채널정보를 이용한 STBC OFDM 시스템의 성능 분석

최승국*

Performance Evaluation of STBC OFDM Systems using Channel Information

Seung-kuk Choi*

이 논문은 인천대학교 2011년도 자체연구비 지원에 의하여 연구되었음

요 약

STBC 방식에서는 여러 개의 송신 안테나를 사용함으로써 우수한 성능의 전송이 가능하다. 본 논문에서는 파일럿 심볼을 이용하여 채널을 추정하는 OFDM 시스템에 STBC 안테나 다이버시티 기법을 적용할 때의 시스템 성능을 분석한다. OFDM 전송표준 IEEE 802.16e에서 전송채널의 정보를 송신 측에 다시 보내어 STBC 시스템 성능을 더욱 향상 시키는 방식이 제시되고 있다. 한편, 파일럿 심볼을 이용하여 전송채널을 추정하는 현 시스템에서는 전송채널 추정에러로 인하여 시스템 성능이 열화 된다. 그러므로 채널추정 에러의 영향을 고려하여, 송신 신호가 다중 경로 페이딩 채널을 통하여 전송될 때, 채널정보를 이용하는 STBC OFDM 시스템의 데이터 비트 오류율 성능을 분석한다.

ABSTRACT

STBC is a technique where a multiple antenna signals are transmitted. With this technique, antenna diversity can be achieved. The performance of STBC OFDM system using pilot symbol for the channel estimation is analyzed. IEEE 802.16e standards suggest that the BER performance of STBC system can be improved using channel state information. Pilot symbol is used for the channel estimation in OFDM systems. However, imperfect channel estimates in this systems degrade the performance. The performance of this STBC OFDM systems using channel state information, gauged by the average bit error rate, is analyzed considering the channel estimation error.

키워드

OFDM, STBC, 채널정보, 비트 오류율

Key word

OFDM, STBC, channel information, bit error rate

* 정회원: 인천대학교 정보통신공학과 교수(skchoi@incheon.ac.kr)

접수일자 : 2011. 09. 19

심사완료일자 : 2011. 11. 24

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 심볼 간 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 변화되어 성상도에 변화가 생긴다. 이러한 성상도를 원래의 정확한 모습으로 복원하기 위하여 파일럿 심볼을 이용한 변조 방식(PSAM: Pilot Symbol Assisted Modulation)이 시스템에 사용된다[1]. 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 원인들에 의하여 정확한 추정 및 등화가 이루어지지 못하여 수신단에서 원래 데이터를 재생 시 비트 오류율(BER: Bit Error Rate)이 증가된다. 또한 단말기가 이동 시 발생하는 도플러 효과 등에 의해서 시간적으로 선택적인 전송 채널이 되어 OFDM 한 블록 심볼 시간 중에도 채널이 변하는 시변 채널(time variant channel)인 경우에 역시 인접 부반송파 간 간섭(ICI: Inter Carrier Interference)이 발생되어 BER이 증가된다[2].

OFDM 수신 시 비트 에러율(BER: bit error rate) 성능을 향상시키기 위하여, 여러 개의 송신 안테나를 이용하는 STBC(Space Time Block Coding) 안테나 다이버시티 기법이 사용될 수 있다[3]. OFDM 전송방식을 사용하는 4세대 이동통신을 위한 IEEE 802.16e 표준에서는 수신기에서 전송채널의 정보를 송신기 쪽으로 보내고, 송신기에서 전송이득이 큰 채널들을 선택하여 전송함으로써 STBC 시스템의 성능을 더욱 향상시킬 수 있는 방법도 제시하고 있다[4].

본 논문에서는 이러한 시간 및 주파수 선택적인 Rayleigh 페이딩 다중 경로 채널 하에서의 전송채널 정보를 이용하는 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 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 다음 식과 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 지연이며, 모든 채널 탭의 평균전력의 합은 1을 가정한다. 그러면 이러한 채널을 통하여 전송된 신호는 다음 식과 같다.

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

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

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 전달함수 $H(k)$ 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 등화된다.

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

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 $H(k) = a \exp(j\theta)$ 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 채널추정).

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

한편 MMSE(Minimum Mean-Squared Error) 추정 방식을 이용하면 LS 방식으로 추정된 $\hat{H}(k)$ 로부터 AWGN 잡음에 더욱 강건한 채널 추정을 할 수 있다. 먼저 채널 페이딩 크기가 $\hat{a}$ 로 추정되고 정확한 위상 추정 of 경우를 가정한다. 그러면 입력 심볼이 $\hat{H}(k)$ 로 나누어져 채널 등화된 다음에 16-QAM 복조기로 인가된 복조 심볼은 다음과 같다.

$$\hat{X}(k) = X(k) \frac{\alpha}{\hat{\alpha}} + \frac{W(k)}{\hat{\alpha}} \quad (9)$$

그러면 α 와 $\hat{\alpha}$ 에 따른 16-QAM의 비트 오류율은 다음 식과 같다.

$$P_Q(E|\alpha, \hat{\alpha}) \approx \frac{1}{4} \left\{ Q\left(\frac{\alpha}{\sigma_n}\right) + Q\left(\frac{3\alpha - 2\hat{\alpha}}{\sigma_n}\right) + Q\left(\frac{-\alpha + 2\hat{\alpha}}{\sigma_n}\right) \right\} \quad (10)$$

각각의 비트 스트림에서, 16-QAM OFDM 심볼은 $Y(k) = a \exp(j\theta)X(k) + W(k)$ 이다. 이때 식 (5)에서와 같이 $H(k) = a \exp(j\theta)$ 는 독립적이고 평균이 0인 복소 랜덤 변수 $z(l) \exp(-j2\pi kl/N)$ 의 합이기 때문에, $H(k)$ 도 역시 페이딩 평균 전력

$\Omega = E\{a^2\} = E\{|H(k)|^2\} = 1$ 을 가지는 평균 값이 0 인 복소 가우시안 랜덤 변수이다. 16-QAM 심볼 당 평균 에너지는 $E_S = 5d^2 T_S$ 이다. 앞으로 심볼 당 수신된 신호의 평균 에너지를 $\Omega E_S = 1$ 라고 하고 AWGN의 분산은 $\sigma_n^2 = 1/\text{SNR}$ (평균 신호 대 잡음 비)라고 가정한다. 그러므로 $d/\sigma = \sqrt{4\gamma_b/5}$ 이고, 여기서 데이터 비트당 평균 SNR은 $\gamma_b = \Omega E_S / N_0$ 가 된다. 페이딩 추정 값은 $\hat{H}(k) = \hat{a} \exp(j\hat{\psi})$ 이므로 채널 등화된 16-QAM 복조기의 입력 $\hat{X}(k)$ 는 다음 식과 같다.

$$\hat{X}(k) = X(k) \cos \psi X_Q(k) \sin \psi \frac{\alpha}{\hat{\alpha}} + \frac{W(k)}{\hat{\alpha}} \quad (11)$$

여기서 위상 추정 에러 $\psi = \hat{\Theta} - \Theta$ 이다. Rayleigh 페이딩 크기 α 의 확률 밀도 함수(pdf : probability density function)는 $p(\alpha) = 2\alpha \exp(-\alpha^2)$ 이다. 그러므로 임의의 α 값에 의한 채널 크기와 위상 추정 값의 joint pdf 는 다음 식과 같다.

$$p(\hat{\alpha}, \psi | \alpha) = \frac{4\gamma_b \hat{\alpha}}{\pi} \exp \left[-4\gamma_b (\hat{\alpha}^2 - 2\alpha \hat{\alpha}^2 \cos \psi + \alpha^2) \right] \quad (12)$$

그러면 식 (8) - (12)을 이용하여 채널 추정 에러를 고려한 16-QAM OFDM의 비트 오류율을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} P_b(E) \approx & \int_{-\pi}^{\pi} \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \frac{1}{8} \{ Q[a\alpha(\cos \psi + 3\sin \psi)] \\ & + Q[a\alpha(\cos \psi + \sin \psi)] \\ & + Q[a(\alpha(3\cos \psi + 3\sin \psi) - 2\hat{\alpha})] \\ & + Q[a(\alpha(3\cos \psi + \sin \psi) - 2\hat{\alpha})] \\ & + Q[a(\alpha(-\cos \psi + 3\sin \psi) + 2\hat{\alpha})] \\ & + Q[a(\alpha(-\cos \psi + \sin \psi) + 2\hat{\alpha})] \} \\ & \times p(\hat{\alpha}, \psi | \alpha) p(\alpha) d\alpha d\hat{\alpha} d\psi \end{aligned} \quad (13)$$

위 식에서 $a = \sqrt{4\gamma_b/5}$ 이다.

III. STBC 안테나 다이버시티

두 개의 송신안테나를 사용하는 STBC 시스템에서는, 먼저 두개의 신호인 $X_{Tx_1}(k)$ 와 $X_{Tx_2}(k)$ 가 두개의 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[3]. 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.

$$\begin{aligned} Y_1(k) = Y(t) &= H_1(k)X_{Tx_1}(k) + H_2(k)X_{Tx_2}(k) + W_1(k) \\ &= H_1(k)X_0(k) + H_2(k)X_1(k) + W_1(k) \\ Y_2(k) = Y(t+T) &= H_1(k)X_{Tx_1}(k) + H_2(k)X_{Tx_2}(k) + W_2(k) \\ &= -H_1(k)X_1^*(k) + H_2(k)X_0^*(k) + W_2(k) \end{aligned} \quad (14)$$

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.

$$\hat{X}_0 = \hat{H}_1^* Y_1 + \hat{H}_2 Y_2^* \quad (15)$$

$$\hat{X}_1 = \hat{H}_2^* Y_1 - \hat{H}_1 Y_2^* \quad (16)$$

결과적으로 $\hat{X}_0(k)$ 와 $\hat{X}_1(k)$ 는 식 (15)과 (16)에서와 같이 각 채널 전달함수의 곱과 같은 형태의 신호 이득을 얻는다. 그러나 정확한 채널 추정이 이루어지지 않으면 (14) - (16)의 식들에서 부호만 다르고 크기가 거의 같은

두 항의 합이 서로 상쇄되지 못 하므로 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 발생되는 BER은 다음식과 같다[5].

$$P_b(\bar{\gamma}_b) = \frac{\alpha}{2} \left[1 - \mu \sum_{k=0}^{L-1} \binom{2k}{k} \left(\frac{1-\mu^2}{4} \right)^k \right] \quad (17)$$

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 전송 채널의 평균 페이딩 전력이다. 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 (17)에서 α 와 β 는 16-QAM의 경우 3/4와 4/5이다.

4세대 이동통신을 위한 IEEE 802.16e 표준에서는 수신기에서 전송채널의 정보를 송신기 쪽으로 보내고, 송신기에서 전송이득이 큰 채널들을 선택하여 전송함으로써 STBC 시스템의 성능을 더욱 향상 시킬 수 있는 방법도 제시하고 있다[5].

IV. OFDM 시스템의 성능 분석

FFT의 크기는 $N = 1024$ 이고 채널의 대역폭은 10MHz로 선정한다. 따라서 부반송파 간격 $\Delta f = 9.7666\text{kHz}$ 이며 샘플링 주파수는 10MHz이다. 먼저 한 블록시간 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 도플러 페이딩에 의하여 연속적으로 변화될 수 있다.

그림 1에서의 전송 시스템 구성도에서와 같이 입력 데이터는 Gray 코드를 이용하여 16-QAM 심볼로 매핑된다. 이 심볼들은 병렬화된 후, OFDM 변조되어 다중 경로 채널을 통하여 전송된다. TTA에서는 매크로 셀 (macro cell) 크기를 반경 1km로 비교적 작게 규정하고 있다. 그러므로 본 논문에서는 최대 지연 시간이 $2\mu\text{s}$ 이고 rms 지연 시간이 $0.4\mu\text{s}$ 인 5탭(tap) 전력 지연 프로파일(power delay profile)을 가지는 채널 모델을 선택한다.

본 논문에서 구한 식들을 이용하여 컴퓨터 모의실험에 의한 방법으로 PSAM 16-QAM OFDM 시스템의 BER 성능을 구한다. OFDM은 채널의 시간 변화율이 큰 경우에 OFDM 심볼 주기 내에서 채널의 특성이 변화하게 되며 그로 인해 부반송파 사이에 ICI가 발생한다. 채널의 변화율은 도플러 주파수와 OFDM 심볼 주기에 따라 결정되며 단말기가 높은 속도로 이동하는 고속 페이딩 채널에서 심각한 ICI 왜곡이 발생하게 된다. 그림 2에 최대 도플러 주파수에 따른 BER이 컴퓨터 모의실험에 의한 방법으로 구해져 도시되었다. OFDM 시스템에서는 주파수 선택적 Rayleigh 채널이 각 부반송파에 대해서는 주파수 비선택적 채널이 되도록 시스템이 구성되는데, 이 경우에 이상적인 16-QAM OFDM 시스템의 BER 특성은 16-QAM 시스템의 BER 특성과 같다. 이 때 이상적인 곡선은 다음의 이론식과 같다[5].

$$P_b(r_b) = 3/4 Q(\sqrt{4/5 r_b}) \quad (18)$$

그림 2에서 정확한 채널추정 경우인 ideal 컴퓨터 시뮬레이션 결과 곡선은 이론식 (18)과 일치한다. 또한 LS 채널추정 경우의 시뮬레이션 결과는 이론적으로 구한 식 (13)의 결과와 잘 일치한다. 이 그림 2에서 채널 추정에러로 인하여 정확한 채널 추정의 이상적인 경우에 비하여 $\bar{\gamma}_b$ 가 대략 2.5 dB 정도 더 소요됨을 알 수 있다. 이 때 $\bar{\gamma}_b$ 는 비트당 신호의 평균 에너지/AWGN의 전력 스펙트럼 크기이다. 그림 2에서와 같이 최대 도플러 주파수가 40 Hz인 경우에도 벌써 BER 성능이 저하되고 error floor가 발생된다.

그러므로 BER 성능을 향상시키기 위하여 두 개의 송신 안테나와 하나의 수신 안테나로 구성된 STBC를 적용한 OFDM의 BER 성능이 컴퓨터 모의실험 방법으로

그림 3에 분석되었다. 그림 2와 3을 비교하면 최대 도플러 주파수가 40 Hz 이하인 경우에 $P_{be} = 10^{-3}$ 을 얻기 위해 STBC 안테나 다이버시티 사용 시 $\bar{\gamma}_b$ 가 8 dB 덜 소요된다. 그림 2와 3을 비교하여 보면, 고속 이동의 시간적 선택적인 시변 채널에서도 STBC 방식을 이용하여 BER 성능을 향상시킬 수 있음을 알 수 있다.

그러나 STBC 시스템에서도 도플러 주파수가 증가함에 따라 큰 크기의 error floor가 발생됨을 알 수 있다. 이러한 BER 성능을 향상시키기 위하여 채널정보를 이용한 시스템에서의 BER 성능을 구한다. 우선 네 개의 송신 안테나들을 통하여 파일럿 심볼을 전송하고, 수신기에서는 전송되어 온 네 개 신호들의 전력을 측정한다. 네 개의 전송경로 중, 전송 이득이 큰 두 개의 전송경로를 선택하고 그 채널선택 정보를 송신기 측에 전달한다. 데이터는 선정된 이 두 개의 안테나 경로를 통해서 STBC 전송된다. 이러한 방식으로 동작하는 STBC OFDM 시스템의 BER 성능이 모의실험에 의한 방법으로 구해져 그림 4에 도시되었다. 일반적인 STBC 경우인 그림 (3)과 비교하여 보면 도플러 페이딩이 없는 경우에는 같은 BER에 대하여 2dB 정도의 $\bar{\gamma}_b$ 이득을 얻을 수 있으며, 도플러 페이딩이 심한 경우에도 그 error floor의 크기를 작게 향상시킬 수 있음을 알 수 있다.

그림 2. PSAM OFDM 시스템의 BER 성능
Fig. 2 BER performance of PSAM OFDM systems.

그림 3. STBC 안테나 다이버시티를 사용한 PSAM OFDM의 BER 성능
Fig. 3 BER performance of PSAM OFDM with STBC antenna diversity

그림 4 채널정보를 이용하는 STBC PSAM OFDM의 BER 성능
Fig. 4 BER performance of STBC PSAM OFDM using channel information

V. 결 론

OFDM 방식에서는 채널의 시간 변화율이 큰 경우에 부반송파 사이의 직교성이 파괴되는 문제가 있다. 최대 도플러 주파수가 40 Hz인 경우에도 벌써 BER 성능이 저

하되고 error floor가 발생한다. 그러므로 BER 성능을 향상시키기 위하여 두 개의 송신 안테나와 하나의 수신 안테나로 구성된 STBC를 적용한 PSAM OFDM 시스템의 BER 성능이 컴퓨터 모의실험으로 분석되었다. 최대 도플러 주파수가 40 Hz 이하인 경우에 $P_{be} = 10^{-3}$ 을 얻기 위해 안테나 다이버시티를 사용하지 않는 경우에 비해 $\overline{\gamma}_b$ 가 8 dB 덜 소요됨을 알 수 있었다.

BER 성능을 더욱 향상시키기 위하여, 채널정보를 이용한 시스템에서의 BER 성능을 구하였다. 네 개의 송신 안테나들을 통하여 파일럿 심볼을 전송하고, 전송 이득이 큰 두 개의 전송경로를 선택한다. 이러한 방식으로 동작하는 STBC OFDM 시스템의 BER 성능이 일반적인 STBC 경우와 비교되었다. 도플러 페이딩이 없는 경우에는 같은 BER에 대하여 2dB 정도의 $\overline{\gamma}_b$ 이득을 얻을 수 있으며, 도플러 페이딩이 심한 경우에도 그 error floor의 크기를 작게 향상시킬 수 있음을 알 수 있었다.

저자소개

최승국(Seung-Kuk Choi)

1988.12 Braunschweig Univ.

공학박사

1989.3 ~ 현재: 인천대학교

정보통신공학과 교수

※관심분야: 통신시스템, 이동통신, 동기

참고문헌

- [1] 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.
- [2] M. Russell and G.L. Stüber, "Interchannel interference analysis of OFDM in a mobile environment", Proc. IEEE VTC'95, Chicago, IL, pp.820-824, July 1995.
- [3] 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.
- [4] IEEE 802.16e, "Air Interface for Fixed and Mobile Broadband Wireless Access Systems" Feb. 2006
- [5] 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.