

IMT-Advanced 시스템의 시변 채널에서의 MMSE 기반 등화 성능 분석

박성준^{1†}

Performance Analysis of MMSE-Based Equalization of IMT-Advanced System in Time-Varying Channels

Sung-Joon Park

ABSTRACT

As the user's demand for ultra high-speed wireless internet has increased, the standardization, research and development of future mobile communication systems have been done for several years. IMT-Advanced system which is called fourth generation mobile communication should support the data rate of 1 Gbps for nomadic users and 100 Mbps for mobile users. Also, the system should hold call connection at the mobile speed of 350 km/h. Meanwhile, since Doppler spread is linearly proportional to mobile speed, high mobility leads to the increase of interference between subcarriers and the deterioration of detection performance consequently. In this paper, we evaluate and analyze detection probability with respect to equalization methods in time-varying channels under system parameters complying with IMT-Advanced requirements. According to computer simulation conducted by varying mobile speed and code rate, MMSE based equalization can mitigate performance degradation of IMT-Advanced system considerably in time-varying channels.

Key words : Fourth Generation Mobile Communication, IMT-Advanced, OFDM, Time-Varying Channel, One-Tap Equalization, MMSE Equalization

요 약

초고속 무선 인터넷 서비스에 대한 사용자의 요구가 증대되면서 차세대 이동통신의 표준화 및 연구 개발이 계속되고 있다. 4세대 이동통신인 IMT-Advanced 시스템은 정지 상태에서 1 Gbps, 이동 상태에서 100 Mbps의 전송 속도를 제공해야 하며 최대 350 km/h의 이동 중에도 안정적인 수신 성능을 보장해야만 한다. 한편, 이동 속도가 증가함에 따라 도플러 편이 역시 증가하게 되고 이로 인해 부반송파간 간섭이 증대되어 궁극적으로 수신 성능의 저하를 야기하게 된다. 이에, 이 논문에서는 IMT-Advanced 시스템의 무선접속규격을 준용하는 채널 환경에서 수신기의 등화 기법에 따른 수신 성능을 평가하고 분석한다. 이동속도와 부호율을 변경하면서 수행한 컴퓨터 모의실험에 따르면 MMSE 기반의 등화 기법을 적용하여 수신할 경우 단일 탭 등화 기법을 적용할 경우보다 시변 채널에 의한 성능 저하를 대폭 완화시킬 수 있음을 고찰할 수 있다.

주요어 : 4세대 이동통신, IMT-Advanced, OFDM, 시변채널, 단일 탭 등화 기법, MMSE 등화 기법

1. 서 론

*이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업(2010-0021714)과 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 대학 IT연구센터 지원사업(NIPA-2011-C1090-1121-0001)의 연구결과로 수행되었음.

접수일(2011년 8월 18일), 심사일(1차 : 2011년 9월 14일), 게재 확정일(2011년 9월 14일)

¹⁾강릉원주대학교 전자공학과

주 저 자 : 박성준

교신저자 : 박성준

E-mail; psj@ieee.org

국제전기통신연합(International Telecommunication Union, ITU)은 2008년 ITU-R WP8F 회의^[1]에서 4세대 이동통신이라 일컬어지는 IMT-Advanced 시스템의 개념을 정의한 바 있으며, 이어진 후속 회의 ITU-R WP5D 회의^[2]에서 IMT-Advanced의 구체적인 요구사항들을 정립하였다. 이에, IMT-Advanced 시스템의 유력 후보인 3GPP와 IEEE 802.16 진영은 각각 LTE-Advanced 시스템 기

술 표준인^[3]과 WiMAX-Advanced 시스템 기술 표준인^[4]을 ITU 표준화 기구에 제출하였으며 금년 말로 예정된 승인 여부를 기다리고 있는 상황이다.

기존 3세대 이동통신 시스템과 구별되는 4세대 IMT-Advanced 시스템의 주요 특징은 향상된 데이터 전송 속도와 고속 이동성 지원이다. 즉, IMT-Advanced 시스템에서는 정지 상태에서 최대 1 Gbps, 이동 상태에서 최대 100 Mbps의 전송속도를 제공해야만 하며, 최대 350 km/h의 고속 이동 환경에서도 호 절단이 없는 통신링크를 유지해야만 한다.

한편, LTE-Advanced와 WiMAX-Advanced 시스템은 다수 개의 부반송파에 정보 심볼을 각각 탑재한 후 다중화하여 전송하는 OFDM(orthogonal frequency division multiplexing) 기술을 사용하고 있는데, 사용자가 고속으로 이동할 경우 도플러 편이가 증대되어 부반송파간 간섭(inter-carrier interference, ICI)이 증가하고 이로 인해 수신 성능의 저하가 발생한다^[5]. 특히, OFDM 기반의 시스템에서 일반적으로 사용되는 수신 기법인 주파수 축 단일 탭 등화(one-tap equalization, OTE)^[5]는 도플러 편이를 고려하지 않는 수신 기법이기에 때문에 이동 속도의 증가에 따라 수신 성능의 급격한 하향 포화 현상이 발생한다. 이에, 상기 문제를 해소하기 위하여 시변 채널에서의 채널 행렬을 적절히 가공함으로써 수신 성능의 개선을 모색하는 등화 연구들이 수행된 바 있다^[6-9].

이 논문에서는 기존 연구들을 기반으로 하여 IMT-Advanced 시스템의 이동 채널 환경에서의 수신 성능을 시뮬레이션 기법에 의해 평가하고 분석한다. 즉, 주파수 축 등화 기법, 이동 속도, 부호율에 따른 모의실험을 실시

하고 비교 분석함으로써 궁극적으로 IMT-Advanced 시스템 개발의 기초 자료로 활용되도록 한다. 이 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서 OFDM 기반의 IMT-Advanced 시스템의 구성과 채널 환경에 대해 서술하고, 3장에서 시변 채널에서의 주파수 축 등화 기법에 대해 상술한다. 4장에서 시뮬레이션 방법론 및 결과를 분석하고, 끝으로 5장에서 결론을 제시한다.

2. 시스템 구성

2.1 시스템 모델

그림 1은 LTE-Advanced와 WiMAX-Advanced 시스템이 채택하고 있는 OFDM 기반 기저대역 송수신기의 블록도이다. 그림 1 (a)에 나타낸 바와 같이, 정보 데이터는 채널 부호화되고 인터리빙된 후 심볼 매핑에 의해 복소 심볼들로 변환된다. N 개의 복소 심볼로 구성되는 s_f 는 각각 N 개의 부반송파에 탑재되어 OFDM 심볼로 형성된다. 즉, s_f 에 대해 N 점 IFFT(inverse fast fourier transform)를 수행하여 생성한 OFDM 송신 신호 s_t 는 다음과 같다.

$$s_t = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{f=0}^{N-1} s_f e^{j2\pi ft/N} \quad (1)$$

여기서 $t=0,1,\dots,N-1$ 이다. 식 (1)을 행렬 식으로 표현하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$s_t = F^H s_f \quad (2)$$

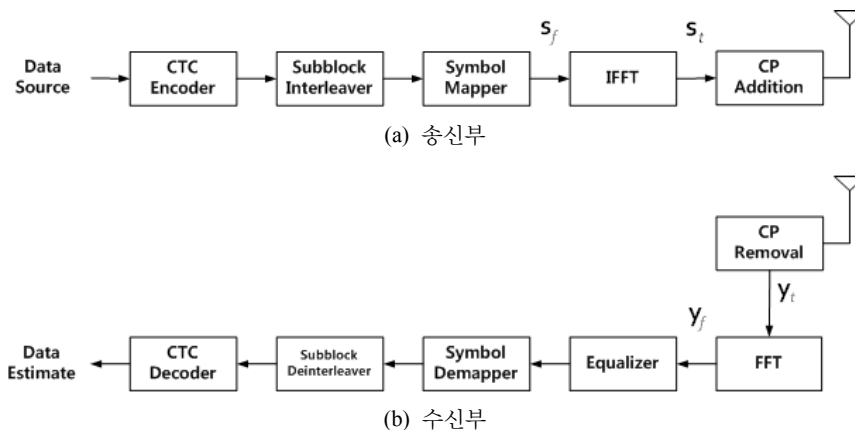


그림 1. OFDM 시스템의 기저대역 블록도

여기서, F 는 $N \times N$ 크기의 unitary DFT(discrete fourier transform) 행렬을 의미하고 s_f 와 s_t 는 각각 $N \times 1$ 크기의 복소 열벡터이다. 송신기의 최종단에서는 다중경로로 인해 발생하는 OFDM 심볼 간 간섭을 완화하기 위해 일정 길이의 CP(cyclic prefix)를 s_t 에 덧붙인 후 전송한다.

무선 채널을 통해 전달된 신호는 그림 1 (b)에 나타난 수신 절차에 따라 추출된다. 즉, 수신 신호에서 CP를 제거한 $N \times 1$ 크기의 시간 축 신호 y_t 는 다음의 행렬식으로 표현될 수 있다.

$$y_t = H_t F^H s_f + n_t \quad (3)$$

여기서, H_t 는 $N \times N$ 크기의 시간 축 채널 행렬을 n_t 는 $N \times 1$ 크기의 복소 가우시안 잡음 행렬을 의미한다. 상기 y_t 는 FFT(fast fourier transform) 수행을 통해 다음의 주파수 축 신호 y_f 로 변환된다.

$$\begin{aligned} y_f &= F H_t F^H s_f + F n_t \\ &= H_f s_f + n_f \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, H_f 는 $N \times N$ 크기의 주파수 축 채널 행렬을 의미한다. 한편, 식 (4)의 y_f 로부터 s_f 의 추정치 \hat{s}_f 를 획득하는 과정이 등화기인데 등화 기법에 대해서는 3장에서 상세히 설명한다. 등화기의 출력은 심볼의 비트열 재변환기, 디인터리빙, 채널 복호기를 거친 후 최종적인 정보 데이터의 추정 값으로 귀결된다.

2.2 채널 환경

2007년 세계전파통신회의(WRC-07)에서 결정된 4세대 이동통신용 세계 공통 주파수 대역 중 하나는 200 MHz의 대역폭을 갖는 3.4~3.6 GHz 대역이다. 따라서, 3.6 GHz의 주파수와 350 km/h의 이동 속도를 가정하여 계산한 최대 도플러 주파수 f_D 는 1167 Hz가 되고, OFDM 심볼 길이 T_s 가 약 102.85 μ s임을 감안하면 상대적 도플러 주파수 Δf_D 는 다음의 수식에 의해 계산된다.

$$\Delta f_D = f_D T_s = 0.12 \quad (5)$$

이는, IMT-Advanced 시스템의 고속 이동환경은 단일 OFDM 심볼 내에서도 상당한 채널 변화를 발생시키는 시변(time varying) 채널이 됨을 의미한다.

3. 시변 채널에서의 등화 기법

3.1 단일 탭 등화

OFDM 기반 통신 시스템에서 흔히 사용되는 수신 기법은 단일 탭 등화이다. 단일 탭 등화는 OFDM 심볼 구간 동안에는 채널이 시간에 따라 변하지 않는다는 가정 하에 수신하는 기법으로 H_t 는 순환 행렬(circulant matrix)로 근사화된다. H_t 가 순환 행렬일 때, 행렬 계산에 의하면 $F H_t F^H$ 로 정의되는 H_f 는 행렬의 대각 원소 이외에는 모두 0의 값을 갖는 대각 행렬(diagonal matrix)이 됨을 알 수 있다. 따라서, 단일 탭 등화에서 식 (4)는 다음과 같이 변환된다.

$$y_{f,n} = h_{f,n} s_{f,n} + n_{f,n} \quad (6)$$

여기서, $y_{f,n}$, $s_{f,n}$, $n_{f,n}$ 은 각각 $N \times 1$ 크기의 열벡터 y_f , s_f , n_f 의 n 번째 원소를 의미하고, $h_{f,n}$ 는 대각 행렬 H_f 의 n 번째 대각 원소를 의미한다. 궁극적으로, $s_{f,n}$ 의 추정치 $\hat{s}_{f,n}$ 은 다음의 연산에 의해 계산된다.

$$\hat{s}_{f,n} = \frac{y_{f,n}}{h_{f,n}} = s_{f,n} + \frac{n_{f,n}}{h_{f,n}} \quad (7)$$

이렇듯 단일 탭 등화는 $\mathcal{O}(N)$ 의 연산량을 필요로 한다는 장점을 갖는 반면, OFDM 심볼 내에서는 채널이 변하지 않는다는 가정을 근간으로 하므로 도플러 편이 증가에 따라 수신 성능이 급격히 저하될 수 있다는 문제점을 갖는다.

3.2 채널 역 등화

채널 역(channel inversion, CI) 등화 기법에서는 시변 채널에 의해 형성된 주파수 축 채널 행렬 H_f 의 역행렬 H_f^{-1} 을 구한 뒤 \hat{s}_f 를 획득한다. 즉, 식 (4)는 다음의 수식으로 변환된다.

$$\hat{s}_f = H_f^{-1} y_f = s_f + H_f^{-1} n_f \quad (8)$$

채널 역 등화를 수행하기 위해서는 H_f 로부터 역행렬 H_f^{-1} 를 계산해야 하는데, $N \times N$ 크기의 역행렬 계산을 위한 연산량은 $\mathcal{O}(N^3)$ 에 달한다. 한편, IMT-Advanced 시스템에 일반적으로 사용되는 N 크기는 1024이므로 H_f^{-1}

를 실시간으로 계산하는 것은 거의 불가능하다. 또한, 채널 역 등화는 zero-forcing 기법의 일종이므로 채널이 변화함에 따라 잡음 증강으로 인한 완만한 성능 포화가 예상된다.

3.3 MMSE 등화

식 (4)로부터 s_f 의 추정치를 얻는 다른 방법은 MMSE (minimum mean square error) 등화 기법이다. MMSE 해석에 따르면 n 번째 부반송파에 실린 심볼의 추정치 $\widehat{s_{f,n}}$ 는 다음의 수식에 의해 획득할 수 있다^[10].

$$\widehat{s_{f,n}} = \mathbf{g}_n^H (\mathbf{y} - \mathbf{H}_f \mathbf{m}) \quad (9)$$

여기서, $\mathbf{g}_n = \mathbf{A}^{-1} \mathbf{b}_n$, $\mathbf{A} = \mathbf{H}_f \mathbf{V} \mathbf{H}_f^H + \mathbf{R}_n$ 이고, $\mathbf{V} = \text{diag}([v_1, \dots, v_N]^T)$, $\mathbf{R}_n = E[\mathbf{n}_f \mathbf{n}_f^H] = \sigma_n^2 \mathbf{I}_N$ 이며, \mathbf{b}_n 는 \mathbf{H}_f 의 n 번째 열벡터를 \mathbf{I}_N 은 $N \times N$ 크기의 단위 행렬(identity matrix)을 의미한다. 식 (9)에 나타낸 MMSE 등화를 위한 연산량은 $\mathcal{O}(N^2)$ 로 채널 역 등화보다는 낮고 단일 탭 등화보다는 높다.

한편, QPSK 변조를 가정하면 $\widehat{s_{f,n}}$ 로부터 n 번째 심볼 $s_{f,n}$ 를 구성하는 두 개의 비트 $s_{f,n}^1, s_{f,n}^2$ 의 대수우도비(log-likelihood ratio)를 다음과 같이 구할 수 있으며 복호기의 입력으로 직접 활용될 수 있다.

$$L_c(s_{f,n}^1) = - \frac{\sqrt{8} \text{Re}(\widehat{s_{f,n}})}{1 - t_n} \quad (10)$$

$$L_c(s_{f,n}^2) = - \frac{\sqrt{8} \text{Im}(\widehat{s_{f,n}})}{1 - t_n} \quad (11)$$

여기서, $t_n = \mathbf{b}_n^H \mathbf{A}^{-1} \mathbf{b}_n$ 이다.

4. 시뮬레이션 및 결과 분석

4.1 시뮬레이션 환경

IMT-Advanced 시스템의 등화 성능을 평가하기 위해 실시간 컴퓨터 시뮬레이션의 실험 환경은 다음과 같다.

OFDM 심볼 구성은 WiMAX-Advanced 시스템 기술 표준인^[4]에 제시된 10 MHz의 대역폭, 1024점 FFT, 102.85 μ s의 OFDM 심볼 길이, 10.94 kHz의 부반송파 이격을 고려하였고, 반송파 주파수는 IMT-Advanced 시스템이 운용될 수 있는 주파수 대역 중 최대의 시변 특성을 갖는

표 1. 이동-A 채널 분포

다중경로	1	2	3	4	5	6
지연시간(μ s)	0	0.31	0.71	1.09	1.73	2.51
상대전력(dB)	0	-1	-9	-10	-15	-20

3.6 GHz를 가정하였다.

무선 채널을 모델링하기 위해 주파수 선택적 채널을 모사하는 탭 지연 선(tapped delay line) 모델과 시변 채널을 모사하는 Jakes의 모델^[11]을 동시에 사용하여 식 (3)의 시간 축 채널 행렬 \mathbf{H}_f 의 원소들인 순시 채널 이득 값들을 생성하였다. 한편, 탭 지연 선의 이득은 ITU-R M.1225^[12]에서 정의한 이동-A(Vehicular-A) 채널을 고려하였으며 표 1에 이동-A 채널에서의 시간 지연에 따른 상대적 전력 분포를 나타내었다.

변조 및 채널부호 방식으로는 직교 위상 편이 변조(QPSK)와 터보부호를 적용하였다. 터보부호의 부호기로 모 부호율이 1/3인 이중 이진 구조의 부호기를 가정하였고^[4] 복호 방식으로는 우수한 성능을 가지면서도 복잡도가 낮아 널리 사용되는 Max-Log-MAP 알고리즘을 적용하였다. 터보부호의 프레임 크기는 480, 매 프레임 당 복호의 반복 횟수는 8회로 고정하였다. 수신 신호를 검출하는 등화 기법으로는 단일 탭 등화와 MMSE 등화 만을 고려하였는데, N 이 1024일 경우 채널 역 등화는 과도한 연산량으로 인해 범용 컴퓨터에서 모의실험이 불가하였기 때문이다. 한편, 본 모의실험에서 다중입출력 및 파일릿 심볼 등을 고려하지 않았다.

성능평가 지표로는 신호 대 잡음비 E_s/N_0 에 따른 비트 오류율(bit error rate, BER)과 프레임오류율(frame error rate, FER)을 사용하였다. 이동성 및 부호율에 따른 IMT-Advanced 시스템의 수신 성능을 고찰하기 위해 이동속도는 10, 120, 350 km/h, 부호율은 1/3, 5/6로 변경시키면서 성능 평가를 수행하였다. 한편, 매 시뮬레이션 결과를 획득함에 있어서 프레임 오류가 100개 이상 발생할 때까지 반복 실험을 수행함으로써 획득한 데이터의 신뢰도를 확보하였다.

4.2 시뮬레이션 결과 분석

그림 2는 채널부호의 부호율이 1/3인 경우 이동속도를 10, 120, 350 km/h로 변화시키면서 획득한 단일 탭 등화와 MMSE 등화 기법의 신호 대 잡음비에 따른 비트오류율 성능 그래프이다. 단일 탭 등화는 저속 이동(10 km/h)에도 비트오류율이 약 10^{-2} 으로 포화됨을 관찰할 수 있다. 반면, MMSE 등화는 120 km/h의 이동속도에서도 성능의

포화없이 10^{-4} 이하의 비트오율을 제공한다.

그림 3은 그림 2와 동일한 실험 환경에서의 신호대잡음비에 따른 프레임오율 성능 그래프이다. 비트오율 성능 그래프와 유사하게 MMSE 등화는 120 km/h에서도 낮은 프레임오율을 유지하는 반면, 단일 탭 등화는 10 km/h에서도 성능이 포화됨을 고찰할 수 있다.

그림 4는 부호율을 5/6로 고정된 후 10, 120, 350 km/h의 이동 속도에 대해 획득한 신호대잡음비에 따른 비트오율 성능 그래프이다. 단일 탭 등화는 10 km/h의 이동속도에서 약 10^{-2} 의 비트오율로 포화됨을 관찰할 수 있는데 이는 그림 2에 나타난 부호율 1/3의 결과와 거의 유사한 결과이다. 3장에 상술하였듯이 단일 탭 등화는 이동성을 고려하지 않는 알고리즘이며 이로 인해 10 km/h의 저속 이동에도 채널부호의 부호율에 무관하게 수신 성능이 포화되는 것으로 분석할 수 있다. 한편, MMSE 등화 성능은

동일 조건의 단일 탭 등화보다 월등한 성능을 보인다. 또한, 그림 2와 4에서 MMSE 등화의 부호율에 따른 성능 비교를 통해 다음의 두 가지 특징을 관찰할 수 있다. 첫째, 부호율 증가에 따라 수신 성능이 저하된다는 것인데 이는 채널부호의 일반적인 속성에 기인한다. 둘째, 부호율이 높을 경우 이동속도에 대한 성능의 포화가 급격히 진행된다. 프레임 크기가 고정되어 있는 상황에서 부호율이 높아지면 채널부호화 후의 비트 수는 상대적으로 감소한다. 이는 사용하는 부채널 수의 감소를 야기하고 주파수 축 다이버시티 효과를 저감시켜 궁극적으로는 이동속도에 따른 빠른 성능 포화를 초래하는 것으로 해석된다.

그림 5는 그림 4와 동일한 실험 환경에서의 신호대잡음비에 따른 프레임오율 성능 그래프이며 상기 비트오율 결과와 유사한 특징을 고찰할 수 있다.

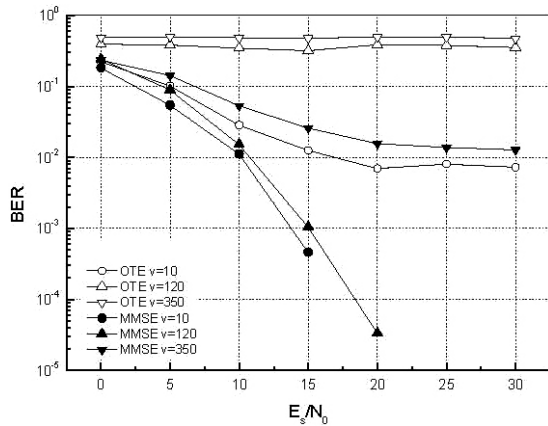


그림 2. 신호대잡음비에 따른 BER 성능: 부호율=1/3

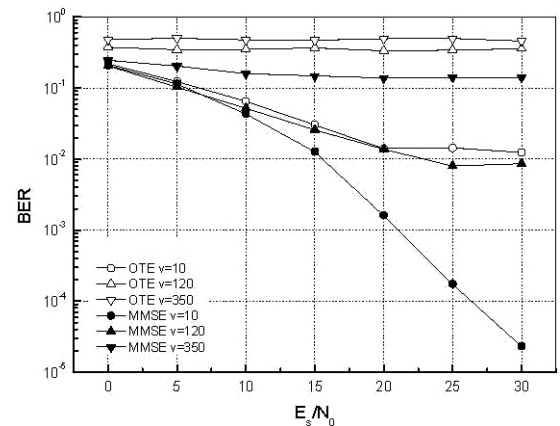


그림 4. 신호대잡음비에 따른 BER 성능: 부호율=5/6

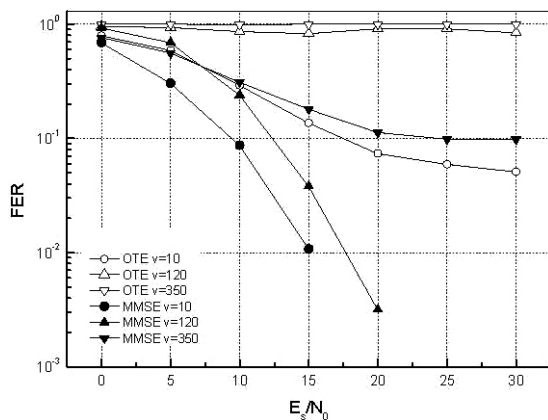


그림 3. 신호대잡음비에 따른 FER 성능: 부호율=1/3

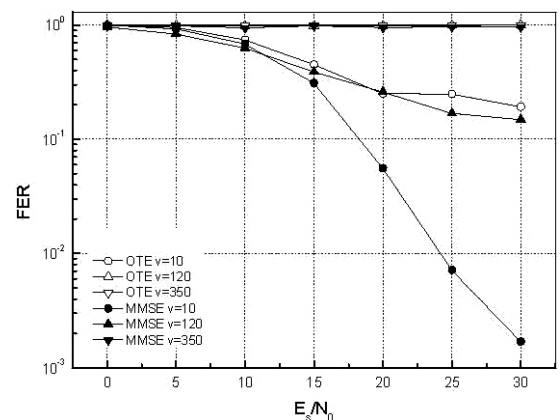


그림 5. 신호대잡음비에 따른 FER 성능: 부호율=5/6

5. 결 론

도래하고 있는 IMT-Advanced 시스템에서는 고속 이동 중에서도 호 절단없는 고속 데이터 전송을 수행해야만 한다. 그러나, 이동속도의 증가는 도플러 편이의 증가를 야기할뿐만 아니라 궁극적으로 시간에 따른 채널의 변화를 증대시켜 OFDM 기반 시스템의 수신 성능을 열화시킨다. 이 논문에서는 이동 환경에서 IMT-Advanced 시스템의 수신 성능을 분석하기 위해 OFDM 기반의 IMT-Advanced 시스템 시뮬레이터를 작성하고, 이동속도 및 부호율에 따른 단일 탭 등화와 MMSE 등화 기법의 성능을 모의실험을 통해 평가하였다.

모의실험 결과에 따르면, 단일 탭 등화는 10 km/h의 저속 이동환경에서도 약 10^{-2} 의 비트오율 및 10^{-1} 의 프레임오율로 급격히 성능이 포화되므로 구현에 적합하지 않은 반면 MMSE 등화는 부호율이 낮은 경우 120 km/h의 이동속도에서도 안정적인 성능을 제공함을 확인할 수 있었다. 상기 결과들은 IMT-Advanced 시스템의 이동성 지원을 위해서는 다소 복잡도는 높으나 MMSE 등화 기법을 적용하여 수신해야 함을 시사한다. 추후, 이 논문의 모의실험 결과들은 IMT-Advanced 시스템과 단말기의 구현을 위한 핵심 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

1. ITU-R WP8F (2008), Report ITU-R M.2134.
2. ITU-R WP5D (2009), Report ITU-R M.2135-1.
3. 3GPP, <http://www.3gpp.org>
4. IEEE 802.16, <http://www.ieee802.org/16/tgm>
5. Goldsmith, A. (2005), *Wireless Communications*, 1st Edition, Cambridge University Press, New York, pp. 374-402.
6. Jeon, W. G., Chang, K. H. and Cho, Y. S. (1999), "An Equalization Technique for Orthogonal Frequency-Division Multiplexing Systems in Time-Varying Multipath Channels", *IEEE Tr. Communications*, Vol. 47, No. 1, pp. 27-32.
7. Schniter, P. (2004), "Low-Complexity Equalization of OFDM in Doubly-Selective Channels", *IEEE Trans. Signal Processing*, Vol. 52, No. 4, pp. 1002-1011.
8. Rugini, L., Banelli, P. and Leus, G. (2005), "Simple Equalization of Time-Varying Channels for OFDM," *IEEE Communications Letters*, Vol. 9, No. 7, pp. 619-621.
9. Rugini, L., Banelli, P. and Leus, G. (2006), "Low-Complexity Banded Equalizers for OFDM Systems in Doppler Spread Channels," *EURASIP J. Applied Signal Processing*, Vol. 2006, Article ID 67404, pp. 1-13.
10. Poor, H. V. (1994), *An Introduction to Signal Detection and Estimation*, 2nd Edition, Springer-Verlag, New York, pp. 221-229.
11. Jakes, W. C. (1974), *Microwave Mobile Communications*, John Wiley and Sons, New York.
12. ITU-R (1997), Report ITU-R M.1225, "Guideline for Evaluation of Radio Transmission Technologies for IMT-2000".



박 성 준 (psj@ieee.org)

1996 연세대학교 전파공학과 학사
 1998 한국과학기술원 전기및전자공학과 석사
 2004 한국과학기술원 전자전산학과 공학박사
 2003~2005 삼성전자 정보통신총괄 정보통신연구소 책임연구원
 2005~현재 강릉원주대학교 전자공학과 부교수

관심분야 : 통신시스템, 이동통신, 수중통신, 무선센서네트워크