

다중 사용자 다이버시티를 이용한 OFDM 시스템의 성능 분석

최승국*

Performance Evaluation of OFDM Systems Using Multiuser Diversity

Seung-Kuk Choi*

Department of Information and Communications Engineering, Incheon University, Incheon 406-772, Korea

요 약

우수한 성능의 OFDM 전송을 위하여, 각 사용자에게 유리한 채널을 할당하는 다중 사용자 다이버시티(MUD) 방식이 최근 사용되고 있다. 또한 시스템의 성능을 향상시키기 위하여 STBC 안테나 다이버시티 방식이 현재 사용되고 있다. 파일럿 심볼을 이용하여 전송 채널을 추정하는 현 시스템에서는 채널 추정 오차로 인하여 시스템의 성능이 열화 된다. 그러므로 본 논문에서 채널 추정 오차의 영향을 고려하여 MUD STBC OFDM 전송 시스템의 비트 오류율 성능을 분석한다. 분석 결과, MUD를 사용한 시스템에서는 같은 비트 오류율에 대하여 사용자 수가 32인 경우에 5 dB 정도의 다이버시티 전력 이득을 얻는다.

ABSTRACT

Recently, multiuser diversity(MUD) technique is used to improve the performance of OFDM transmission systems. With STBC antenna diversity technique, the performance of OFDM systems can be also improved. Pilot symbol is used for the channel estimation in OFDM systems. However, imperfect channel estimates in this systems degrade the performance. The performance of MUD STBC OFDM systems using pilot symbol, gauged by the bit error rate, is analyzed considering the channel estimation error. Result shows that MUD can improve the required power by a factor of approximately 5 dB for users number 32.

키워드 : OFDM, 다중 사용자 다이버시티, STBC

Key word : OFDM, multiuser diversity, STBC

접수일자 : 2014. 10. 15 심사완료일자 : 2014. 11. 17 게재확정일자 : 2014. 12. 03

* **Corresponding author** Seung-Kuk Choi(E-mail: skchoi@incheon.ac.kr, Tel:+82-32-835-8282)

Department of Information and Communications Engineering, Incheon University, Incheon 406-772, Korea

Open Access <http://dx.doi.org/10.6109/jkiice.2015.19.2.293>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

©This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

I. 서 론

OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 전송 방식에서는 송신하려는 데이터를 병렬화한 후에 이를 다수의 직교 부반송파를 사용해서 전송하기 때문에 심볼 주기가 짧은 고속 데이터 전송 시 발생하는 심볼간 간섭(ISI: inter symbol interference) 문제를 해결할 수 있다.

송신 심볼이 다중 경로 전송으로 인한 주파수 선택적 Rayleigh 채널과 부가성 백색 가우스 잡음(AWGN: Additive White Gaussian Noise)채널을 통하여 전송될 때 그 크기 및 위상이 변화된다. 이러한 심볼 신호를 원래의 정확한 모습으로 복원하기 위하여, 파일럿 심볼을 이용하여 전송 채널을 추정하는 방식(PSAM: Pilot Symbol Assisted Modulation)이 사용되고 있다. 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 BER 성능을 향상시키기 위하여, 여러 개의 송신 안테나를 이용하는 STBC(Space Time Block Coding) 안테나 다이버시티 기법이 사용되고 있다[1]. OFDM 전송 방식을 사용하는 4세대 이동통신을 위한 LTE 및 WiMAX 표준에서는 수신기에서 전송 채널의 정보를 송신기 쪽으로 보내고, 송신기에서 각 사용자들에게 전송 이득이 큰 채널들을 선택하여 전송함

으로서 시스템의 성능을 더욱 향상 시킬 수 있는 다중 사용자 다이버시티(MUD: Multiuser Diversity) 방법을 제시하고 있다[1, 2].

STBC와 MUD 방식을 동시에 사용하면 시스템의 성능을 더욱 향상 시킬 수 있다[1]. STBC MUD 다이버시티 방법을 모두 사용할 때의 시스템 성능이 [3]에서 분석되었다. 그러나 [3]에서는 정확한 전송 채널 추정을 가정한 이상적인 경우에 대하여 결과를 도출 하였다.

파일럿 심볼을 이용하여 전송 채널을 추정하는 실제 시스템에 대한 연구는 아직 이루어지지 아니하였다. 그러므로 본 논문에서는 채널 추정 오차의 영향까지 고려하여, 주파수 선택적인 다중 경로 채널 하에서 각 사용자에게 유리한 전송 채널을 선택하여 사용하는 MUD PSAM STBC OFDM 시스템의 BER 성능을 분석하고자 한다.

II. OFDM 전송 시스템

PSAM 방식의 16-QAM OFDM 시스템 구성도가 그림 1에 도시되었다. 입력 데이터는 우선 I(Inphase) 성분 비트열과 Q(Quadrature) 성분 비트열로 나누어진다. 각 I와 Q성분은 함께 복소 심볼 $X(k)$ 로 매핑된다. QAM 매핑된 복소 심볼은 OFDM 변조기로 전송되며 그 복소 심볼은 병렬의 N 개 부반송파로 역 푸리에 변환(IFFT : Inverse Fast Fourier Transform)에 의해 변조된다. IFFT

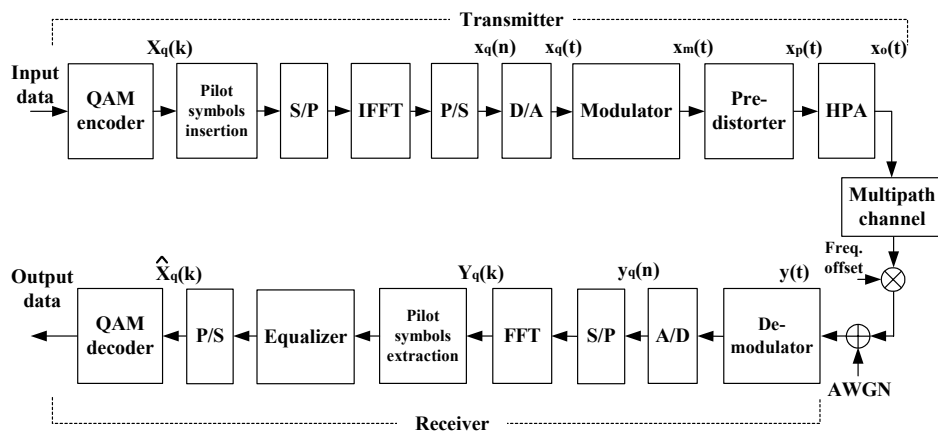


그림 1. OFDM 전송 시스템의 구성도
 Fig. 1 Block diagram of OFDM transmission system.

된 후 출력된 n 번째 샘플값은 다음과 같다.

$$x(n) = (1/\sqrt{N}) \sum_{k=0}^{N-1} X(k) \exp(j2\pi nk/N) \quad (1)$$

채널 모델은 L 탭의 값을 가지는 유한 임펄스 응답 필터를 가정한다. 그러면 채널의 임펄스 응답은 다음과 같다.

$$h(t) = \sum_{l=0}^{L-1} z(l) \delta(t - \tau_l T_s) \quad (2)$$

이 때 $z(l)$ 은 독립적이고 평균이 0인 복소 가우시안 랜덤 변수이고, τ_l 는 샘플링 주기 T_s 에 의해 정규화된 l 번째 임펄스의 지연이다. 그러면 이러한 채널을 통하여 전송된 신호는 다음 식 (3)과 같다.

$$y(n) = \sum_{l=0}^{L-1} z(l)x(n-l) + w(n) \quad (3)$$

이때 $w(n)$ 은 샘플링 시간 n 때 더해지는 AWGN 잡음이다. 이 수신 신호를 복조하기 위하여 $y(n)$ 은 FFT를 거쳐 $Y(k)$ 로 복조된다.

$$Y(k) = H(k)X(k) + W(k) \quad (4)$$

이때,

$$H(k) = \sum_{l=0}^{L-1} z(l) \exp(-j2\pi kl/N) \quad (5)$$

$$W(k) = (1/\sqrt{N}) \sum_{n=0}^{N-1} w(n) \exp(-j2\pi kn/N) \quad (6)$$

그러므로 심볼 $Y(k)$ 는 k 번째 부반송파에 의해 전송된 $X(k)$ 과 주파수 영역 상의 전달 함수 $H(k)$ 와 곱해지고 여기에 채널의 잡음 $W(k)$ 이 더해진 값이 된다. 그러므로 송신 심볼 $X(k)$ 가 k 번째 부반송파를 통하여 전송되면서 다중 경로 주파수 선택적 페이딩, AWGN의 영향을 받아서 그 크기와 위상에 변화가 생긴 $Y_q(k)$ 로 수신단에서 재생된다. 따라서 $Y_q(k)$ 는 각 부반송파의 전달 함수 $H(k)$ 로 추정된 채널 전달 함수 $\hat{H}(k)$ 의 역과 곱해져서 등화 된다.

$$\hat{X}_q(k) = Y_q(k)/\hat{H}(k) \quad (7)$$

최종적으로 $\hat{X}_q(k)$ 가 애초에 송신된 $X_q(k)$ 와 같은 정상도 내에 속하는가의 여부에 따라 데이터 BER이 결정된다. 파일럿 심볼이 주파수 영역 상에서 채널 전달 함수 $H(k) = \alpha \exp(j\theta)$ 을 추정하는데 사용된다. 모든 N 개의 부반송파에 N 개의 파일럿 심볼 $P(k) \in \{-1, 1\}$ 이 전송되어 진다. 다음 식 (8)과 같이, 수신단에서 채널 전달 함수는 수신된 샘플 $Y(k)$ 를 $P(k)$ 로 나눔으로써 추정될 수 있다(LS: Least Squares 채널 추정).

$$\hat{H}(k) = \hat{\alpha} \exp(j\hat{\theta}) = H(k) + \frac{W(k)}{P(k)} \quad (8)$$

III. STBC 안테나 다이버시티

두 개의 송신 안테나를 사용하는 STBC 시스템에서는, 먼저 두 개의 신호인 $X_{Tx_1}(k)$ 와 $X_{Tx_2}(k)$ 가 두 개의 안테나로 동시에 전송 된다. 첫 번째 시간 t 에서 $X_0(k)$ 와 $X_1(k)$ 가 동시에 각각 IFFT된 후 두 개의 안테나로 각각 동시에 전송되고, 두 번째 시간 $t + T$ 에는 $-X_1^*(k)$ 와 $X_0^*(k)$ 가 두 개의 안테나로 각각 동시에 전송 된다. 여기서 T 는 한 심볼의 길이를 나타낸다. 첫 번째 안테나로 전송되는 $-X_1^*(k)$ 와 두 번째 안테나로 전송되는 $X_0^*(k)$ 는 첫 번째 시간에서 전송되는 심볼들의 복소 공액 값이다[2]. 두개의 전송 안테나로부터 전송되는 신호는 각각 두개의 독립된 채널을 거쳐 한 개의 수신 안테나에 도착하게 된다. 수신 안테나에 도착된 신호들은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} Y_1(k) &= Y(t) = H_1(k)X_{Tx_1}(k) + H_2(k)X_{Tx_2}(k) + W_1(k) \\ &= H_1(k)X_0(k) + H_2(k)X_1(k) + W_1(k) \\ Y_2(k) &= Y(t+T) = H_1(k)X_{Tx_1}(k) + H_2(k)X_{Tx_2}(k) + W_2(k) \\ &= -H_1(k)X_1^*(k) + H_2(k)X_0^*(k) + W_2(k) \end{aligned} \quad (9)$$

이때 $Y_1(k)$ 와 $Y_2(k)$ 은 각각 첫 번째 시간 t 때와 두 번째 시간 $t + T$ 때 도착된 신호이다. STBC 복호기는 수신된 $Y_1(k)$ 과 $Y_2(k)$ 의 신호를 두 채널 추정치 $\hat{H}_1(k)$ 및 $\hat{H}_2(k)$ 와 아래와 같이 결합하여 원 심볼 $X_0(k)$ 와 $X_1(k)$ 의 추정치 $\hat{X}_0(k)$ 와 $\hat{X}_1(k)$ 를 출력한다.

$$\hat{X}_0 = \hat{H}_1^* Y_1 + \hat{H}_2 Y_2^* \quad (10)$$

$$\hat{X}_1 = \hat{H}_2^* Y_1 - \hat{H}_1 Y_2^* \quad (11)$$

결과적으로 $\hat{X}_0(k)$ 와 $\hat{X}_1(k)$ 는 식 (10)과 (11)에서와 같이 각 채널 전달 함수의 곱과 같은 형태의 신호 이득을 얻는다. 그러나 정확한 채널 추정이 이루어지지 않으면 (9) - (11)의 식들에서 부호만 다르고 크기가 거의 같은 두 항의 합이 서로 상쇄되지 못하므로 원 심볼 추정에 그만큼 에러가 발생된다. 그러므로 PSAM 방식의 실제 시스템에서 BER 성능이 열화 된다.

반송 주파수 편차 $\epsilon = 0.0$ 이고 선형적인 HPA를 사용하는 경우에는 부반송파 간에 간섭이 존재하지 않는다. 그러므로 각각의 다중 반송파로 전송되는 심볼은 모두 독립적인 16-QAM 변조 방식에서의 BER 성능을 갖게 된다. STBC 기법을 사용하는 16-QAM OFDM 시스템에서 발생하는 BER은 다음식과 같다[4].

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

위 식에서 $\bar{\gamma}_b = \Omega E_b / N_0$ 인데, E_b 는 한 데이터 비트 당 신호의 평균 에너지이고 N_0 는 AWGN의 전력 스펙트럼 밀도이며 Ω 는 페이딩 전송 채널의 평균전력이다. L 과 M 은 송신 안테나와 수신 안테나의 수인데 STBC 경우 $L = 2$, $M = 1$ 이다. $\mu = \sqrt{\beta \bar{\gamma}_b / (\beta \bar{\gamma}_b + 2)}$ 로 식 (12)에서 α 와 β 는 16 QAM의 경우 3/4와 4/5이다.

IV. 다중 사용자 다이버시티

기지국(BTS: Base Transceiver Station)에서 여러 사용자에게 신호를 전송하면, 각 사용자에 대한 전송

채널은 그림 2와 같이 서로 다른 주파수 선택적 채널 특성을 가지게 된다. 그러므로 사용자들에게 부반송파들을 할당할 때, 각 사용자 채널에서 전송 이득이 큰 주파수 대역(그림 2 good band for each user) 내의 부반송파들을 선택 할당하여 성능을 향상 시키는 것이 다중 사용자 다이버시티(MUD) 방식이다.

MUD 이득을 얻으려면 기지국과 사용자 간의 전송 채널 정보가 필요하다. 그러므로 기지국에서 사용자 쪽으로 데이터 이외에 파일럿 심볼을 전송하고, 수신기에서 이 파일럿 심볼을 이용하여 채널정보를 얻은 다음, 다시 기지국 쪽으로 채널 정보(feedback channel information)를 전송한다. 기지국에서는 이 채널 정보를 이용하여 각 사용자에게 유리한 부반송파들을 할당한다. LTE 표준에서는 주파수 대역 내에 연속적으로 인근에 배치된 12개의 부반송파(RB: Resource Block)들을 한 그룹으로 묶는 방식으로 부반송파들을 할당한다[5]. LTE 기지국에서는 MUD를 위하여 각 사용자 전송 채널에서 가장 채널 이득이 큰 두 개의 RB를 선택하여 각 사용자에게 할당한다.

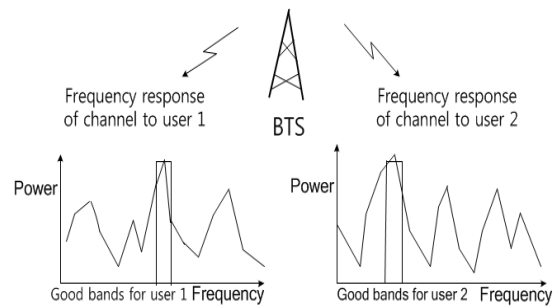


그림 2. MUD 시스템의 부반송파 할당
Fig. 2 Subcarrier allocation of MUD system.

송신 심볼이 다중 경로 전송으로 인한 주파수 선택적 Rayleigh 채널과 AWGN 잡음 채널을 통하여 전송될 때, 그 크기 및 위상이 변화되어 성상도에 변화가 생긴다. 파일럿 심볼을 이용한 PSAM 방식은 데이터 심볼 이외에 크기와 위상이 알려진 파일럿 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 원 인들에 의하여 정확한 추정 및 등화가 이루어지지 못 하여 수신단에서 원래 데이터를 재생 시 BER이 증가 된다.

V. MUD PSAM STBC OFDM 성능 분석

두 개의 송신 안테나와 한 개의 수신 안테나를 사용하는 STBC 안테나 다이버시티 방식을 사용하는 K명의 사용자에게는 총 $2 \times K$ 개의 전송 채널이 존재한다. MUD 다이버시티 방식에서는 각 송신 안테나와 수신 안테나 간 전송 채널의 주파수 대역 중에서 각 사용자 에게 유리한 이득이 큰 부반송파 주파수 대역을 각각 할당함으로써 시스템의 평균 신호 잡음비(SNR: Signal-to-Noise Ratio)를 향상 시킬 수 있다. 정확한 전송 채널 추정을 고려한 MUD STBC 시스템에서 향상된 실효 SNR은 [3]에서 다음과 같이 분석되었다.

두 개의 송신 안테나에서 보내진 신호가 k번째 사용자 수신기에 도착된 신호 $Y(k)$ 는 아래 식과 같다.

$$Y(k) = \sum_{i=1}^2 H_k^i X_k^i + W_k^i \quad (13)$$

k번째 사용자에 대한 실효 SNR γ_k 는 아래 식과 같이 주어진다.

$$\gamma_k = \gamma_o |H_k^{tot}|^2 = \gamma_o \sum_{i=1}^2 |H_k^i|^2 \quad (14)$$

이때 $\gamma_o = \frac{E_s}{2N_o}$ 이며 E_s 는 송신 신호 에너지 합이다. γ_k 는 자유도 4인 chi-square 불규칙 변수이며 그 확률밀도함수(pdf: probability density function)는 아래 식과 같다.

$$f_{\gamma_k}(\gamma_k) = \frac{2^2}{SNR^2} \gamma_k e^{-\frac{2\gamma_k}{SNR}} \quad (15)$$

총 K명 사용자에게는 SNR값 γ_k 를 가지는 K개의 전송 경로가 존재하는데 MUD 방식에서는 각각의 사용

자에게 그 중 가장 큰 SNR을 가지는 부반송파들을 할당한다. 그러면 모든 사용자에 대하여 평균 실효 SNR γ_{max}^K 값은 향상되어 더 큰 값을 확률적으로 가지게 된다.

$$\gamma_{max}^K = \max_{k=1, \dots, K} \gamma_k \quad (16)$$

실효 SNR의 확률밀도함수 $f_K(\gamma_{max}^K)$ 는 order statistics에 의해 구해질 수 있다. 그러면 MUD STBC 시스템에서 향상된 평균 실효 SNR γ_{max}^K 의 평균값 $E\{\gamma_{max}^K\} = \overline{\gamma_{max}^K}$ 는 아래 식과 같다[3].

$$\begin{aligned} \overline{\gamma_{max}^K} &= \int_0^\infty \gamma_{max}^K f_K(\gamma_{max}^K) d\gamma_{max}^K \quad (17) \\ &= \sum_{s=0}^r a_s(2,r) \frac{(2+s)!}{(1+r)^{2+s+1}} \end{aligned}$$

이 때 $a_s(2,r)$ 은 급수 전개 $[\sum_{m=0}^1 (\frac{x^m}{m!})]^r$ 에서 $x^s, s=0, \dots, r$ 의 계수이다. 위 식들에서와 같이 전송 채널의 SNR γ 값은 MUD 방식을 사용하게 되면 평균 실효 SNR값 $\overline{\gamma_{max}^K}$ 로 향상된다.

그러나 이론적인 위 분석에서는 실제 PSAM 시스템에서의 채널추정 오차의 영향이 고려되지 않았다. 그러므로 본 논문에서 파일럿 심볼을 이용하여 채널을 추정하는 PSAM MUD STBC 시스템의 성능을 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 방법으로 구한다. FFT의 크기는 $N=1024$ 이고 채널의 대역폭은 $10MHz$ 로 선정한다. 따라서 부반송파 간격 $\Delta f = 9.766kHz$ 이며 샘플링 주파수는 $10MHz$ 이다. 먼저 한 블록 시간 동안에는 모든 부반송파들에게 해당 채널에 1, -1, ... 모양의 파일럿 심볼들을 전송하여 전송 채널을 추정하고, 데이터 심볼이 보내지는 그 다음 블록 동안에는 수신단에서 추정된 채널 전달 함수를 이용하여 FFT된 데이터 심볼들을 등화시킨다.

이 때 데이터 심볼 블록 시간동안의 채널 특성은 그 전 파일럿 심볼 시간 때의 채널 특성과 달리 다중 경로 페이딩에 의하여 연속적으로 변화된다. 그림 1에서의 전송 시스템 구성도에서와 같이 입력 데이터는 Gray 코드를 이용하여 16-QAM 심볼로 매핑 된다. 이 심볼들은

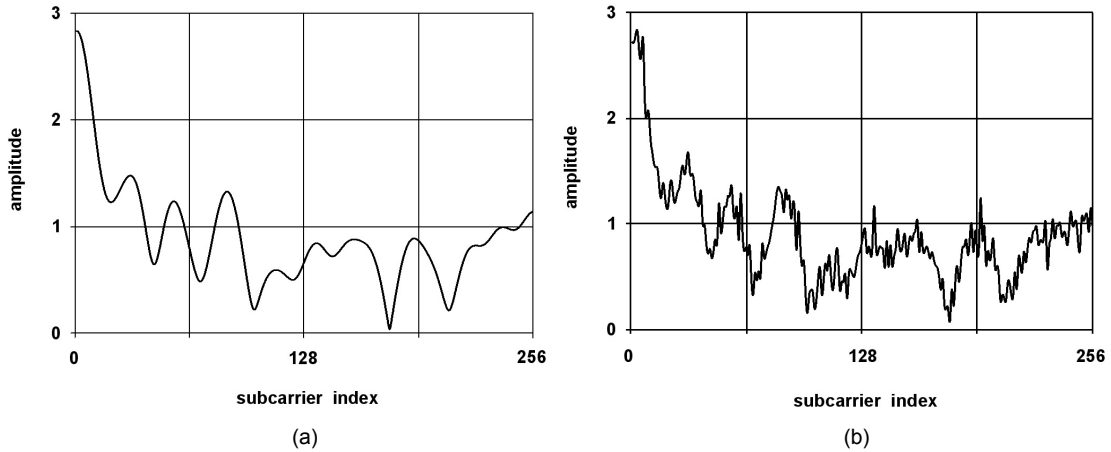


그림 3. 주파수 선택적 채널 추정 (a) 정확추정, no AWGN, (b) 파일럿 심볼 LS추정 $\gamma_b=10$ dB
 Fig. 3 Frequency selective channel estimate (a) perfect est., (b) pilot symbol LS est. $\gamma_b=10$ dB

병렬화된 후, OFDM 변조되어 다중 경로 채널을 통하여 전송된다.

본 논문에서 모의실험에 사용한 다중 경로 채널 모델로는 TU(Typical Urban area)의 무선 채널 모델로 적합한 12탭(tap) 전력 지연 프로파일(power delay profile)을 선택한다[5]. 이것은 전형적인 도시 환경 채널 모델로 최대 지연 시간이 $5\mu s$ 이고 rms 지연 시간이 $0.4\mu s$ 이다. 각 탭은 고정된 시간 지연과 상대적인 평균 전력을 가지는데, 탭 계수의 크기는 Rayleigh 분포를 가지는 랜덤 변수로 매 OFDM 심볼 시간 때마다 독립적으로 그 크기가 변화된다. 그러므로 이러한 채널의 임펄스 응답 $h(t)$ 는 수식 (2)와 같이 표현된다. 그림 3(b)에 $\gamma_b = 10$ dB인 AWGN 잡음 채널에서 파일럿 심볼들을 이용하여 LS 채널 추정된 주파수 선택적 채널의 이득 $|H(k)|$ 가 도시되었다. 이 그림에서 정확한 채널 추정 그림 3(a)는 채널의 임펄스 응답 $h(t)$ 를 Fourier 변환하여 구하였다. BER 성능을 향상시키기 위하여 두 개의 송신 안테나와 하나의 수신 안테나로 구성된 STBC를 적용한 OFDM 전송 시스템의 BER 성능이 컴퓨터 모의 실험 방법으로 그림 4에 분석되었다(총 사용자 $K=1$). 그림 4에서 ideal BER 곡선은 이론식 (12)와 일치한다. 파일럿 심볼을 이용한 LS 채널 추정의 STBC 시스템에서 BER 성능(그림 4의 LS est.)은 그러나 채널 추정 오차로 인하여 정확한 채널 추정의 이상적 경우(그림 4의

ideal) 보다 똑같은 BER값을 얻기 위하여 $\bar{\gamma}_b$ 가 6 ~ 8 dB 정도 더 소요됨을 알 수 있다.

PSAM MUD STBC 방식에서의 BER 성능을 분석하기 위하여 컴퓨터 모의실험이 수행되었다.

1024개의 부반송파들이 32 사용자에게 32개씩 할당된다. 이 때 32개 부반송파들은 각 사용자에게 유리한 주파수 대역 내에 연속적으로 배치된다. 분석 결과, MUD를 사용하는 MUD STBC PSAM 16-QAM OFDM 시스템에서 BER 성능(그림 5의 $K=1$ (LS est.))은 MUD를 사용하지 않는 경우(그림 4의 LS estimation, $K=1$)보다, 같은 BER에 대하여 1 dB 정도의 $\bar{\gamma}_b$ 다중 사용자 다이버시티 이득을 얻을 수 있다.

사용자 수 K 가 증가하면 할수록 더 많은 수의 전송 경로가 존재하여, 각 사용자에게 더욱 전송 이득이 큰 부반송파들을 할당할 수 있다. 그러므로 그림 5에서와 같이 사용자 수가 1에서 8 및 32로 증가함에 따라 $K=1$ 인 경우에 비해서 3 dB 및 4 dB 정도의 $\bar{\gamma}_b$ 다중 사용자 다이버시티 이득을 더 얻을 수 있다. 그림 5에서 $K=1$, ideal BER 성능은 이론식 (14) - (17)에서 구한 평균 실효 SNR값 $\overline{\gamma_{max}^K}$ 을 이용하여 구한 곡선이다. 이 ideal 곡선과 실제 PSAM $K=1$ (LS est.) BER 곡선을 비교하면, 똑같은 BER값에 대하여 채널 추정 오차로 인하여 $\bar{\gamma}_b$ 가 6 ~ 7 dB 정도 더 소요됨을 알 수 있다.

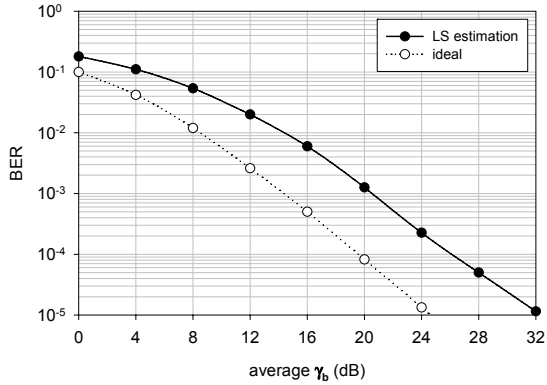


그림 4. STBC PSAM 16-QAM OFDM 시스템의 BER 성능 (K=1)
 Fig. 4 BER of STBC PSAM 16-QAM OFDM system (K=1)

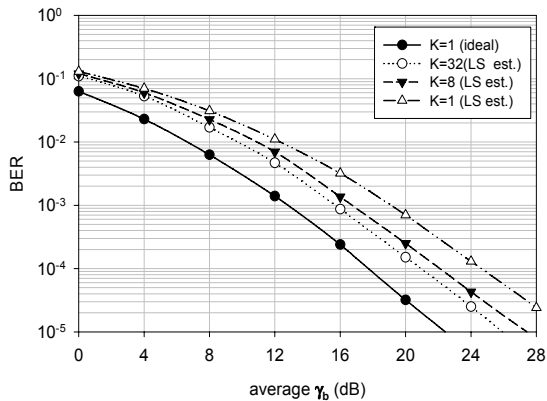


그림 5. MUD STBC PSAM 16-QAM OFDM 시스템의 BER 성능
 Fig. 5 BER of MUD STBC PSAM 16-QAM OFDM system

VI. 결론

파일럿 심볼을 이용하여 채널을 추정하는 실제 MUD STBC PSAM 16-QAM OFDM 시스템의 BER 성능이 분석 되었다. 이러한 시스템의 성능을 분석하기 위하여 우선 데이터가 16-QAM, STBC 코딩, MUD 부반송파 할당, OFDM 변조, Rayleigh 페이딩 채널 전송, STBC 디코딩, OFDM 복조, 채널 추정, 등화되는 모든 과정에 대하여 그 입출력 신호 변환 과정을 이산 복소 포락선 함수들로 표현하였다. 이 수식들을 이용

하고 LTE 표준에 따라 파라미터를 정하여 컴퓨터 모의실험 방법으로 BER 성능을 분석하고 이론식과도 비교하였다.

MUD를 사용하며, 실제의 채널 추정 오차가 존재하는 MUD STBC PSAM 16-QAM OFDM 시스템에서의 BER 성능은, MUD를 사용하지 않는 경우에 비하여, 같은 BER에 대하여 사용자수 K=1인 경우에 1 dB 정도의 $\bar{\gamma}_b$ 다중 사용자 다이버시티 이득을 얻을 수 있다. 사용자 수가 1에서 8 및 32로 증가하면 K=1인 경우에 비해서 3 dB 및 4 dB 정도의 $\bar{\gamma}_b$ 다중 사용자 다이버시티 이득을 더 얻을 수 있다. 정확한 채널 추정 경우와 실제 PSAM 시스템의 BER 성능을 비교하면, 똑같은 BER값에 대하여 채널 추정 오차로 인하여 K=1인 경우 $\bar{\gamma}_b$ 가 6 ~ 7 dB 정도 더 소요됨을 알 수 있다.

감사의 글

이 논문은 인천대학교 2014년도 자체연구비 지원에 의하여 연구되었음.

REFERENCES

- [1] S. Srikanth and A. Murugesu Pandian, "Orthogonal frequency division multiple access in WiMAX and LTE: a comparison," *IEEE Commun. Mag.* vol.50, no.9, pp.153-161, Sept. 2012.
- [2] J. Niu, D. Lee, X. Ren, and G.Y. Li, "Scheduling exploiting frequency and multi-user diversity in LTE downlink systems," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 12, no. 4, pp.1843-1849, April 2013.
- [3] R. Gozali, R.M. Michael, and B.D. Woerner, "The impact of multiuser diversity on space-time block coding," *IEEE Commun. Letter*, vol. 7, no. 5, pp.213-215, May 2003.
- [4] T. Eng and L.B. Milstein, "Coherent DS-CDMA performance in Nakagami multipath fading," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 43, no. 2/3/4, pp.1134-1143, 1995.
- [5] S. Sesia, I. Toufik, and M. Baker, "LTE-The UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice," Wiley, 2nd ed., 2011.



최승국(Seung-Kuk Choi)

1988.12 Braunschweig Univ, 공학박사
1989.3 ~ 현재 인천대학교 정보통신공학과 교수
※관심분야: 통신 시스템, 이동통신, 동기