
여러 가지 종류의 안테나 구조를 가지는 OFDM 시스템의 성능 분석

최승국* · 이기영*

Performance Evaluation of OFDM Systems with Various Antenna Structure

Seung-kuk Choi · Ki-Young Lee*

본 연구는 한국과학재단 지정 인천대학교 멀티미디어연구센터의 지원으로 수행되었음.

요 약

OFDM 전송 방식에서는 데이터 전송 시, 서로 직교성이 있는 여러 개의 부반송파들을 사용한다. 그러므로 주파수 다이버시티 효과를 얻을 수 있어서 성능이 우수한 전송이 가능하다. 본 논문에서는 여러 가지 종류의 안테나를 사용했을 때의 OFDM 전송 시스템 성능을 분석한다. 이러한 여러 가지 시스템들에서 데이터가 다중 경로 Rayleigh 페이딩 환경 하에서 전송될 때의 데이터 비트 에러율을 분석한다.

ABSTRACT

OFDM are digital modulation techniques where a single data symbol is transmitted at multiple subcarriers which are orthogonal to each other. With this technique, frequency diversity can be achieved. The performance of OFDM systems with various antenna structure are analyzed, where data is transmitted over multi-path Rayleigh fading channel. The performance of this technique, gauged by the average bit error rate, is analyzed for the OFDM systems dependent upon the various antenna diversities.

키워드

OFDM, 안테나 다이버시티, STBC, MRRC, BER

1. 서 론

OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 전송 방식에서는 송신하려는 데이터를 병렬화 한 후에 이를 다수의 직교 부반송파를 사용해서 전송하기 때문에 전송 심볼의 길이가 DS-SS 같은 단일 반송파 전송 방식보다 부반송파의 수만큼 더 길어지게 된다. 따라서 심볼 주기가 짧은 고속 데이터 전송 시 발생하는 심볼간 간섭

(ISI: inter symbol interference) 문제를 해결할 수 있다[1]. 송·수신 단에서 변·복조 시 IFFT/FFT를 사용하여 고속의 시스템 구현이 가능하며, 수신 단에서 각 부반송파 마다 간단한 단일 탭(one-tap) 구조의 등화기를 사용하여 채널의 주파수 선택적 페이딩에 의한 왜곡을 보상할 수 있다[2,3].

송신 심볼이 주파수 선택적 Rayleigh 다중 경로 채널과 부가성 백색 가우스 잡음(AWGN: Additive White Gaussian Noise)채널을 통하여 전송될 때 그 크기 및 위상이 변화되어 성상도에 변화가

생긴다. 이러한 성상도를 원래의 정확한 모습으로 복원하기 위하여 파일럿 심볼을 이용한 변조 방식(PSAM: Pilot Symbol Assisted Modulation)이 시스템에 사용된다. PSAM 방식은 데이터 심볼 이외에 크기와 위상이 알려진 심볼들을 추가로 삽입하여 전송하는 방식이다. 수신단에서는 채널을 통하여 전송되어 온 이 파일럿 심볼들의 크기 및 위상 변화로부터 채널 상태를 추정하며, 이 추정치를 이용하여 데이터 심볼들의 크기 및 위상을 등화(equalization)시키는 방식이다. 그러나 부가성 백색 잡음과 여러 원인들에 의하여 정확한 추정 및 등화가 이루어지지 못하여 수신단에서 원래 데이터를 재생 시 비트 오류율(BER: Bit Error Rate)이 증가된다. OFDM 수신 시 비트 에러율(BER: bit error rate) 성능을 향상시키기 위하여 여러 가지 종류의 안테나 다이버시티 기법들이 사용되고 있다[3]. 본 논문에서는 Rayleigh 페이딩 다중 경로 채널 하에서의 다중반송파 시스템 성능을 비트 에러율 면에서 분석하고자 한다. II절에서는 OFDM 시스템 구조에 대하여 기술하고, III절에서는 여러 가지 종류의 안테나 구조에 따른 BER 특성을 이론적으로 분석하고 IV절에서는 시뮬레이션 및 결과를 분석한다.

II. OFDM 전송 시스템

전송되어질 데이터는 그림 1에서와 같이 우선 16-QAM(Quadrature Amplitude Modulation)되어 주기 T_s 인 소스 심볼로 변환된 후, 직·병렬 변환기(S/P)를 거쳐 N 개의 부반송파로 각각 변조된다. 소스 심볼들은 N 개씩 블록화된 후 병렬화 되므로 블록의 길이는 $T = NT_s$ 가 된다. Modulator 출력에 나타나는 한 블록 소스 심볼들이 OFDM 변조된 신호의 복소 포락선(complex envelope)은 식 (1)과 같다[2].

$$x_q(n) = (1/\sqrt{N}) \sum_{k=0}^{N-1} X_q(k) \exp(-j2\pi kn/N) \quad (1)$$

식(1)에서 $X_q(k)$ 는 QAM encoder 출력에 나타나는 k 번째 심볼을 나타낸다. 또한 n 은 $t = nT_s$ 때마다 샘플링된 신호를 나타낸다. 식 (1)은 $X_q(k)$ 의 이산 역 Fourier 변환의 모양이다. 그러므로 변조를 송신기에서 소스 심볼을 IFFT(Inverse

Fast Fourier Transform)한 후, 아날로그 신호로 변환(D/A)시킨 다음 RF 변조시키는 방법으로 간단하게 실현할 수 있다. 변조된 신호는 TWT(Traveling Wave Tube)와 같은 HPA(High Power Amplifier)를 이용하여 증폭되어 전송되는데, 이러한 HPA의 입·출력 관계는 다음 식(2)와 같이 메모리 없는 비선형 시스템에 관한 식으로 표현될 수 있다[4].

$$A(r) = \frac{2r}{1+r^2} \quad (2)$$

$$\Phi(r) = \Phi_0 \frac{r^2}{1+r^2}, \quad \Phi_0 = \pi/6$$

여기서 $A(r)$ 는 증폭기의 크기 변환 특성, $\Phi(r)$ 은 위상 변환 특성을 나타내고, r 는 증폭기 입력 신호의 복소 포락선 크기를 나타낸다. 고출력 증폭기의 성능을 활용하면서 신호의 비선형 왜곡을 감소시키기 위하여 보통 3차 사전 왜곡기가 사용된다. 사전 왜곡기는 입력 신호를 HPA 전단에서 미리 HPA의 비선형 특성에 역으로 왜곡시켜서 보상하는 방법이다. 3차 사전 왜곡기에서는 복소 포락선 $x_q(t)$ 의 신호가 입력될 때 다음 식(3)과 같은 복소 포락선 $v(t)$ 를 가지는 신호가 출력에 나타난다.

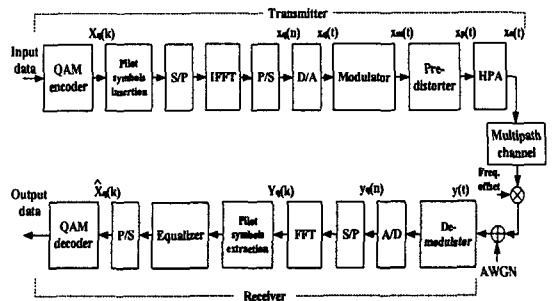


그림 1. OFDM 전송 시스템의 구성도
Fig. 1 Block diagram of OFDM system

$$v(t) = x_q(t) \left[1 + \frac{1}{2} (1 - j\frac{\sqrt{3}}{3}) |x_q(t)|^2 \right] \quad (3)$$

그러면 송신기 출력 $x_0(t)$ 의 이산 복소 포락선 $x_e(t = nT_s)$ 는 다음 식 (4)와 같이 표현된다.

$$x_e(n) = \frac{2v(n)}{1+|v(n)|^2} \exp(j\Phi_0 \frac{2|v(n)|^2}{1+|v(n)|^2}) \quad (4)$$

송신기 출력 신호 $x_0(t)$ 는 전송 도중에 다중 경로에 의해 주파수 선택적 페이딩이 발생된다. 또한 AWGN 잡음이 추가되며 도플러 영향 등으로 인하여 수신 시 주파수 동기 편차 f_0 가 발생된다. 이 주파수 편차 f_0 을 부반송파 간의 주파수 간격에 대한 상대 주파수 편차 $\varepsilon = f_0/\Delta f$ 로 표시한다. 본 논문에서는 매 심볼 때마다 시간적으로 변화하는 탭(tap)값을 가지는 FIR(Finite Impulse Response) 필터 구조의 채널 모델을 가정한다. L 개의 다중 경로로 인한 수신 신호 $y(t)$ 의 이산 복소 포락선 $y_m(n)$ 은 다음 식 (5)와 같다.

$$y_m(n) = \sum_{l=0}^{L-1} h(l) x_e(n-l) \quad (5)$$

위 식 (5)에서 느린 도플러 페이딩이 발생하여 채널 응답 $h(l)$ 이 한 블록 주기 T 시간 동안 일정한 특성을 가지는 시 불변 채널을 가정한다. $h(l)$ 은 복소 가우시안 불규칙 변수이며, 그 크기는 Rayleigh pdf(probability density function)를, 위상은 0에서 2π 까지의 균일 분포를 가진다. 그 다음 주파수 편차 f_0 와 대역 통과 AWGN 잡음 $w(t)$ 의 영향까지 고려할 때, 수신 신호 $y(t)$ 의 복소 포락선 $y_q(t)$ 와 이 신호가 $t = nT_s$ 때마다 샘플링된 이산 복소 포락선 $y_q(n)$ 은 다음 식 (6)과 같다.

$$y_q(n) = y_m(n) \exp(j2\pi\varepsilon n/N) + w(n) \quad (6)$$

이때 $w(n)$ 은 대역 통과된 AWGN의 이산 복소 포락선을 나타내는 불규칙 변수이다. 그러면 $y_q(n)$ 을 FFT하여 $Y_q(k)$ 를 구할 수 있다.

$$Y_q(k) = \sum_{n=0}^{N-1} y_q(n) \exp(-j2\pi kn/N) \quad (7)$$

이러한 각 부반송파의 주파수 성분 $Y_q(k)$ 는 송신 증폭기의 비직선성, 전송 도중에 발생하는 다중 경로 페이딩, 주파수 편차 및 AWGN 등의 영향으로 인하여 각각의 주파수 성분들에 서로 다른 크기 감소와 위상 천이가 발생된다. 따라서 $Y_q(k)$ 는 각 부반송파의 전달 함수 $H(k)$ 로 추정된 복소 계수 $\hat{H}(k)$ 와 역으로 곱해져서 보상된다(zero forcing one tap frequency equalizer). 이 때 PSAM

(Pilot Symbol Assisted Modulation) 방식에서는 정보 심볼 이외에 크기와 위상이 알려진 파일럿 심볼 $P(k)$ 를 추가로 삽입하여 전송하며, 채널을 통하여 전송되어 온 이 파일럿 심볼 $\hat{P}(k)$ 로부터 채널의 전달 함수를 LS(Least Squares) 추정 방식으로 추정할 수 있다. 이것을 여러 개의 부반송파들에 대한 행렬 형태로 나타내면 다음 식 (8)과 같다.

$$\hat{H}_{LS} = P^{-1} Y = \begin{bmatrix} y_0 & y_1 & \dots & y_{N-1} \\ p_0 & p_1 & \dots & p_{N-1} \end{bmatrix}^T \quad (8)$$

위 식에서 Y 는 수신 벡터, P 는 파일럿 심볼을 포함하는 대각 행렬, H 는 채널 전달 함수 벡터를 나타낸다. 한편 MMSE(Minimum Mean-Squared Error) 추정 방식을 이용하면 LS 방식으로 추정된 \hat{H}_{LS} 로부터 AWGN 잡음에 더욱 강건한 채널 추정을 할 수 있다[5].

III. 여러 가지 안테나 구조에 따른 BER

안테나 다이버시티 사용은 고전적인 방법으로 송신기에 하나의 안테나와 수신기에 다수의 안테나를 사용하는 방법(MRRC: Maximal Ratio Receive Combining)과 신기술로 송신기에 다수의 안테나와 수신기에 하나의 안테나를 사용하는 방법(STBC: Space Time Block Coding)[1]이 있다. 그러므로 MRRC 방식은 이동국에서 기지국 방향인 상향링크(uplink)에 적합하며 STBC 방식은 하향링크(downlink)에 적합하다. 두개의 수신 안테나를 사용하는 MRRC 방식에서는 송신기에서 보내어진 변조된 신호는 두개의 채널로 각각 다른 경로의 페이딩을 지나게 된다. 수신기에 도착한 각 신호는 하나의 신호로 합쳐지게 되므로 원 신호 s_0 보다는 큰 크기의 값을 얻을 수 있게 됨에 따라 수신된 신호의 크기는 커지고 잡음은 감소하여 E_b/N_0 가 좋아진다. 두개의 전송 안테나와 한개의 수신 안테나를 갖는 STBC는 최초로 Alamouti에 의해 제안되었다[1]. 두개의 신호가 두개의 안테나로 동시에 전송되며 이 신호들은 각각 두개의 독립적인 채널을 거쳐 한개의 수신 안테나에 도착한다. 수신기에서 이 두 신호들을 결합시켜서 안테나 다이버시티 효과를 얻게 된다.

16-QAM OFDM 시스템에서는 대개의 경우에 주파수 선택적 Rayleigh 채널이 각 부반송파에 대

해서는 주파수 비선택적 채널이 되도록 시스템이 구성되는데, 이 경우에 16-QAM OFDM 시스템의 BER 특성은 16-QAM 시스템의 BER 특성과 같다. 먼저 선형적인 HPA를 사용하며 송수신기 간의 주파수 편차가 없으며 채널 추정을 정확하게 할 수 있는 이상적인 OFDM 시스템의 BER 특성을 분석한다. 그러면 그 BER은 아래 식 (9)와 같다.

$$P_b = \int_0^\infty P_b(r_b)P(r_b)dr_b \quad (9)$$

위 식에서 $P_b(r_b)$ 는 16-QAM 시스템에서 Rayleigh 채널 환경에서 AWGN(Additive White Gaussian Noise)에 의한 BER로 다음 식 (10)과 같이 주어진다.

$$P_b(r_b) = 3/4Q(\sqrt{4/5r_b}) \quad (10)$$

위 식에서 $r_b = E_b/N_0$ 이고, 여기서 E_b 는 한 비트 당 신호의 평균 에너지이며 N_0 는 AWGN의 power spectral density 이다. 식 (9)에서 $P(r_b)$ 는 L 개의 송신 안테나와 M 개의 수신 안테나를 갖는 시스템을 고려할 때 수신 신호의 E_b/N_0 의 확률밀도함수이다. 이때 이 확률밀도함수는 아래 식 (11)과 같은 $2LM$ 의 자유도를 갖는 chi-square 확률밀도함수가 된다. 이때 송·수신 안테나 사이에 형성된 LM 개의 채널이 모두 독립적인 Rayleigh 페이딩 채널이라 가정하며, 한 OFDM 심볼 시간 내에서 채널은 변화하지 않는 것을 가정한다.

$$P(r_b) = r_0^{-LM} r_b^{LM-1} e^{-r_b/r_0} / \Gamma(LM) \quad (11)$$

위 식에서 $\Gamma(M) = (M-1)!$ 이고 r_0 는 각 경로의 E_b/N_0 를 나타낸다. 그러면 MRRC와 STBC에 대한 평균 BER은 다음 식 (12)와 같다.

$$P_b(r_0) = \frac{\alpha}{2} \left[1 - \mu \sum_{k=0}^{LM-1} \binom{2k}{k} \left(\frac{1-\mu^2}{4} \right)^k \right] \quad (12)$$

위 식에서 $\mu = \sqrt{\beta r_0 / (\beta r_0 + 2)}$ 이며 α 와 β 는 16-QAM인 경우 3/4와 4/5의 크기를 각각 가진다. 위 식들을 이용하여 안테나의 구조에 따른 시스템의 BER 특성을 분석할 수 있다. 그림 2에 MRRC와 STBC 안테나를 사용한 이상적인 16-QAM OFDM

시스템에서 송·수신 안테나 수에 따른 BER 특성 곡선이 도시되었다. 이 그림에서 한 개의 송신 안테나와 두 개의 수신 안테나를 사용한 MRRC와 두 개의 송신 안테나와 한 개의 수신 안테나를 사용한 시스템의 BER 곡선은 동일한 것을 알 수 있다. 즉 송·수신 안테나 수의 차이에 따라 다이버시티 차수가 결정되기 때문에 동일한 다이버시티 차수를 갖는 MRRC와 STBC의 BER은 같은 성능을 보인다. 두 개의 송신 안테나를 사용하는 STBC의 경우 각 안테나의 송신 전력을 1/2로 주게 되면 각 안테나의 송신 전력을 1로 주었을 때 같은 10^{-4} 의 BER을 얻기 위해 E_b/N_0 가 약 3dB 정도 더 소요되는 것을 알 수 있다.

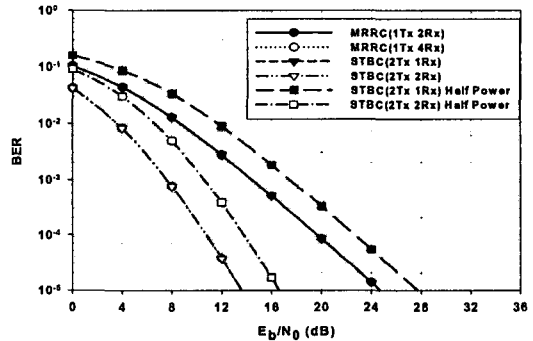


그림 2. 안테나에 따른 OFDM 시스템의 BER
Fig. 2 BER of OFDM systems with various antenna

IV. 시뮬레이션 및 결과 분석

모의실험에 사용한 다중 경로 채널 모델로는 GSM(Global Systems Mobile communications) 표준 기구에서 TU(Typical Urban area)의 무선 채널 모델로 제시한 12-탭 프로파일을 선택한다. 이 채널의 경우는 전형적인 도시 채널 환경의 다중 경로 채널 모델로 각 탭은 고정된 시간 지연과 상대적인 평균 전력을 갖는데 탭 계수의 크기는 Rayleigh 분포를 갖는 랜덤 변수로 매 심볼마다 서로 독립적으로 그 크기가 변화 된다. 각 부채널에 대한 데이터 변조는 Gray code를 이용한 16-QAM 변조를 사용하고, 변·복조를 위하여 2048-point IFFT/FFT를 사용한다. 다중 반송파 방식에서는 HPA의 비선형성, 수신 주파수 편차, 다중 경로 페이딩, AWGN 등에 의하여 비트 에러율이 증가하는 문제가 있다. 따라서 이와 같은 여러 원인들이

종합적으로 적용할 때의 안테나 구조에 따른 실제 OFDM 시스템의 성능을 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 방법으로 분석하고자 한다. HPA의 비선형성에 의하여 시스템에 성능 저하가 생기므로 보통 HPA 출력을 작게 감소 시켜서 사용한다(OBO: Output Back-Off). 여기에서 OBO를 다음 식 (13)과 같이 정의한다.

$$OBO = P_{sat} / P_{out} \quad (13)$$

여기서 P_{sat} 와 P_{out} 는 각각 HPA의 최대 출력 전력과 평균 출력 전력을 나타낸다. OBO가 7dB 이상 시에 좋은 특성을 보이는 것으로 연구되었으므로[3], 본 논문에서도 모두 OBO가 7dB인 경우를 가정한다. 그림 3에 주파수 편차 및 HPA 비선형 왜곡을 모두 고려한 OFDM 시스템에서 두개의 수신 안테나를 사용하는 MRRC 안테나 방식에서 발생하는 BER을 도시하였다. 또한 그림 4에는 4개의 수신 안테나를 사용하는 MRRC 방식에서의 BER이 분석되었다. STBC 안테나 다이버시티 사용 시의 비트 에러율이 역시 모의실험에 의한 방법으로 분석되었다. 두개의 송신 안테나와 한개의 수신 안테나를 사용하는 STBC 경우는 그림5에, 그리고 두개의 송신 안테나와 두개의 수신 안테나를 사용하는 STBC 방식에서의 BER 특성은 그림 6에 도시되었다. 이 그림들에서와 같이 주파수 편차, HPA 비선형 왜곡 및 채널 추정 에러가 없는 이상적인 시스템에 근접하는 비트 에러율 특성을 얻기 위하여 간편한 LS 채널 추정 방법을 이용하는 경우에 OBO는 7dB 이상, 주파수 편차는 0.01 이하가 요구된다. 이론적으로는 식 (11)에서와 같이 두 방식에서 똑같은 크기의 안테나 다이버시티 이득을 얻을 수 있다. 그러나 주파수 편차, HPA 비선형 왜곡 및 AWGN 등에 의하여 채널 추정 오차가 서로 다르게 발생하는 원인으로 MRRC가 비트 에러율 성능 면에서 더 유리한 것을 알 수 있다.

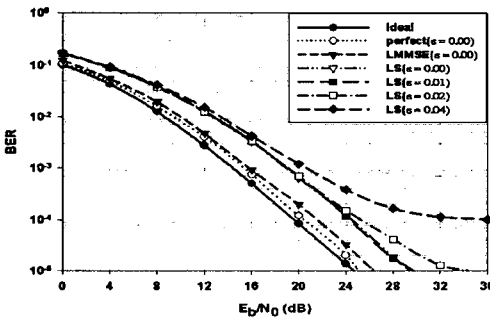


그림 3. MRRC에서의 BER(1Tx, 2Rx, OBO=7dB)
Fig. 3 BER by MRRC(1Tx, 2Rx, OBO=7dB)

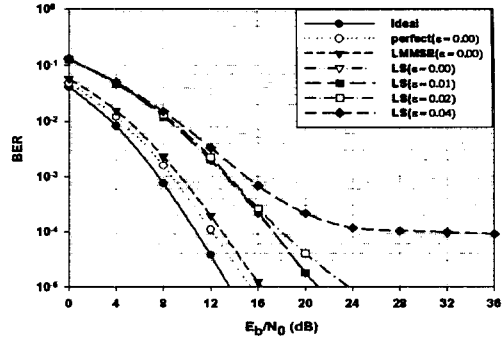


그림 4 MRRC에서의 BER(1Tx, 4Rx, OBO=7dB)
Fig. 4 BER by MRRC(1Tx, 4Rx, OBO=7dB)

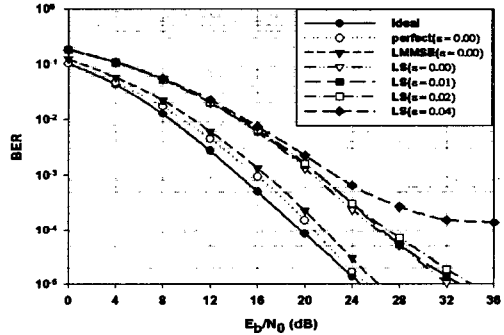


그림 5 STBC에서의 BER(2Tx, 1Rx, OBO=7dB)
Fig. 5 BER by STBC(2Tx, 1Rx, OBO=7dB)

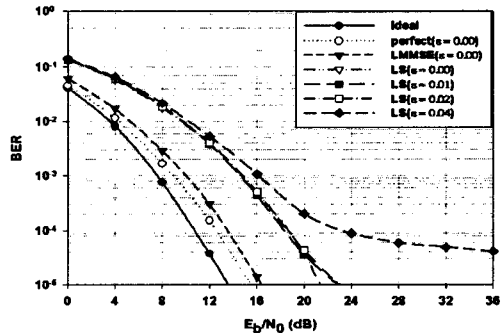


그림 6 STBC에서의 BER(2Tx, 2Rx, OBO=7dB)
Fig. 6 BER by STBC(2Tx, 2Rx, OBO=7dB)

V. 결 론

여러 가지 안테나 구조에 따른 OFDM 시스템의 BER 특성을 분석하였다. HPA의 비선형성, 수신 주파수 편차가 모두 존재하는 실제 시스템의 BER 성능은 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 방법으로, 그리고 이상적인 시스템에 대한 성능은 이론적으로도 분석하였다. 시스템 구조에 따라 데이터가 변조, 비선형 전력 증폭, 주파수 선택적 시블변 Rayleigh 페이딩, 주파수 편차가 존재하는 클럭으로 복조, 파일럿 심볼을 이용한 채널 추정, 보상되는 과정에 대하여 각 블록마다 그 신호 변환 과정을 복소 포락선 합수로 표현하였다. 이 수식들을 이용하여 컴퓨터 모의 실험에 의한 방법으로 시스템의 비트 오류율 성능을 분석하였다. 이 때 안테나 다이버시티 방법으로 여러 개의 송수신 안테나를 사용하는 MRRC와 STBC 기법을 사용하고 그 성능을 비교하였다.

이러한 안테나 다이버시티를 사용하고 LS 채널 추정 방식으로 채널 추정을 하는 실제 시스템에서는 OBO가 7 dB 이상이고 주파수 편차 ϵ 이 0.01 이하인 경우에, 주파수 편차가 없고 선형 HPA를 사용하며 정확한 채널 추정이 가능한 경우에 발생하는 이상적인 비트 오류율에 접근하는 성능 특성을 보인다. 그러나 위와 같은 특성의 시스템에서도 HPA 비선형성, 수신 주파수 편차 및 AWGN 으로 인한 채널 추정 어려움에 인하여 이상적 경우와 동일한 크기의 비트 오류율을 얻기 위하여 실제 시스템의 경우 MRRC에서는 4 dB, STBC에서는 6 dB의 E_b/N_0 가 더 소요되는 것으로 분석되었다.

참고문헌

- [1] T. H. Liew and L. Hanzo, "Space-Time Codes and Concatenated Channel Codes for Wireless Communications", Proc. IEEE., vol.90, no.2, pp.187-219, Feb. 2002.
- [2] L. C. Cimini, Jr., "Analysis and simulation of a digital mobile channel using orthogonal frequency division multiplexing", IEEE

Trans. Commun.vol.33, no.7, pp.665-675, July 1985.

- [3] 최승국, 임정욱, "안테나 다이버시티를 이용한 다중 반송파 시스템의 성능 분석", 한국해양정보통신학회논문지, 8권 2호, pp.250-257, 2004년 4월.
- [4] G. Karam and H. Sari, "Analysis of predistortion, equalization, and ISI cancellation techniques in digital radio systems with nonlinear transmit amplifiers", IEEE Trans. Commun., vol.37, no.12, pp.1245-1253, Dec. 1989.
- [5] O. Edfors, M. Sandell and P. O. Börjesson, "OFDM channel estimation by singular value decomposition", IEEE Trans. Commun., vol.46, no.7, pp. 931-938, Jul. 1998.

저자소개



최승국(Seung-Kuk Choi)

2004년 8월 제8권 제5호 참조
1989년~현재: 인천대학교 정보통신공학과 교수



이기영(Ki-Young Lee)

1982년 : 연세대학교 전기공학과 공학사
1984년 : 연세대학교 대학원 전기공학과 공학석사
1993년: 미국 알라바마대학교 전기 및 컴퓨터공학과 공학박사
1994년~현재: 인천대학교 정보통신공학과 부교수
* 관심분야: 인터넷 트래픽 제어, 네트워크보안