

# 페이딩 환경에서 선형 사전 등화를 이용한 MIMO-OFDM 시스템의 성능

## Performance of MIMO-OFDM System with Linear Pre-Equalization over Fading Channel

배 정 남 · 박 우 철\* · 김 진 영

Jung-Nam Bae · Woo-Chul Park\* · Jin-Young Kim

### 요 약

MIMO-OFDM 기술은 시·공간만이 아니라 주파수 영역을 활용할 수 있기 때문에 기존의 시·공간 MIMO 시스템을 유연하게 확장하여 OFDM에 적용시킬 수 있다. 무선 이동 통신에서 발생하는 페이딩은 이동체의 속도, 전송 주파수, 수신 안테나 및 주위 자연 환경에 의해 발생한다. 또한, 무선 이동 통신 채널에 가장 심각하게 나타나는 현상인 다중 경로 페이딩은 각각 다른 지연 시간에 의해 주파수 선택적 페이딩이 발생하게 되며, 이때 ISI로 인해 무선 이동 통신 채널의 성능을 저하시키게 되며, 데이터 전송 속도에 제약을 준다. OFDM은 심벌 사이에 채널의 지연 확산보다 긴 보호 구간을 삽입하여 ISI를 제거할 수 있다. 그러나 대역폭 등의 문제로 일반적으로 보호 구간은 심벌 주기의 1/4 정도로 설정하며, 따라서 다중경로의 채널 지연이 보다 심각해질 경우, 보호 구간 만으로는 ISI를 모두 제거할 수 없다 이 경우 채널에서의 전송시간 지연에 의한 왜곡은 등화기를 사용하여 보상에 주어야 하며, 특히 데이터 전송 속도가 고속이 될수록 등화기의 사용이 절대적으로 필요하게 된다. 본 논문에서는 MIMO-OFDM 시스템에서 사전 등화를 이용한 BER 성능을 분석하였다.

### Abstract

Wireless communication channels with the most severe multipath fading phenomenon that appears each time a different delay is caused by the frequency selective fading. At this time, ISI due to the performance degradation of wireless communication channels and data transfer speed gives the constraints. OFDM technique can remove ISI inserting longer guard interval than channel delay spread of channel between symbol. However, the multi-path delay of the channel to be serious with the guard interval can not eliminate ISI. In this case, using the equalizer must compensate. Especially, use of equalizer is need absolutely as data rate becomes high speed. In this paper, we analyze the BER performance with pre-equalization for MIMO-OFDM over fading channel. The results of this paper can be applied to MIMO-OFDM system with equalization.

Key words : Pre-Equalization, MIMO, MMSE, OFDM, ZF

### I. 서 론

무선 이동 통신 시장의 급성장으로 인하여 무선

환경에서의 다양한 멀티미디어 서비스가 요구되고 있으며, 따라서 전송 데이터의 대용량화 및 데이터 전송의 고속화가 진행되고 있다. 그러나 가용 주파

「이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업 연구임(No. 2010-0022629).」

광운대학교 전파공학과(Department of Wireless Communication, Kwangwoon University)

\*방위사업청 위성/무선 통신장비사업팀(Defense Acquisition Program Administration)

· 논문 번호 : 20100727-098

· 교신저자 : 배정남(e-mail : jn1112@kw.ac.kr)

· 수정완료일자 : 2010년 11월 1일

수와 전송 전력들은 엄격하게 제한된다. 따라서 주파수 대역폭을 증가시키지 않고 고속의 데이터를 전송할 수 있는 기술이 주목을 받고 있다<sup>[1],[2]</sup>.

MIMO-OFDM(Multiple Input Multiple Output-Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 기술은 시·공간만이 아니라 주파수 영역을 활용할 수 있기 때문에 기존의 MIMO 시스템을 유연하게 확장하여 OFDM에 적용시킬 수 있다<sup>[3]</sup>.

무선 이동 통신 채널에 가장 심각하게 나타나는 현상인 다중 경로 페이딩은 각각 다른 지연 시간에 의해 주파수 선택적 페이딩이 발생하게 되며, 이때 ISI(Inter Symbol Interference)로 인해 무선 이동 통신 채널의 성능을 저하시키게 되며, 데이터 전송 속도에 제약을 준다. 다중 경로 페이딩을 갖는 무선 이동 통신 채널에서 심벌 주기가 짧은 고속 데이터 전송 시 단일 반송파 방식을 사용하게 되면 ISI가 더욱 심해지기 때문에 수신단의 복잡도가 크게 증가하는 반면, OFDM의 경우에는 데이터 전송 속도를 그대로 유지하면서 각 부반송파에서의 심벌 주기를 부반송파의 수만큼 확장시킬 수 있기 때문에 다중 경로 지연 확산에 의해 발생하는 시간상에서의 상대적인 신호 분산이 감소한다. 또한, 모든 OFDM 심벌 사이에 채널의 지연 확산보다 긴 보호 구간(guard interval)을 삽입하여 ISI를 제거할 수 있다. 그러나 대역폭 등의 문제로 일반적으로 보호 구간은 심벌 주기의 1/4 정도로 설정하며, 따라서 다중경로의 채널 지연이 보다 심각해질 경우, 보호 구간만으로는 ISI를 모두 제거할 수 없다<sup>[4]</sup>. 이러한 경우 채널에서의 전송시간 지연에 의한 왜곡은 등화기를 사용하여 보상해 주어야 하며, 특히 데이터 전송 속도가 고속이 될수록 등화기의 사용이 절대적으로 필요하게 된다.

본 논문에서는 MIMO-OFDM 시스템에서 사전 등화를 이용한 BER(Bit Error Rate) 성능을 페이딩 채널에서 분석하였다.

## II. MIMO-OFDM 시스템

그림 1은 MIMO-OFDM 시스템에 대한 블록도를 나타낸다. MIMO 시스템은 주파수 대역을 더 늘리지 않고도 보다 많은 양의 데이터를 보낼 수 있는 장점이 있지만 고속 전송 시 발생하는 심벌 간의 간섭,

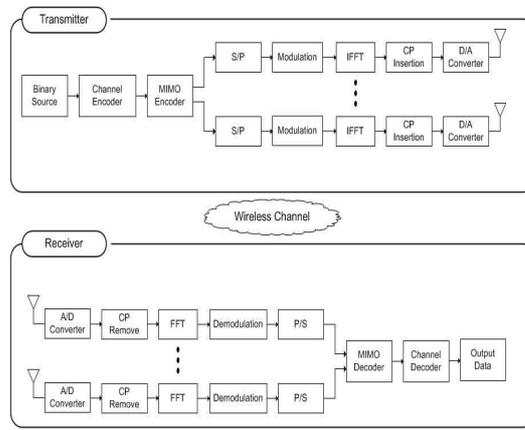


그림 1. MIMO-OFDM 시스템 블록도  
Fig. 1. Blockdiagram of MIMO-OFDM system.

주파수 선택적 페이딩에 약하다는 단점이 있다. 이런 단점을 극복하기 위해 OFDM 기술을 함께 사용한다.

OFDM은 데이터를 병렬 처리함으로써 고속의 데이터 스트림을 저속으로 분할하여, 반송파를 사용하여 동시에 전송한다. 저속의 병렬 반송파를 상용함으로써 심벌 구간이 증가하게 되므로 ISI가 줄어들게 되고, 또한 보호 구간의 사용으로 거의 완벽히 ISI가 제거된다. 또한, OFDM 기법은 여러 개의 반송파를 이용함으로써 주파수 선택적 페이딩에 강한 장점이 있다.

MIMO-OFDM 시스템에서 수신된 데이터는 식 (1)과 같이 나타낸다. 여기서  $(k)$ 는 OFDM의  $k$ 번째 심벌,  $N_T$ 는 송신 안테나,  $N_R$ 은 수신 안테나,  $y$ 는 수신 데이터,  $x$ 는 송신 데이터,  $H$ 는 채널,  $n$ 은 잡음을 나타낸다.

$$\begin{bmatrix} y_1^{(k)} \\ \vdots \\ y_{N_R}^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11}^{(k)} & \cdots & H_{1N_T}^{(k)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ H_{N_R1}^{(k)} & \cdots & H_{N_RN_T}^{(k)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1^{(k)} \\ \vdots \\ x_{N_T}^{(k)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1^{(k)} \\ \vdots \\ n_{N_R}^{(k)} \end{bmatrix} \quad (1)$$

## III. 사전 등화 기법

### 3-1 선형 등화 기법(Linear Equalization)

그림 2는 선형 등화 기법 시스템의 블록도를 나타낸다. 선형 등화 기법에는 ZF(Zero Forcing) 기법과 MMSE(Minimum Mean Square Error) 기법이 있다. ZF

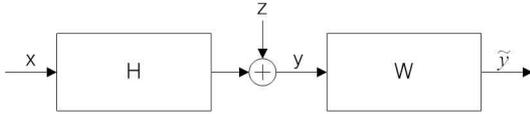


그림 2. 선형 등화 기법  
Fig. 2. Linear equalization technique.

기법은 가중치 행렬을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$W_{ZF} = (H^H H)^{-1} H^H. \quad (2)$$

MMSE 가중치 행렬은 아래와 같다.

$$W_{MMSE} = (H^H H + \sigma_z^2 I)^{-1} H^H, \quad (3)$$

여기서,  $H^H$ 는 hermitian 전치 행렬이다. ZF 기법과 달리 MMSE의 경우에는 잡음에 대한 사전 정보인  $\sigma_z^2$ 가 사용됨을 볼 수 있다. 일반적으로 ZF에 비해 MMSE가 더 좋은 성능을 보이는데, 이는 채널 이득 행렬의 조건 수(condition number)가 클 경우 가중치를 곱할 때 발생하는 잡음 증폭이 MMSE의 경우가 ZF에 비해 적기 때문이다. 따라서 SNR(Signal-to-Noise Ratio)이 낮아 잡음의 크기가 신호에 비해 상대적으로 큰 경우 MMSE와 ZF의 성능 차이가 크고, SNR이 높아 잡음의 크기가 신호에 비해 상대적으로 작을 경우 두 가지 기법의 성능이 유사하게 된다.

### 3-2 SVD 기반의 전송 기법

그림 3은 SVD(Singular Value Decomposition) 기반 시스템의 블록도를 나타낸다. 송신 안테나와 수신 안테나수가  $N_T = N_R$ 이고, 채널  $H = U \Sigma V^H$ 를 가정한다. 그림과 같이 송신 신호  $x$ 는  $v$ 행렬과 곱한 후 송신되고, 수신 신호는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \tilde{y} &= \sum^{-1} U^H y = \sum^{-1} U^H H V x + \sum^{-1} U^H z. \\ &= x + \sum^{-1} U^H z = x + z' \end{aligned} \quad (4)$$

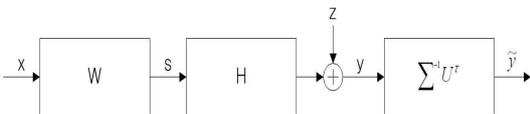


그림 3. SVD 기반 MIMO-OFDM 전송 시스템  
Fig. 3. Transmission system of MIMO-OFDM based on SVD.

표 1. 등화 기법 비교

Table 1. Comparison of equalization.

선형 등화	- 수신단에서 채널의 왜곡을 보상 - ZF, MMSE 기법
SVD	- 송·수신단에서 직교 행렬을 이용하여 부호화 시킴. - 송신전력을 증가시키거나 특성을 변화시키지 않음.
선형 사전 등화	- 송신단에서 미리 채널의 왜곡을 보상 - ZF, MMSE 기법 - 추가적인 전력제한 알고리즘 적용

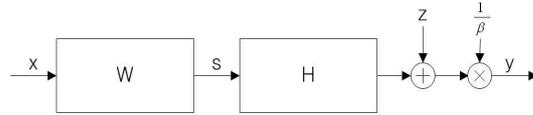


그림 4. 선형 사전 등화 기법  
Fig. 4. Linear pre-equalization technique.

SVD 기법은 송·수신단에서 직교 행렬인  $U, V$ 를 곱하기 때문에 사전부호화 행렬로 인한 송신 전력을 증가시키거나 특성을 변경하지는 않는다. 각 부채널에 대해 전력 할당을 하지 않을 경우에는 높은 SNR 영역에서 ZF 등화기와 동일한 성능을 보인다<sup>[5]</sup>.

### 3-3 선형 사전 등화 기법(Linear Pre-Equalization)

표 1은 등화 기법의 특징에 대해 요약하였다. 수신단에서 뿐만 아니라 송신단에서도 사전 등화를 수행할 수 있다. 여기서 사전 등화는 사전 부호화와 동일한 의미이며, 선형 사전 부호화인 경우에 한해서 일반적으로 사전 등화라고 쓴다. 먼저 ZF 사전 등화에 대해 기술하면, 송신 신호  $s$ 는 다음과 같다.

$$s = Wx. \quad (5)$$

이 때, ZF 사전 등화 행렬  $W$ 는 다음과 같다.

$$W_{pre-ZF} = \beta H^{-1}, \quad \beta = \sqrt{\frac{N_T}{Tr(H^{-1} H^{-T})}}, \quad (6)$$

여기서,  $\beta$ 는 전체 전력 제한이  $N_T$ 일 때 사전 등화를 통한 전체 송신 전력에 변함이 없도록 하기 위한 상수 값이다. 이는 수신단에서 다시 AGC(Automatic Gain Control)에 의해  $\beta$ 값으로 나눔으로써 송신 신호  $x$ 를 복원할 수 있다. 수신 신호  $y$ 는 다음과 같다.

$$y = x + \frac{1}{\beta}z. \quad (7)$$

ZF 사전 등화는 모든 채널에 공통적인 행렬을 곱하기 때문에 전력 할당을 수행할 수 없다.  $\beta$ 값에 의한 잡음의 증폭 현상은 수신단에서 ZF 등화와 동일하므로 BER 성능도 동일하다.

MMSE 사전 등화 기법도 송신단에서 사용할 수 있다<sup>[6]</sup>. 송신단에서 MMSE 사전 등화 기법을 사용할 경우에는 수신단의 MMSE 기법과 달리 추가적으로 전체 전력 제한이 고려된다.

그림 4의 환경에서 MMSE 기반의  $W$ 는 다음과 같다.

$$W_{pre-MMSE} = \arg \min E \{ \| \beta^{-1}(HW_x + z) - x \|^2 \}. \quad (8)$$

위의 조건을 만족하고 전력 제한이 고려되지 않은 최적 MMSE 사전 등화 행렬  $\tilde{W}$ 는 다음과 같다.

$$\tilde{W}_{pre-MMSE} = H^T \left( HH^T + \frac{\sigma_n^2}{\sigma_x^2} I \right)^{-1}. \quad (9)$$

ZF 기법과 동일하게 사전 등화로 인한 전체 전력 증가를 제한해야 하므로, 사전 등화 행렬  $W$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

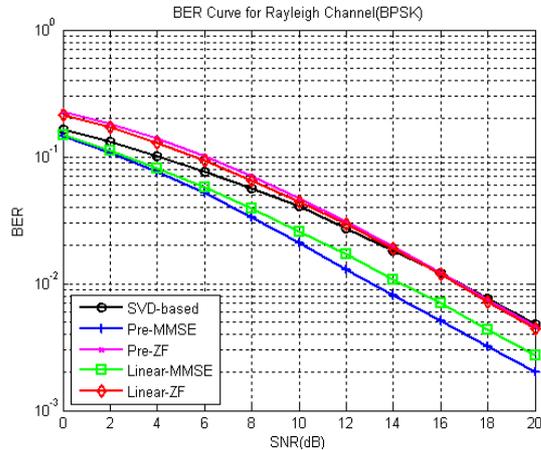
$$W_{pre-MMSE} = \tilde{W} \sqrt{\frac{N_T}{Tr(\tilde{W}\tilde{W}^T)}}. \quad (10)$$

#### IV. 모의실험 결과

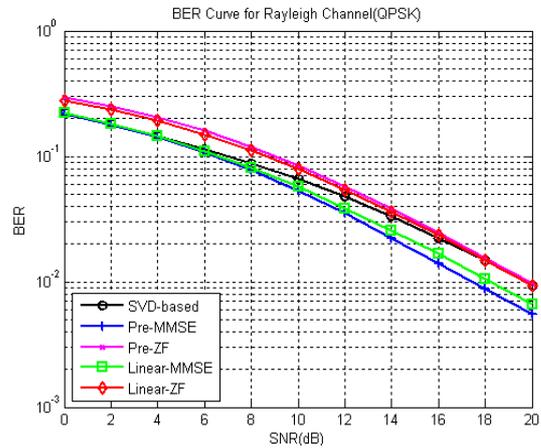
이번 장에서는 페이딩 환경에서 사전 등화를 이용한 MIMO-OFDM의 BER 성능을 모의실험을 통해 비교한다. 각 부 채널간 직교성이 유지되고, 정확한 동기 및 채널 추정이 이루어졌다고 가정한다. 모의실험을 위한 파라미터는 표 2와 같다.

표 2. 모의실험 파라미터  
Table 2. Simulation parameters.

Number of antenna	$N_T=N_R=2, 4$
FFT size	128
Modulation	BPSK, QPSK
Channel	Rayleigh + AWGN
Equalizer	ZF, MMSE
※ Uncoded MIMO-OFDM systems	



(a) Modulation - BPSK



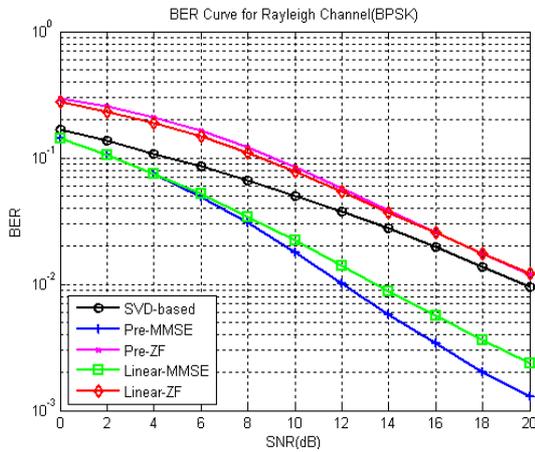
(b) Modulation - QPSK

그림 5. 등화 기법에 따른 MIMO-OFDM의 성능(2×2 MIMO)

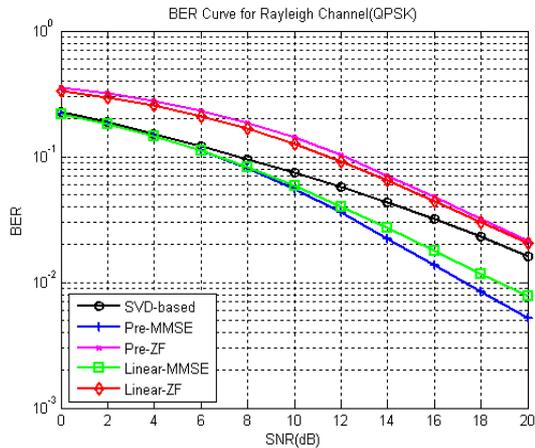
Fig. 5. Performance of MIMO-OFDM by equalization technique(2×2 MIMO).

그림 5는 사전 등화를 이용한 2×2 MIMO-OFDM의 BER 성능을 나타낸다. 모의실험 결과 2×2 MIMO에서는 선형과 사전 등화의 성능은 큰 차이가 없었고, 변조 차수가 올라갈수록 성능은 열화되었다. 그리고 Pre-ZF은 전력 할당을 수행하지 않기 때문에 Linear-ZF과 성능이 동일함을 확인할 수 있었다.

그림 6은 4×4 MIMO-OFDM에서의 BER 성능을 나타낸다. 안테나의 수가 증가할수록 공간 다중화 성능이 증가하고, Pre-MMSE이 가장 좋은 성능을 보인다. Pre-MMSE는 기존의 선형 기법과 달리 송신단에서 전력 할당을 수행하기 때문에 좋은 성능을 보인다.



(a) Modulation - BPSK



(b) Modulation - QPSK

그림 6. 등화 기법에 따른 MIMO-OFDM의 성능(4×4 MIMO)

Fig. 6. Performance of MIMO-OFDM by equalization technique(4×4 MIMO).

## V. 결론

본 논문에서는 MIMO-OFDM 시스템에서 사전 등화를 이용한 공간 다중화 성능에 대해 분석하였다. OFDM 기법은 심벌과 심벌 사이에 채널의 지연 확산보다 긴 보호 구간을 삽입하여 ISI를 제거할 수 있다. 그러나 다중경로의 채널 지연이 심각해질 경우,

보호 구간만으로는 ISI을 모두 제거할 수 없고 이러한 경우 등화기를 사용하여 보상해 주어야 하며, 특히 데이터 전송 속도가 고속이 될수록 등화기의 사용이 절대적으로 필요하게 된다. 모의실험을 통해 기존의 선형 등화 기법(ZF, MMSE)과 SVD 기법, 사전 등화 기법의 BER 성능을 페이딩 환경에서 비교하였다. 성능 분석 결과, MIMO-OFDM 시스템의 안테나 수가 증가할수록 사전 등화 기법이 기존의 선형 등화 기법 및 SVD 기법보다 좋은 성능을 보임을 확인할 수 있었다. 본 논문의 결과는 MIMO-OFDM 시스템에서 사전 등화 알고리즘을 구현하는 데 활용될 수 있다.

## 참고 문헌

- [1] J. Y. Kim, *MIMO-OFDM System for High-Speed Wireless Communications*, Gyobo Publishers, Seoul, Korea, 2008.
- [2] M. Jankiraman, *Space-Time Codes and MIMO Systems*, Artech House Publishers, 2004.
- [3] S. M. Alamouti, "A simple transmit diversity technique for wireless communications", *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 16, no. 10, pp. 1451-1458, Oct. 1998.
- [4] J. A. C. Bingham, "Multicarrier modulation for data transmission: An idea whose time has come", *IEEE Communications Magazine*, vol. 28, no. 5, pp. 5-14, May 1990.
- [5] I. Telatar, "Capacity of multi-antenna Gaussian channels", *European Trans. Tel.*, vol. 10, no. 6, pp. 585-595, Nov./Dec. 1999.
- [6] M. Joham, W. Utschick, and J. A. Nossek, "Linear transmit processing in MIMO communications systems", *IEEE Trans. Signal Processing*, vol. 53, issue 8, pp. 2700-2712, Aug. 2005.

배 정 남



2009년 2월: 광운대학교 전자공학과 (공학사)  
2009년 3월~현재: 광운대학교 전자공학과 석사과정  
[주 관심분야] 무선 통신, 디지털 통신, 방송 시스템

김 진 영



1998년: 서울대학교 전자공학과 (공학박사)  
2000년: 미국 Princeton University, Research Associate  
2001년: SK텔레콤 네트워크 책임연구원  
2009년: 미국 M.I.T 공대 Visiting Scientist  
2001년~현재: 광운대학교 전자공학과 부교수  
[주 관심분야] 디지털 통신, 신호 처리, 채널 부호화

박 우 철



1987년 2월: 건국대학교 전자공학과 (공학사)  
1993년 2월: 고려대학교 전자통신학과 (공학석사)  
2007년~현재: 아주대학교 NCW 공학과 박사과정  
2009년~현재: 방위사업청 위성/무선 통신장비사업팀

[주 관심분야] 협력 통신, 채널 모델링, 채널 부호화