
공간-주파수 블록코드를 이용한 OFDM의 성능분석

황운택*

Performance Analysis of OFDM using Space-Frequency Block Code

Woon-taek Hwang*

요 약

본 논문에서는 무선통신시스템에서 주파수 자원을 추가적으로 사용하지 않고 주파수 선택적 특성에 따른 간섭을 극복할 수 있는 선형 수신기와 간섭 제거기를 제안하였고, 채널 추정 오차가 있는 보다 실제적인 상황에서 결과들을 분석하였다.

주파수 선택적 특성이 강해 간섭량이 큰 상황에서는 MMSE 선형 수신기와 간섭제거기를 함께 사용한 경우 Conventional 공간-주파수 블록코드 수신기에 비해 월등한 성능 향상이 있었다. 채널 추정 오차가 작은 경우에는 (MSE=0.001) BER = 2×10^{-3} 에서 7dB의 성능이득이 있었다.

ABSTRACT

In this paper, unused frequency resources additionally in radio communication system and proposed fan shape receiver and interference exclusion flag that can overcome interference by frequency selective special quality. Analyzed results in actual situation with channel conclusion error.

Because frequency selective special quality is strong, there was excellent performance elevation than Conventional space - frequency block code receiver when use together MMSE fan shape receiver and interference exclusion radical in situation that the interference amount is big.

In case channel conclusion error is small, there were Performance gains of 7dB in (MSE = 0.001) BER = 2×10^{-3} .

키워드

공간-주파수 블록코드, OFDM, MMSE

Key word

Space Frequency Block Code, OFDM, MMSE

I. 서 론

21세기 정보화 사회에서는 음성, 데이터 및 영상 등 다양한 멀티미디어 서비스를 여러 사용자가 언제, 어디서나 제공받을 수 있는 통신 시스템이 요구되고 있다. 이러한 서비스를 제공하기 위해서는 높은 전송율과 낮은 오류율이 요구되는데, 최근 열악한 전송 환경에서도 고품질, 고신뢰성의 멀티미디어 서비스를 제공하기 위한 광대역 무선 통신 시스템 개발에 대한 많은 연구가 진행되고 있다.

다중경로 페이딩 채널 환경에서 고속 데이터 전송에 적합한 방식으로 앞에서 기술한 다양한 MIMO 기법들을 OFDM 시스템에 적용한 여러 가지 MIMO-OFDM 전송 기법들이 제안되었다. MIMO-OFDM 전송기법으로는 공간-시간블럭코드를 OFDM에 적용한 공간-시간블럭코드 OFDM (space-time block coded OFDM) 기법 그리고 공간과 주파수영역에서 부호화를 수행한 공간-주파수 블록코드 OFDM (space-frequency block coded OFDM) 기법 등이 제안되었다[1-4].

공간-주파수 블록코드 OFDM 전송 기법의 직교 조건을 만족하기 위해서는 주파수 상에서 인접한 두 반송파간의 주파수 응답이 변하지 않는다고 가정하고 부호화를 수행하기 때문에 채널의 시변 정도에는 거의 영향을 받지 않지만 채널의 주파수 선택적 특성에 큰 영향을 받는다.

이러한 문제점을 해결하기 위해, 본 논문에서는 먼저 채널이 시간에 따라 빠르게 변하는 이동 환경 하에서 채널 임펄스 응답의 길이에 관계없이 적은 연산량으로도 주파수 다이버시티 이득과 시간 다이버시티 이득을 얻을 수 있는 간단히 확산된 공간-주파수 블록코드 OFDM 전송 기법을 제안한다. 확산된 공간-주파수 블록코드 OFDM 전송 기법은 직교 행렬을 이용하여 변조된 심볼을 각각의 반송파에 곱고루 퍼지게 하여 일부 반송파의 채널 상태가 나빠더라도 나머지 반송파의 정보를 이용하여 신호를 복원할 수 있도록 한다. 이 부호화 기법은 원 신호를 더하거나 빼서 신호를 부호화하기 때문에 부호화와 복호화의 연산량이 매우 적다는 장점이 있다. 하지만 이러한 확산된 MIMO-OFDM 방법은 SF(Spreading Factor)만큼의 주파수 자원을 더 사용해야 하므로 자원을 낭비하게 된다.

자원의 낭비를 막기 위해서 Multi-Code의 개념을 도입하여 코드 분할로 동일 주파수를 통해 자원을 SF만큼 더 할당이 가능하지만 코드간의 간섭으로 성능이 다시 열화될 수 밖에 없다. 이러한 무선 자원의 낭비를 막기 위해, 본 논문에서는 최종적으로 추가적인 주파수 확산 없이도 주파수 선택적 특성으로 인한 주파수간 간섭 문제를 막을 수 있는 선형 수신기와 간섭 제거기인 ZF(Zero Forcing)이나 MMSE (Minimum Mean Square Error) 기술을 이용하여 간단히 수신신호에 선형적인 연산을 가함으로써 간섭을 어느 정도 보완하고, 추가적으로 간섭제거기 (Interference Canceller)를 적용하여 보다 완벽하게 간섭을 제거하는 기술을 적용하고 기존 기법 및 여러 가지 수신 기술 기법들과 성능을 비교하였다.

또한 다수의 안테나를 통해 송수신하는 공간-주파수 블록코드 OFDM의 경우 정확한 채널 추정 및 보상이 시스템의 성능에 큰 영향을 미친다[5]. 따라서 본 논문에서는 정확하지 않은 실제적인 채널 추정이 반영되었을 경우에 성능이 어떻게 달라지는 지 비교 분석하였다.

II. OFDM 시스템

OFDM 방식은 여러 개의 반송파를 사용하는 다중반송파 전송 방식의 일종으로 반송파의 수만큼 각 채널에서의 전송 주기가 증가하게 된다. 이 경우, 광대역 전송시에 나타나는 주파수 선택적 채널이 심볼간 간섭이 없는 주파수 비선택적 채널로 근사화 되기 때문에 간단한 단일탐 등화기로 보상이 가능하다. OFDM 시스템의 등가 이산 시간영역 기저대역 신호는 그림 1과 같이 송신단에서는 IFFT, 수신단에서는 FFT를 사용하여 효율적으로 구현할 수 있다. 먼저, 송신단에서 전송 데이터 심볼 벡터 $x(n)$ 을 다음과 같이 정의한다.

$$X(n) = [x_0(n) \ x_N(n) \ \cdots \ x_{N-1}(n)]^T \quad (1)$$

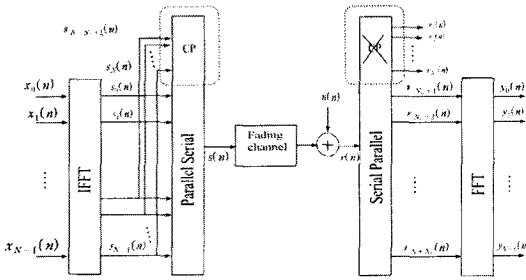


그림 1. 기저 대역에서의 OFDM 시스템 모델
Fig 1. OFDM system model in base wide-band

전송 데이터 $x(n)$ 는 IFFT에 의해 다음과 같이 변조되어 OFDM 심볼의 각 시퀀스를 이루게 된다.

$$s_k(n) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{l=0}^{N-1} x_k(n) \exp(j \frac{2\pi kl}{N}), \quad 0 \leq k \leq N-1 \quad (2)$$

변조된 OFDM 심볼에 CP가 부가된 최종 전송 OFDM 심볼 벡터 $s_g(n)$ 을 다음과 같이 정의한다.

$$s_g(n) = [s_0(n) \ s_1(n) \ \dots \ s_{N+N_G-1}(n)]^T \quad (3)$$

여기에서 $s_{gk}(n) = s_{[k-N_G]}(n), 0 \leq k \leq N+N_G-1$ 이며, $[\cdot]N$ 은 나머지 연산을 의미한다. 또한 채널 임펄스 응답 $g(t, \tau)$ 를 n 번째 이산시간영역에서 다음과 같이 정의한다.

$$g_l(n) = \begin{cases} a_l, & l \leq L \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

여기에서 L 은 최대 임펄스 응답 길이를 나타낸다. 수신 신호는 잡음이 없는 환경에서 다음과 같이 $s_{g,k}(n)$ 과 $g_l(n)$ 의 컨볼루션으로 표현된다.

$$r_{g,k}(n) = \sum_{l=0}^{L-1} s_{g,k-l}(n) g_l(n), \quad 0 \leq k \leq N+N_G-1 \quad (5)$$

여기에서 NG 개의 CP를 제거한 수신 신호 $r_k(n)$ 은 다음과 같다.

$$r_k(n) = r_{g,k+N_G}(n), \quad 0 \leq k \leq N-1 \quad (6)$$

그림 1에서 최종 출력 신호 $y_k(n)$ 은 수신 신호 $r_k(n)$ 을 FFT 함으로써 얻을 수 있다. 앞에서 언급한 바와 같이 $s_{g,k}(n)$ 은 $s_k(n)$ 의 순환 확장으로 구성되어 있기 때문에 $r_k(n)$ 은 $s_k(n)$ 과 $g_l(n)$ 의 환형 컨볼루션(circular convolution)으로 표현될 수 있다. 따라서 시간영역에서 환형 컨볼루션과 주파수영역에서 곱셈 관계를 이용하면 최종 출력 신호 $y_k(n)$ 은 다음과 같다.

$$y_k(n) = x_k(n)h_k(n) + n_k(n) \quad (7)$$

여기에서 $n_k(n)$ 은 부가 백색 가우시안 잡음(additive white Gaussian Noise : AWGN)이며, $h_k(n)$ 은 채널의 주파수 응답으로 다음과 같다.

$$h_k(n) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{l=0}^{N-1} g_l(n) \exp(-j \frac{2\pi kl}{N}), \quad 0 \leq k \leq N-1 \quad (8)$$

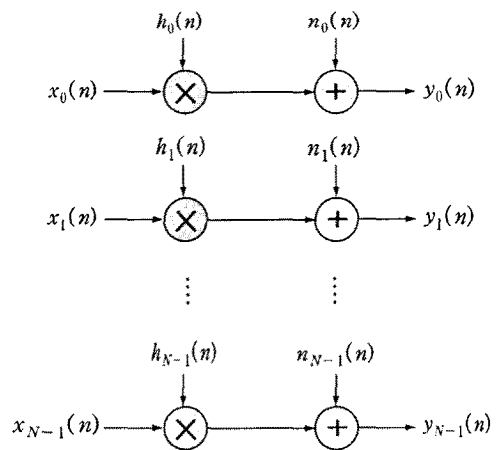


그림 2. OFDM 시스템의 이상적인 등가 모델
Fig 2. Ideal equivalence model of OFDM system

따라서 OFDM 시스템은 그림 2와 같이 모델링 된다. 그림에서 수신신호 $y_k(n)$ 과 전송 데이터 심볼 $x_k(n)$ 과 채널의 주파수 응답 $h_k(n)$, 그리고 부가 백색 가우시안 잡음 $n_k(n)$ 이 각각 일대일로 대응됨을 알 수 있다.

III. 공간-주파수 블록코드 OFDM 선형 수신기

본 장에서는 인접 두 반송파간 주파수 응답의 변화에 따른 공간-주파수 블록코드 신호의 직교성 상실로 인한 안테나 간의 간섭이 발생할 때, 이를 효과적으로 극복하는 여러 가지 기법을 적용한다. 이 기법들은 공간-시간 블록코드에서 시변 채널에 따른 안테나의 간섭을 제거하는 기술로도 사용될 수 있다.

각 복호 기법 이후의 k 번째 신호의 ($1 \leq k \leq n_T$) 신호 대 간섭 및 잡음 비는 다음과 같이 계산된다.

$$\eta_{k, \text{Alamouti}} = \frac{\left[\mathbf{H}_{\text{eff}}^H \mathbf{H}_{\text{eff}} \right]_{k,k}^2}{\sum_{j=1, j \neq k}^{n_T} \left[\mathbf{H}_{\text{eff}}^H \mathbf{H}_{\text{eff}} \right]_{k,j}^2 + \sigma_n^2 \mathbf{H}_{\text{eff}}^H \mathbf{H}_{\text{eff}}} \quad (9)$$

$$\eta_{k, \text{ZF}} = \frac{1}{\left[\left(\sigma_n^2 \mathbf{H}_{\text{eff}}^H \mathbf{H}_{\text{eff}} \right)^{-1} \right]_{k,k}} \quad (10)$$

$$\eta_{k, \text{MMSE}} = \frac{1}{\left[\left(\sigma_n^2 \mathbf{H}_{\text{eff}}^H \mathbf{H}_{\text{eff}} + \mathbf{I} \right)^{-1} \right]_{k,k}} - 1 \quad (11)$$

여기서 $[\mathbf{A}]_{k,j}$ 는 행렬 \mathbf{A} 의 k 번째 행과 j 번째 열의 원소를 의미하고 σ_n^2 는 잡음신호의 분산이다. OSIC 알고리즘은 표 1에 나타내었다.

여기서 $(\mathbf{A})_i$ 는 행렬 \mathbf{A} 의 i 번째 행을 의미한다. $(\mathbf{A})_i^T$ 는 i 번째 열이 0이 된 행렬을 의미한다. 그리고 $Q(\cdot)$ 는 단결정 값을 만드는 함수를 의미한다. 이 OSIC 알고리즘은 꽤 높은 복잡도를 가지고 있으나 ML수신기에 비해서는 상대적으로 낮은 복잡도를 가지고 있다.

표 1. OSIC 알고리즘
Table 1. OSIC algorithm

반복루프 $i=1:n_T$ $k_i = \arg \max_{j \in \{k_1, \dots, k_{i-1}\}} \eta_j$ $w_{k_i} = (\mathbf{W}^i)_{k_i}, d_{k_i} = w_{k_i} y_i, \hat{x}_{k_i} = Q(d_{k_i})$ $y_{i+1} = y_i - \mathbf{H}_{\text{eff}} \hat{x}_{k_i}, \mathbf{W}^{i+1} = (\mathbf{W}^i)_{k_i}$ $i = i + 1$ 반복루프 종료

IV. 모의실험 결과 및 고찰

모의실험을 통하여 다양한 복호 기법의 성능을 비교하였다. 여기서 변조 기법은 QPSK를 사용하였고, 중심 주파수는 2GHz, 그리고 한 개의 OFDM심볼의 길이는 180 μ s로 하였다. 부 채널의 개수는 512개로 하였다. 다중 경로 지연의 단위는 OFDM의 샘플 단위로 하였고 최대 64로 하였다. 채널은 한 OFDM심볼동안 시간적으로 변하지 않는다고 가정하였고 채널 추정은 완벽한 경우와 그렇지 않은 경우를 모두 고려하였다.

그림 3에서는 다중 경로가 16개가 존재하는 채널에서 각 수신 기법간의 BER 성능을 비교한 것이다. 16개의 다중 경로로 인해서 16번의 주파수 선택적 페이딩 요소가 발생하는데 512개의 주파수 내에서 발생하므로 512/16, 즉 32개의 주파수 심볼 동안에는 어느 정도 주파수 응답의 변화가 작은 상황이다. 여기서 기존 공간-주파수 블록코드는 Alamouti의 복호 방법을 사용한 것이며, 나머지 수신기법은 앞에서 제안한 기법들이다.

채널 추정은 완벽하다고 가정하였으며, 그림에서 알 수 있듯이 기존 공간-주파수 블록코드 기법은 주파수 선택적 채널로 인하여 다중 안테나간의 직교성 상실로 간섭이 발생하게 되지만 그 정도가 매우 작기 때문에 성능이 약간 열화된다. 하지만 다른 기법들은 간섭에도 우수한 성능을 보이는데, 간섭이 거의 없는 환경이기 때문에 모두 비슷한 성능을 보이고 있다.

표 2. 공간-주파수 블록코드 OFDM 성능 평가를 위한 모의실험 파라미터

Table 2. Experiment parameter of young rice plant for space-frequency block code OFDM performance estimation

Carrier frequency(f_c)	2 GHz
채널 대역폭	5 MHz
Sampling frequency(f_s)	5 MHz
채널 모델	Exponential Decaying (Decaying Factor=0.1)
RMS delay spread (τ_{RMS})	16 (3.2 μ s), 64 (12.8 μ s)
Subcarrier spacing	9.765kHz
FFT size(length: T_s)	512 (102.4 μ s)
CP size(length: T_G)	64 (12.8 μ s)
OFDM symbol length(T_{sym})	115.2 μ s
송신 안테나(TX) 개수	2개
수신 안테나(RX) 개수	1개
전송 데이터 심볼	QPSK
채널 추정 오차	Perfect / Mean Square Error=0.001, 0.01

그림 4에서는 64개의 다중경로로 인해서 보다 주파수 선택적 특성이 커진, 즉, 8개의 주파수 심볼을 벗어나면 채널이 완전히 변할 정도의 채널로서 그림 3의 경우보다 상대적으로 주파수 선택적 특성이 매우 크다고 할 수 있다. 이런 환경에서는 안테나 간 간섭의 증가로 Conventional SFBC 기법은 성능이 매우 열화되게 되고, 다른 기법들 간에도 성능 차이가 많이 벌어진다. 이러한 간섭이 많은 환경에서는 ZF 기법보다는 MMSE 기법이, 간섭제거를 사용하지 않은 기법보다는 간섭제거를 사용한 기법이 보다 더 우수한 성능을 얻는다는 것을 알 수 있다. 따라서 가장 좋은 성능은 MMSE 기법과 IC 기법을 모두 사용한 경우에 얻을 수 있으며, 이는 기본 공간-주파수 블록코드에 비해 BER = 2×10^{-3} 에서 7dB 이상의 성능이득이 있음을 알 수 있다.

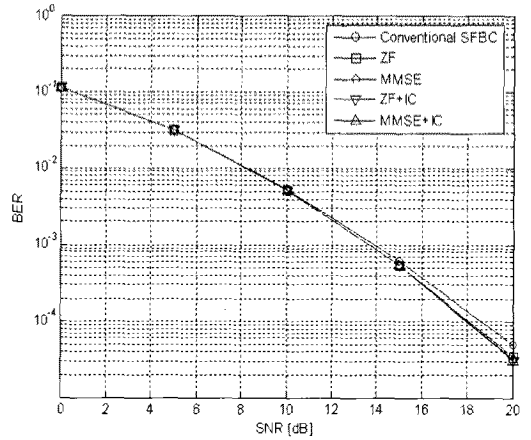


그림 3. 다중경로 16개일 때의 각 기법들의 성능비교(MSE=0.01)

Fig 3. Performance comparison (MSE = 0.01) of each techniques of when is multiplex path 16 (MMSE+IC=ZF+IC>MMSE=ZF > Conv.)

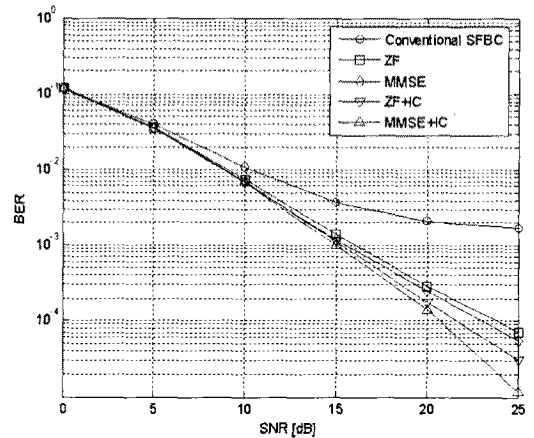


그림 4. 다중경로 64개일 때의 각 기법들의 성능비교(MSE=0.01)

Fig 4. Performance comparison (MSE = 0.01) of each techniques of when is multiplex path 64 (MMSE+IC>ZF+IC>MMSE>ZF>>Conv.)

다음으로, 채널 추정의 오차가 있을 경우에 대해서 실험을 하였다. 그림 5와 6에서는, 채널 추정의 오차가 MSE로 0.001으로 작을 경우, 각각 다중 경로가 16개일 때와 64개일 때의 각 기법들간의 성능을 비교한 것이다.

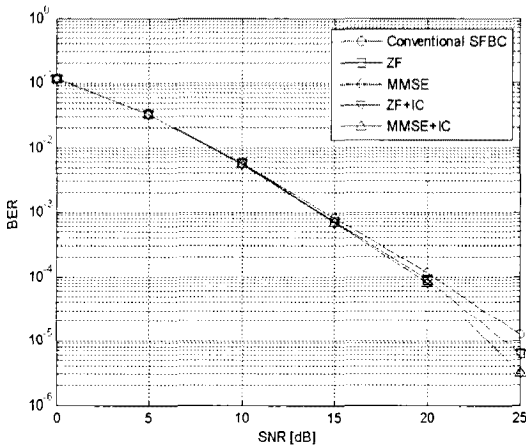


그림 5. 다중 경로 16, MSE=0.001에서의 성능비교
Fig 5. Performance comparison in multiplex path 16, MSE = 0.001
(MMSE+IC>MMSE>ZF+IC>ZF>Conv.)

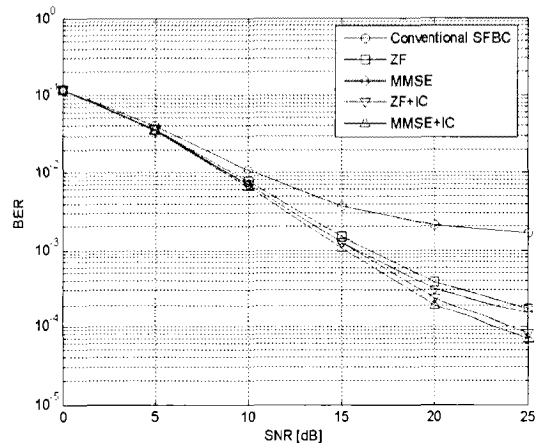


그림 6. 다중 경로 64, MSE=0.001에서의 성능비교
Fig 6. Performance comparison in multiplex path 64, MSE = 0.001
(MMSE+IC>ZF+IC>MMSE>ZF>Conv.)

그림 5을 보면, MMSE기법을 사용한 경우가 ZF기법과 IC을 함께 사용한 기법보다 성능이 BER = 10⁻⁵에서 1dB정도 우수하였고 기존(conventional) 공간-주파수 블록코드보다는 같은 BER에서 2dB정도 우수하였다. 이를 통해 IC의 효과가 거의 없는 것을 알 수 있고 성능 차이는 단지 선형 수신기의 성능에 좌우되는 것을 알 수 있다. 즉, 간섭량이 적은 상황이므로 IC가 효과를 보지 못하는 것이다. 즉, 채널 추정 성능이 우수하고 간섭량이 적은 상황에서는 복잡도가 높은 IC기법을 사용할 필요가 없다는 결론을 얻을 수 있다. 그림 6의 경우는 간섭량이 매우 많은 경우이므로 IC의 효과가 나타나며, 완벽한 채널 추정의 경우에 비해서 성능이 어느 정도씩 열화되는 것을 볼 수 있지만 전체적인 성능 경향에는 큰 차이가 없다. 전체적으로 채널 추정의 MSE가 0.001일 때는 성능열화가 그리 크지 않음을 알 수 있다. 제안된 MMSE와 IC를 사용한 기술은 Conventional 공간-주파수 블록코드보다 BER = 2×10⁻³에서 7dB이상의 성능이득이 있었다.

V. 결 론

이동 광대역 무선 접속(mobile broadband wireless access: MBWA)은 실외의 다양하고 넓은 공간 영역에서 이루어진다. 따라서 전송단과 수신단 사이의 다양한 전송 경로에 의한 다중 경로 페이딩(multipath fading), shadow 페이딩, 경로 손실 그리고 송수신기의 이동에 따른 Doppler shift 현상과 같은 다양한 신호 왜곡요인이 발생한다.

본 논문에서는 주파수 자원을 추가적으로 사용하지 않고 주파수 선택적 특성에 따른 간섭을 극복할 수 있는 선형 수신기와 간섭 제거기를 제안하였고, 채널 추정 오차가 있는 보다 실제적인 상황에서 결과들을 분석하였다.

그 결과 주파수 선택적 특성이 약해서 간섭량이 작은 상황에서 채널 추정 오차가 적을 때는 단순히 MMSE 수신기만으로도 좋은 성능을 얻을 수 있고 채널 추정 오차가 클 경우는 가장 단순한 기존의 공간-주파수 블록코드 수신기를 사용하는 것이 복잡도와 성능을 모두 고려한 최적의 선택이 된다. 그러나 주파수 선택적 특성이 강해 간섭량이 큰 상황에서는 MMSE 선형 수신기와 간섭 제거기를 함께 사용한 경우 기존 공간-주파수 블록코드 수

신기에 비해 월등한 성능 향상이 있었다. 이 경우, 채널 추정 오차가 작은 경우에는 ($MSE=0.001$) $BER=2 \times 10^{-3}$ 에서 7dB의 SNR이득이 있었다.

이러한 결론을 바탕으로 차세대 광대역 무선 이동통신 기술에서 신뢰성 있는 다중 송신 안테나 기술의 활용을 가능하게 하고 시장을 활성화시키는데 많은 기여를 할 수 있다.

참고문헌

- [1] K. F. Lee, and D. B. Williams, "space-time coded transmitter diversity technique for frequency selective fading channels,"*IEEE Sensor Array and Multichannel Signal Processing Workshop*, Cambridge, MA, Mar. 2000, pp. 149-152.
- [2] B. Lu, and X. Wang, "Space-time code design in OFDM systems,"in *Proc. GLOBECOM*, Nov. 2000, pp. 1000-1004.
- [3] K. F. Lee, and D. B. Williams, "A space-frequency transmitter diversity technique for OFDM system,"in *Proc. GLOBECOM*, Nov. 2000, pp. 1473-1477.
- [4] H. Bolcskei, and A. J. Paulraj, "Space-frequency coded broadband OFDM systems,"in *Proc. WCNC*, 2000, pp.1-6.
- [5] K. Suto, and T. Ohtsuki, "Performance evaluation of space-time-frequency block codes over frequency selective fading channels,"in *Proc. VTC 2002-Fall*, Sept. 2002, pp. 1466-1470.
- [6] L.-Y. Song, Alister G. Burr, "Successive interference cancellation for space-time block code over time-selective channel", *IEEE commu. Letters*, vol. 10, no. 12, Dec. 2006, pp. 837 - 839.

저자소개



황운택(Woon-taek Hwang)

1973년 2월 광운대학교 전자공학과 (공학사)

1981년 2월 숭실대학교 전자공학과 (공학석사)

1998년 2월 한국해양대학교 전파공학과 박사과정 수료

1977년 2월 -현재 인천대학교 정보통신과 교수

※관심분야: 무선기기 전원부 설계, 이동통신 기술 개발