였다.

ABSTRACT

This paper describes the performance evaluation and analysis of an Orthogonal Frequency-Division Multiplexing (OFDM) system having the least Inter Symbol Interference (ISI) in a multi-path fading channel environment.

Wireless Local Area Network (W-LAN) in accordance with IEEE 802.11a and IEEE 802.11b provides high-speed transmission to universities, businesses and other various places. In addition, service providers can offer a public W-LAN service on restricted areas such as a subway.

The proliferation of W-LAN has led to greater W-LAN service demands, but problems are also on the rise in offering a good W-LAN service. In particular, urban areas with high radio wave interference and many buildings are vulnerable to deteriorated QoS including disconnected data and errors. For

---

* 호서대학교 전기공학부 정보통신공학과(Dept. of Telecommunication, Scahool of Electricity Eng., Hosseo University)

·논문번호 : 2002-6-6
·접수일자 : 1999년 6월 28일

example, when high-speed data is transmitted in such areas, the relatively high frequency generates ISI between Access Points (AP) and Mobile Terminals (such as a notebook computer), leading to a frequency selective fading channel environment. Consequently, it is difficult to expect a good W-LAN service.

The simulation proves that the OFDM system enables W-LAN to implement QoS in high-speed data transmission in a multi-path fading channel environment.

The enhanced OFDM performance with 52 sub-carriers is verified via data modulation methods such as BPSK, QPSK and 16QAM based on IEEE 802.11a and punched convolutional codes with code rate of 1/2 and 3/4 and constraint length of 7. Especially, the simulation finds that the OFDM system has better performance and there is no data disconnection even in a mobile environment by applying a single tap equalizer and a decision feedback equalizer to a mobile channel environment with heavy fading influence.

Given the above result, the OFDM system is an ideal solution to guarantee QoS of the W-LAN service in a high-speed mobile environment.

I. 서 론

데이터의 전송 속도가 점점 고속화 되므로 무선 다중 채널에서 ISI가 발생하여 주파수 선택성 페이딩 채널 환경이 된다. 무선 다중 경로 채널 환경에서 데이터를 고속으로 전송할 경우 페이딩, 심볼간 간섭 등으로 인하여 신호는 에러가 높아지게 된다. 이러한 에러를 줄이기 위해 ISI를 제거하는 기술과 코딩 및 변복조 기술이 요구된다.

현재 다중 경로 무선 채널에서 고속 전송을 위한 적합한 방식으로 OFDM을 많이 채택하고 있다. 다중 경로 페이딩 무선 채널에서는 심볼 주기가 짧은 고속 데이터 전송 시 단일 반송파 방식을 사용하게 되면 심볼간 간섭이 더욱 심하게 된다. 다중 반송파의 경우 전송 속도는 그대로 유지하면서 각 부 반송파의 심볼 주기를 부 반송파 수만큼 확장 시킬 수 있으므로 단일 텝을 갖는 간단한 등화기로 다중 경로에서 발생할 수 있는 주파수 선택성 페이딩에 잘 적응할 수 있다.

본 논문에서는 IEEE 802.11a에 근거한 OFDM을 사용하였고, 높은 신뢰성을 확보하기 위해 컨벌루셔널 코딩을 적용하였다. 또한 6-Ray 무선 채널 환경에서 LMS(Least Mean Square) 기준에 근거하여 단일 텝 선형 등화기 및 DFE를 적용하므로써 진폭과 위상에 대한 왜곡을 보상, 시스템의 성능을 분석하였다.

II. 무선 채널 모델링

다중 경로에 의한 주파수 선택성 페이딩 채널 환경에서 무선 통신 시스템의 안정성, 신뢰성을 확보하기 위해서는 무선 채널에 대한 분석이 매우 중요하다. W-LAN과 같은 이동 무선 채널은 가시거리의 통신이며 2-Ray 레일레이 채널을 일반적으로 많이 모델로 적용하고 있다. 실제 학교 교내와 같은 한정된 범위에서가 아니라 도심 지역으로의 이동을 고려해 보면 빌딩이나 장애물이 존재하므로 수신측에서는 다중 경로를 통해 들어오는 모든 신호를 수신하게 된다.

LOS(Line of Sight)와 독립적인 L개의 레일레이 페이딩 채널의 합으로 이루어지는 Multi-ray 페이딩 채널에 대한 임펄스 응답은 다음과 같다.[1]

$$h(t,\tau) = \sqrt{2P_s}\,\delta(t) + \sum_{l=1}^{L} \sqrt{P_l}\,h_l(t)\,\delta(\tau - \tau_1) \qquad (1)$$

여기서,

$\delta(t)$: Dirac 델타 함수

$h_l(t)$: 레일레이 분포를 가지는 l 번째 다중 경로 채널의 임펄스 응답

P_s : LOS 성분의 신호 전력

P_l : l 번째 다중 경로 성분의 전력

τ_l : l 번째 다중 경로 성분의 지연 시간

다중 경로로 수신되는 신호의 전체 전력을 P_d라 하면, 라이시안 펙터 K 를 LOS 신호의 전력과 반사되어 들어오는 신호 전력의 비로 나타낼 수 있으며 다음과 같이 표현한다.[2]

$$k = \frac{c}{m} = \frac{a^2}{2\sigma^2} \qquad or, \quad in \quad dB,$$

$$K = 10\log k = 10\log\frac{a^2}{2\sigma^2} \tag{2}$$

여기서, a : 직접파의 크기, σ : 다중 경로의 평균 신호 전력

만일 $k = 0$이면 라이시안 분포는 레일레이 분포가 되며, k가 크면 라이시안 페이딩이 된다.

상기 식 (2)에서 $a^2 = P_s$, $2\sigma^2 = P_d$라 놓으면

$$P_d = \sum_{l=1}^{L} P_l \tag{3}$$

무선 시스템에서는 서로 다른 다중 경로 채널을 비교하기 위하여 다중 경로 채널을 정규화 하기 위한 파라미터를 사용하는데, 이는 평균 초과 지연 시간($\bar{\tau}$)과 실효치 지연확산(τ_{rms})이 주로 사용된다. 평균 초과 지연 시간은 전력 지연 프로파일의 1차 모멘트로서 다음과 같이 표현된다.

$$\bar{\tau} = \sum_{l=1}^{L} \frac{P_l}{P_d}\tau_1 \tag{4}$$

실효치 지연 확산은 전력 지연 프로파일의 2차 모멘트의 제곱근으로서 다음과 같다.

$$\tau_{rms} = \sqrt{\sum_{l=1}^{L} \frac{P_l}{P_d}\left(\tau_1 - \bar{\tau}\right)^2} \tag{5}$$

다중 경로는 송신기에서 발생한 신호가 수신기에 직접 도달하는 직접 경로와 반사 경로 사이에 경로차가 존재하고, 이 경로차 때문에 수신기에 도달하는 시간이 차이가 난다.

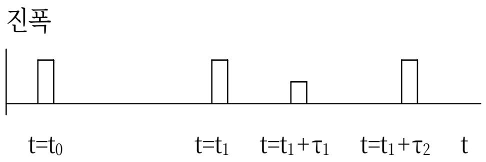


그림 1. 다중 경로에서의 송, 수신기 신호 시간차

Fig. 1. Signal time difference of transmitter and receiver at Multi-path

그림 1은 다중 경로의 무선 채널에서 수신측에 도달하는 신호가 시간차를 가지고 있음을 보여 주고 있다.

여기서 시간차를 $\Delta\tau$ (τ_1, τ_2)라 한다면, 만일 $\Delta\tau$가 한 심볼 주기보다 클 경우에 인접 심볼간 간섭(ISI)이 발생할 수 있다. 경로차가 고정되어 있고 지연 확산이 일정하다면, 고속의 데이터 전송 시스템은 지연 확산으로 인한 심볼간 간섭의 영향을 더 받을 것이다. 고정된 데이터 전송률을 갖는 시스템에 대해 보다 긴 경로차(따라서 더 큰 지연확산)를 갖는 전파 환경은 더 심한 심볼간 간섭을 발생시킬 것이다.[3]

보통 비트 주기의 10% 보다 실효치 지연확산이 크게 되면 등화(Equalization) 를 필요로 하는 환경이 된다. 등화가 필요한 조건을 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$\tau_{rms} > \frac{T_b}{10} \tag{6}$$

여기서 T_b : 비트 주기

W-LAN은 무선 채널 접속 장치인 AP(Access

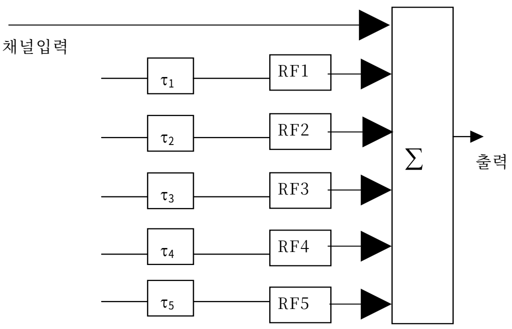


그림 2. 시뮬레이션 채널 모델

Fig. 2. Simulation channel model

Point)와 무선 단말 장치인 NIC(Network Interface Card)의 거리가 500m 이내의 LOS 통신으로 이루어진다. 따라서 본 논문에서는 6-Ray 라이시안 채널을 모델로 사용하였고, 실효치 지연 확산 시간을 150ns로 ARIB(Association of Radio Industries and Businesses)의 측정치를 사용하였다.

III. 단일 텝 선형 등화기

일반적으로 무선 주파수 페이딩 채널에서 심볼간 간섭(ISI) 를 줄이기 위하여 OFDM 시스템이 많이 사용되지만 OFDM 방식만으로는 ISI를 완전히 제거할 수는 없다. 즉, OFDM 방식의 특징인 보호 시간을 충분히 고려한다면 어느 정도의 ISI는 제거되지만, 보호 시간만으로 고속 데이터 전송에서 요구되는 BER을 충분히 향상시키지 못한다. 따라서 등화기가 필요하게 된다. 등화기는 FFT 뒷 단에 적용시킬 경우 부 반송파 수만큼 등화기 수가 필요하게 되어 수행하는데 어려움이 많지만, 보호 시간만으로 OFDM의 직교성이 유지된다면 진폭과 위상 왜곡만 발생할 것이므로 단순한 구조를 가진 단일 텝 등화기로 충분히 성능을 향상 시킬 수 있다.[4]

그림 3은 MMSE(Minimum Mean Square Error)을 기반으로 하는 LMS(Least Mean Square) 등화기의 개략도이며, MMSE 조건은 다음과 같다.

$$\min_{C(k)} \frac{1}{N}\sum_{m=0}^{N-1}\left|Y_m(k)C(k)-X_m(k)\right|^2 \qquad (7)$$

여기서, k는 부채널을 나타내며, $Y_m(k)$는 k번째 부채널에서 수신된 m번째 심볼을 나타내고, $C(k)$는 등화기 계수, $\hat{x}_{m}(k)$는 등화기의 출력, $e(k)$는 k번째 심볼의 에러를 각각 나타낸다.

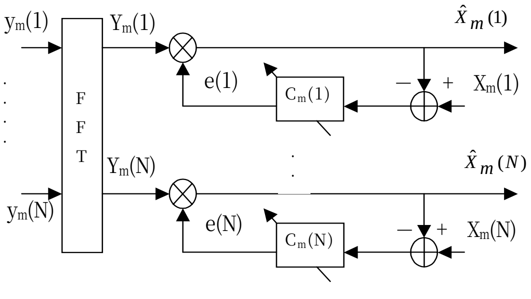


그림 3. OFDM 시스템의 단일 텝 선형 등화기

Fig. 3. Single tap linear equalizer OFDM system

LMS 등화기의 계수 조정식은 다음과 같다.

$$C_{m+1}(k) = C_m(k) + \Delta\varepsilon_m(k)Y^{*}_{m}(k) \qquad (8)$$

여기서 Δ 는 조정 계수이고, $\varepsilon_m(k)$는 오차항으로 다음과 같이 나타낸다.

$$\varepsilon_m(k) = Xm(k) - \hat{x}_{m}(k)$$
$$\hat{x}_{m}(k) = W_m(k)Y_m(k) \qquad (9)$$

여기서 $W_m(k)$는 k번째 부채널에서 수신된 m번째 심볼에 해당되는 가중치를 나타낸다.

IV. 결정 궤환 등화기 (DFE : Decision Feedback Equalizer)

DFE는 그림 4와 같이 두개의 필터로 구성되어진다. 두개의 필터는 feedforward 필터와 feedback 필터를 말한다.

forward 필터에 신호가 입력되고, feedback 필터는 사전에 검출된 심볼에 의해 심볼간 간섭을 줄이는데 사용된다. 두 필터는 모두 심볼 간격 T의 텝 간격(tap spacing)을 가진다.[5]

DFE는 ISI가 심할 경우 선형 등화기 보다 적은 필터 텝을 사용할 수 있지만, 궤환되는 신호에 잘못된 결정으로 에러가 포함되어 있다면 feedback 지연 소자를 통과하는 동안 에러로 잘못된 출력을 발생시켜 치명적인 오류를 야기하게 된다. 그러나 일반적으로 채널에서 발생하는 에러는 짧은 버스트 에러이므로 성능에는 그다지 크게 영향을 미치지 않는다.

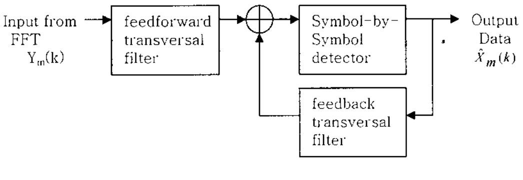


그림 4. 결정 궤환 등화기 (DFE)의 구조

Fig. 4. Block diagram of DFE

Feedforward 부분의 입력은 FFT 를 통과한 신호 시퀀스 $Y_m(k)$가 된다.

DFE에서의 출력은 다음과 같다.[5]

$$\hat{X}_m(t) = \sum_{j=-K_1}^{0} C_j(k) Y_{m-j} + \sum_{j=1}^{K_2} C_j(k) \hat{X}_{m-j}(k) \qquad (10)$$

$\hat{X}_m(k)$는 k번째 부채널에서 수신된 m번째 정보 심볼의 출력이고, $C_j(k)$는 필터의 텝 계수, $\hat{X}_{m-1}(k)$ $\hat{X}_{m-K_2}(k)$는 이전에 검출된 심볼이다.

이 등화기는 feedforward 부분에서 K_1+1개, feedback 부분에서 K_2 개의 텝을 가진다.

feedback 필터 부분에서 사전에 검출된 심볼이 정확하다고 하면 MMSE 의 최소화는 다음과 같다.

$$J(K_1, K_2) = E\left| X_m(t) - \hat{X}_m(t) \right|^2 \qquad (11)$$

Feedforward 필터의 계수는 다음과 같은 선형 방정식으로 된다.

$$\sum_{j=-K_1}^{0} \Psi_{lj} C_j(k) = f_{-1}^{*}(k), \qquad l = -K_1 \ldots\ldots\ldots, -1, 0$$

여기서, $\Psi_{lj} = \sum f_m^{*}(k) f_{m+l-j} + N_0 \delta_{lj}$,

$$l, j = -K_1, \ldots\ldots\ldots, -1, 0$$

(13)

$f_{-1}^{*}(k)$는 k번째 부 채널에서 l 번째 DFE Tap 계수를 나타내며, No는 Gaussian Noise Power를 나타낸다.

등화기의 feedback 필터 계수는 feedforard 부분의 계수 항으로 주어지며 다음과 같이 표현된다.

$$C_b(k) = -\sum_{j=-K_1}^{0} C_j(k) f_{b-j}(k), \qquad b = 1, 2, \ldots\ldots K_2 \qquad (14)$$

Feedback 계수의 결과값은 사전에 검출된 심볼에 의해 심볼간 간섭(ISI)을 완전히 제거됨을 의미한다.

V. 시뮬레이션 결과

본 논문에서는 무선 채널 접속장치(AP)와 무선 단말장치(NIC)의 거리를 최대 100m로 하여 시뮬레이션 하였고, 데이터 변조 방식으로 BPSK, QPSK, 16QAM을 적용하였으며, IEEE 802.11a에 근거하여 부 반송파 수가 52개인 경우에 대하여 각각 단일 텝 선형 등화기 및 결정 궤환 등화기(DFE)를 적용하

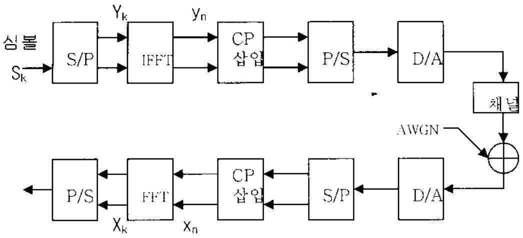


그림 5. OFDM 시스템 모델

Fig. 5. Model of OFDM system

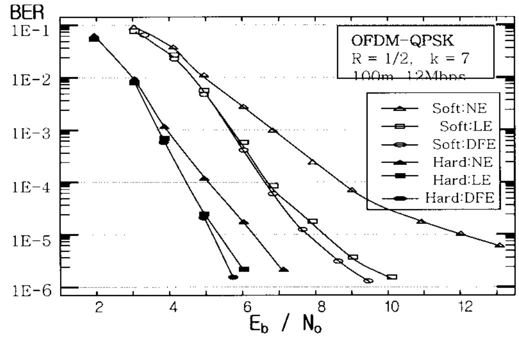


그림 6. OFDM 시스템의 등화기 성능(12Mbps)

Fig. 6. Equalizer performance of OFDM system (12 Mbps)

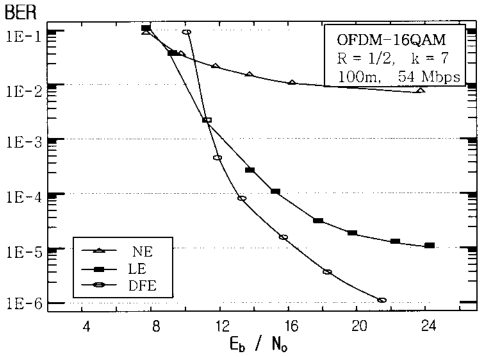


그림 7. OFDM 시스템의 등화기 성능(24Mbps)

Fig. 7. Equalizer performance of OFDM system (24 Mbps)

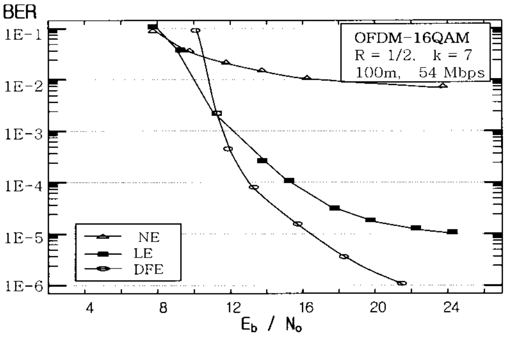


그림 8. OFDM 시스템의 등화기 성능(54Mbps)

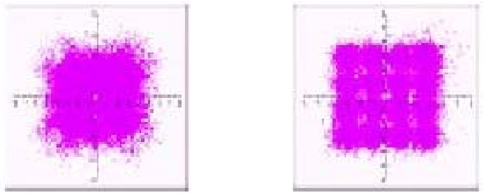
Fig. 8. Equalizer performance of OFDM system (54 Mbps)

였다.

전송 속도 별로 시뮬레이션을 통해 결과를 확인하고 BER 대비 신호대 잡음비에 대한 그래프를 그렸다.

그림 5는 본 논문에 사용된 OFDM 시스템의 시뮬레이션 모델이다.

그림 6은 QPSK 변조로 전송 속도가 12Mbps 이고 부호율 $R = 1/2$, 구속장 k=7인 OFDM 시스템에 대한 등화기의 성능을 평가한 것이다. 그림 6에서 알 수 있듯이 Eb/No는 5 dB 이상에서 조금씩 성능이 좋아지고 있다.

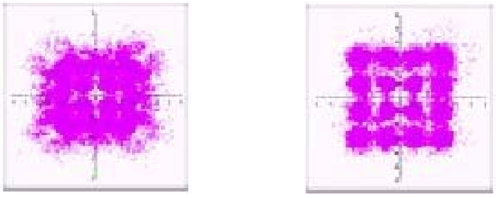


(a) 등화기 적용전 (b) 선형 등화기 적용

(a) No Equalizer (b) Linear Equalizer

그림 9. 24Mbps, 12dB 에서 신

Fig. 9. Signal scattering plot a



(a) 등화기 적용전 (b) 선형 등화기 적용

(a) No Equalizer (b) Linear Equalizer

그림 10. 24 Mbps, 20 dB 에서

Fig. 10. Signal scattering plot

그림 7은 부호율 1/2, 16 QAM 변조 방식에서 24 Mbps의 속도로 데이터를 전송할 경우에 등화기에 대한 성능을 나타낸 것이다. 등화기를 사용하지 않은 경우보다 등화기를 사용한 경우의 개선은 훨씬 좋아 졌음을 알 수 있다. 즉, E_b/N_o가 약 11 dB에서 10^{-3} BER을 얻을 수 있다.

그림 7에서 보는 바와 같이 E_b/N_o가 12 dB 이하에서는 등화기를 사용한 경우가 등화기를 사용하지 않은 경우 보다 BER이 더 나쁜 결과를 나타내고 있으며, 이는 낮은 dB의 Eb/No에서 잘못된 결정으로 인한 오류가 feedback 필터를 통해 feedback 되었기 때문이다

그림 8은 1/2 부호율, 구속장 7로 54 Mbps에서 16QAM 변조시 등화기의 성능을 나타내었다.

그림 8에서 등화기 사용한 경우가 등화기를 사용하지 않은 경우 보다 BER은 훨씬 좋게 나타났다. BER 10^{-2}에서 비교를 해보면 선형 등화기 사용시

약 7 dB가 개선되었고 결정 궤환 등화기의 경우 약 6 dB가 개선되었다. 또한 데이터 통신의 신뢰성을 확보할 수 있는 BER 10^{-5} 이상에서 월등히 성능이 개선되었음을 볼 수 있다.

그림 9, 10은 24 Mbps의 데이터 전송속도와 12 dB, 20 dB에서의 신호에 대해 분포도를 각각 나타낸 것이다. 그림 9, 10에서 알 수 있듯이 등화기를 적용하지 않았을 때보다 등화기를 사용한 경우가 훨씬 좋은 결과를 얻을 수 있었다.

또한 선형 등화기 보다 DFE 를 적용할 경우가 신호의 분포도에서 좋게 나타남을 알 수 있다.

VI. 결 론

무선 채널에서는 데이터의 전송속도가 빨라지면 ISI 영향이 심각해 져서 수신단에서는 원하는 신호를 얻을 수 없는 경우가 있다.

본 논문에서는 6-Ray 무선 채널 환경에서 OFDM 시스템에 구조가 간단한 단일 텝 선형 등화기 및 결정 궤환 등화기를 적용하여 고속 전송시에도 주파수 선택성 페이딩이 나타나는 심각한 ISI 를 제거하는 등 좋은 결과를 얻을 수 있었다.

그림 6, 7, 8에서 BER 대비 E_b/N_o의 개선이 점점 더 좋아 짐을 알 수 있었고, 특히 그림 8에서 등화기를 사용한 경우가 등화기를 사용하지 않은 경우 보다 데이터 통신의 신뢰성을 확보할 수 있는 수준 (BER 10^{-6})에서 E_b/N_o의 개선은 월등히 향상되었음을 볼 수 있었다.

또한, 데이터 속도가 빠르고 16QAM 변조 방식에서 선형 등화기 및 DFE 를 적용한 경우, 등화기를 적용하지 않은 경우 보다 그 효과는 더욱 크다 할 것이다.

참고 문헌

[1] Jun Lu, Tieng Thiang Tihung, Fumiyuki Adachi and Cheng Li Huang, "BER Performance of OFDM-MDPSK System in Frequency Selective Rician Fading with Diversity Reception", *IEEE Transmission on vehicular technology*, vol. 49, no. 4, pp. 1216-1225, July 2000

[2] Jose M. Hernando, F. Perez Fontan, *Introduction to Mobile Communication Engineering*, Artech House, 1999

[3] SAMUEL C.YANG(김남수역), "CDMA 이동 통신 공학", 대영사, 1999

[4] Yun Hee Kim, Iickho Song, Hong Gil Kim, Taejoo Chang and Hyung Myung Kim, "Performance Analysis of a Coded OFDM system in Time varying Multipath Rayleigh Fading Channels", *IEEE transaction on vehicular technology*, vol. 48, no. 5, pp 1610-1615, September 1999

[5] John G.Proakis, *Digital Communication,* 4th edition, McGraw Hill, 2001

[6] Won Gi Jeon, Kyung Hi Chang and Yong Soo Cho, “An Equalization Technique for Orthogonal Frequency Division Multiplexing System in Time Variant Multipath Channels", *IEEE transaction on communications*, vol. 47, no.1, pp 27-32, January 1999

[7] 전파연구소, "5GHz 대역 주파수 이용 기술 워크샵 자료", 2001.10.5

[8] IEEE, 802.11a Part 11, “Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer Specification : High speed physical layer in the 5GHz Band", 1999

한 경 수(韓慶洙)

1973년 2월 : 한국항공대학교 전자공학과 공학사

1999년 2월 : 연세대학교 대학원 전자공학과 공학석사

1999년 3월 ~ 현재 : 호서대학교 전기공학부 정보통신공학과 박사과정

1977년 8월 ~ 1994년 3월 : LG 전자(LG 정보통신) 부장

1995년 10월 ~ 2000년 2월 : 청호컴넷 상무

2000년 3월 ~ 현재 : 텔레마스 사장(CEO)

관심분야 : 전자 교환 장치, 무선 LAN, 광전송 장치

윤 희 상(尹熙相)

1975년 2월 : 한국항공대학교 통신공학과 공학사

1980년 2월 : 동국대학교 대학원 전자공학과 공학석사

1988년 2월 : 동국대학교 대학원 전자공학과 공학박사

1987년 3월 ~ 1988년 2월 : Montana State University 객원교수

2001년 3월 ~ 2002년 2월 : Colorado State University 객원교수

1981년 3월 ~ 현재 : 호서대학교 전기공학부 정보통신공학과 교수

관심분야 : 무선이동통신, Ultra Sonic