

MIMO-OFDM 시스템에서 V-BLAST 수신기의 성능

박희준 · 안진영 · 김상준
 동아대학교 전자공학학

Performance of MIMO-OFDM System using V-BLAST Receiver

Hee-jun Park · Jin-young An · Sang-choon Kim
 Department of Electronics Engineering, Dong-A University

Abstract - 본 논문은 MIMO(Multiple Input Multiple Output)-OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 시스템에서 V-BLAST (Vertical-Bell Laboratories Layered Space Time) 수신기에 대하여 성능을 비교하고 평가한다. 신호는 각각의 송신 안테나에서 독립적으로 전송되며 QPSK(Quadrature Phase Shift Keying) 방식을 이용하여 변조 되고, 송·수신단에 각각 2개의 안테나와 각각 4개의 안테나를 사용한다. V-BLAST 수신기로 ZF(zero-Forcing), MMSE(Minimum Mean Squared Error), ZF-OSIC(Zero Forcing - Ordered Successive Interference Cancellation), MMSE-OSIC(Minimum Mean Squared Error - Ordered Successive Interference Cancellation)를 사용한다. 모의실험 결과에서 MMSE 방식이 ZF 방식 보다 좋은 BER(Bit Error Rate)을 보이고, ZF-OSIC 방식은 ZF 방식과 MMSE 방식 보다 더 좋은 BER을 가지는 것을 확인 할 수 있으며, MMSE-OSIC 방식은 사용된 방식 중 가장 좋은 성능을 보인다.

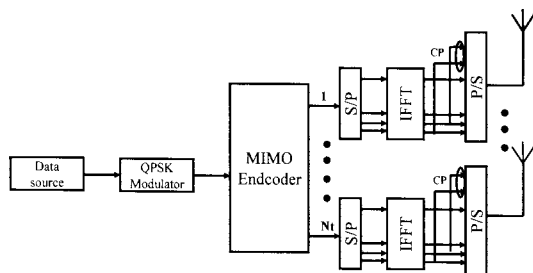
1. 서 론

최근 무선 통신 시스템은 음성뿐만 아니라 문자나 사진 영상 등의 다양한 형태의 정보를 전송함에 따라 고품질, 대용량의 정보를 고속으로 전송할 수 있는 능력이 요구되어지고 있다. 이러한 요구에 부합하여 최근 MIMO 시스템과 OFDM 기술을 바탕으로 한 MIMO-OFDM 시스템에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. MIMO 시스템은 기존의 SISO(single input single output)시스템인 단일 입력 단일 출력 시스템을 확장시킨 것으로 송신단과 수신단에 다중 안테나를 사용하여 서로 다른 데이터 스트림을 동시에 전송함으로써 시스템의 주파수 대역폭을 증가시키지 않고 고속의 데이터를 전송할 수 있는 공간다중화 기법을 사용하고 있다[2]. OFDM 기술은 기존의 주파수 분할 다중화 기법을 확장하여 반송 주파수간에 직교성을 유지함으로써 주파수를 효율적으로 사용할 수 있는 기법으로 고속으로 입력되는 신호의 협대역 채널을 광대역 채널로 변환함으로써 주파수 선택적 페이딩에 강하다고 일반적으로 알려져있다[6,7]. MIMO-OFDM 시스템은 위에서 살펴본바와 같이 MIMO와 OFDM의 장점을 살려 결합한 시스템으로 MIMO 시스템에서 고속의 정보 전송시 생기는 주파수 선택적 페이딩에 취약한 단점을 OFDM 기법을 이용하여 보완한 것이다[5]. 본 논문은 본문 부분인 2장의 2.1 절에서 MIMO-OFDM 시스템 모델에 대하여 설명하고, 2.2절에서 MIMO-OFDM 수신기로 사용된 V-BLAST 수신기를 설명한다. 그리고 2.3 절에서 모의실험을 통한 성능을 평가하고, 3장에서 결론을 짓는다.

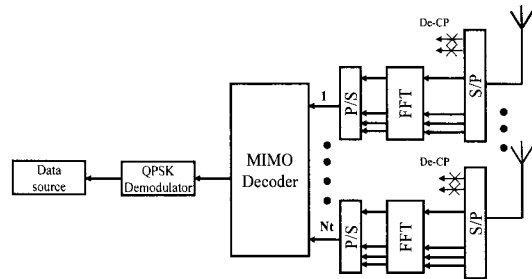
2. 본 론

2.1 MIMO-OFDM 시스템 모델

MIMO-OFDM 시스템의 기본적인 송신기 구조와 수신기 구조가 그림 2.1.1과 그림 2.1.2에 나타나 있다.



<그림 2.1.1> MIMO-OFDM Transmitter



<그림 2.1.2> MIMO-OFDM Receiver

그림 2.1.1 에 나타난 MIMO-OFDM의 송신기 구조는 기존의 MIMO 시스템과 비교해서 각 송신 안테나에서 신호가 전송되기 전 IFFT(Inverse Fast Fourier Transform) 과정이 있으며 IFFT 하기 전 직렬로 입력되는 신호를 병렬로 변환하는 과정이 있다. 그리고 IFFT 된 신호는 CP(Cycle Prefix) 한 다음 각 송신 안테나에서 전송하기 전 직렬과정을 거쳐 전송된다. CP는 ISI(Inter Symbol Interference)를 제거하기 위한 것으로 입력된 데이터의 후반부의 정보를 복사하여 앞부분에 붙이는 것이다[7]. 마찬가지로 그림 2.1.2에 나타난 수신기 구조에서 각 수신 안테나에서 신호는 FFT 하는 과정이 있으며 신호는 FFT 하기 전 직렬로 입력되는 신호를 병렬로 변환하고 FFT를 행한 후 CP를 제거하고 직렬신호로 변환하는 과정으로 구성되어 있다. 송신 안테나의 개수는 M_t 개이며 수신 안테나의 개수는 M_r ($M_r \geq M_t$) 개다. 변조 방식은 QPSK (Quadrature phase shift keying)하여 변조하고 복조한다. MIMO-OFDM의 채널은 MIMO 시스템에서 광대역의 주파수 선택적 페이딩 채널을 OFDM 방식을 결합함으로써 협대역 주파수 평탄 채널로 해석할 수 있으며 l 번째 부반송파에서 i 번째 송신 안테나에 대한 j 번째 수신 안테나에서의 채널은 $h_{j,i,l}$ 로 나타내며 순환 대칭 복소 가우시안(Circular Symmetric Complex Gaussian)으로 평균이 0, 분산이 1인 $CN(0,1)$ 의 분포를 가진다. l 번째 부반송파에 대한 $M_t \times M_r$ 크기를 갖는 채널 행렬 \mathbf{H}_l 을 다음과 같이 나타낼 수 있다[5,6].

$$\mathbf{H}_l = \begin{bmatrix} h_{1,1,l} & \dots & h_{1,M_t,l} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{M_r,1,l} & \dots & h_{M_r,M_t,l} \end{bmatrix} \quad (1)$$

채널 정보는 수신단에서 완벽하게 알고 있다고 가정하였으나. 송신기에서 채널 정보를 알지 못할 경우 전체 전송 전력 P_t 는 송신 안테나의 개수 M_t 만큼 균일하게 나누어서 전력을 할당할 수 있다. 이 때 채널을 통과한 신호는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{r}_l = \sqrt{\frac{P_t}{N_r \cdot l}} \mathbf{H}_l \mathbf{d} + \mathbf{w} \quad (2)$$

여기서 \mathbf{d} 은 크기 $M_t \times 1$ 인 l 번째 부반송파에서 송신된 신호 벡터이고, \mathbf{r}_l 은 $M_r \times 1$ 크기를 갖는 수신된 신호 벡터이다. 그리고 \mathbf{w} 은 크기 $M_r \times 1$ 인 벡터로 부가 백색 가우시안 잡음(Additive White Gaussian Noise: AWGN)이며, 평균이 0이고, 분산이 $2\sigma_w^2$ 을 가지는 $CN(0, 2\sigma_w^2)$ 의 분포를 따른다. 따라서 신호대 잡음비는 $P_t/2\sigma_w^2$ 으로 표현할 수 있다.

2.2 V-BLAST 수신기

MIMO 시스템에서 공간 다중화 기법에 사용되는 대표적인 방법으로 V-BLAST를 들 수 있다. BLAST는 1996년 Foschini에 의해 제안 된 것으로 MIMO 시스템에서 신호를 전송 할 때 각 송신 안테나에서 서로 다른 데이터를 코딩 작업없이 독립적으로 신호를 전송하는 것이며 초기에 제안 된 D-VLAST에 비해 구현의 복잡도를 줄이고 전송 속도를 증가시킨 것이다. V-BLAST 수신기로는 주로 ZF, MMSE 방식이 사용 된다. 본 논문에서는 ZF 방식과 MMSE 방식, ZF-OSIC 방식 그리고 MMSE-OSIC 방식의 수신기를 사용하여 신호를 검출하고 성능을 평가한다.

2.2.1 ZF 수신기

ZF 방식은 간단한 선형 수신기로 수신된 신호 \mathbf{r}_i 에서 전송된 신호 \mathbf{d}_i 를 검출하기 위하여 다음과 같이 정의 되는 Moore -Penrose 준역행렬 (pseudo-inverse)을 이용한다[1,2].

$$\mathbf{H}_i^+ = (\mathbf{H}_i^H \mathbf{H}_i)^{-1} \mathbf{H}_i^H \quad (3)$$

위 식에서 \mathbf{H}_i^+ 는 채널 \mathbf{H}_i 에 대한 Hermitian 연산을 나타낸다. ZF수신기를 통해서 수신된 신호를 통해 검출된 신호 $\hat{\mathbf{d}}_i$ 는 다음과 같이 수식적으로 표현 할 수 있다.

$$\hat{\mathbf{d}}_i = \mathbf{H}_i^+ \mathbf{r}_i \quad (4)$$

ZF 방식의 수신기는 채널 정보를 알고 있을 때 역채널을 이용하여 신호를 완벽히 구분해 낼 수 있는 장점이 있으나 잡음을 증가시키는 단점이 있다. 따라서 2.2.2에서 잡음의 영향을 줄일 수 있는 MMSE 수신기에 대하여 살펴본다.

2.2.2 MMSE 수신기

ZF 방식에서 신호 검출 시 잡음이 증가하므로 MMSE 방식에서는 이것을 줄이기 위해 잡음 성분을 고려하여 신호를 검출해 내도록 한다. MMSE 방식에서 검출된 신호 $\hat{\mathbf{d}}_i$ 는 다음과 같다[2,3,4].

$$\hat{\mathbf{d}}_i = (\mathbf{H}_i^H \mathbf{H}_i + 2\sigma_w^2 \mathbf{I}_N)^{-1} \mathbf{H}_i^H \mathbf{r}_i \quad (5)$$

식에서 보이는 바와 같이 검출하는 과정에 잡음성분이 포함 되어 있어 MMSE 방식은 ZF 방식보다 잡음에 덜 민감하지만 신호 구분 능력이 다소 떨어진다. 2.2.3에서는 OSIC 방식을 ZF 과 MMSE 에 접목하여 성능을 향상시킨 ZF-OSIC 과 MMSE-OSIC 방식을 살펴보도록 한다.

2.2.3 ZF-OSIC 및 MMSE-OSIC

OSIC 방식은 비선형 검출 방식으로 채널 H에서 SNR(Signal to Noise Ratio)이 가장 큰 성분을 우선 적으로 찾고 수신단에서 입력 받은 신호를 이 성분에 대하여 먼저 검출하고 다음 검출 시에는 채널 H에서 이전에 사용된 SNR이 가장 큰 성분은 제거 하고, 나머지 성분 중에서 다시 SNR이 채널 H에서 가장 큰 성분을 찾아 이것을 이용하여 다음 신호를 검출하는 방법을 반복하는 방식이다. ZF-OSIC와 MMSE-OSIC 방식은 기존의 ZF 방식과 MMSE 방식에 이러한 OSIC 방식을 결합하여 성능을 향상시킨 방법으로 1 번째 부반송파에 대한 알고리즘은 다음과 같다[1,2,4].

초기화

$$(\mathbf{G}_1)_1 = \begin{cases} (\mathbf{H}_1^H \mathbf{H}_1)^{-1} \mathbf{H}_1^H, & \text{if ZF-OSIC} \\ (\mathbf{H}_1^H \mathbf{H}_1 + 2\sigma_w^2 \mathbf{I}_N)^{-1} \mathbf{H}_1^H, & \text{if MMSE-OSIC} \end{cases} \quad (6a)$$

$$i = 1 \quad (6b)$$

반복

$$k_j = \arg \min_j \| ((\mathbf{G}_i)_i)_j \|^2, \quad j \in k_1, k_2, \dots, k_{i-1} \quad (6c)$$

$$(\mathbf{w}_i)_{k_i} = ((\mathbf{G}_i)_i)_{k_i} \quad (6d)$$

$$(\mathbf{y}_i)_{k_i} = (\mathbf{w}_i)_{k_i}^T (\mathbf{r}_i) \quad (6e)$$

$$(\hat{\mathbf{a}}_i)_{k_i} = Q((\mathbf{y}_i)_{k_i}) \quad (6f)$$

$$(\mathbf{r}_i)_{i+1} = (\mathbf{r}_i) - (\hat{\mathbf{a}}_i)_{k_i} (\mathbf{H}_i)_{k_i} \quad (6g)$$

$$(\mathbf{G}_i)_{i+1} = (\mathbf{H}_i^H)_{k_i} \quad (6h)$$

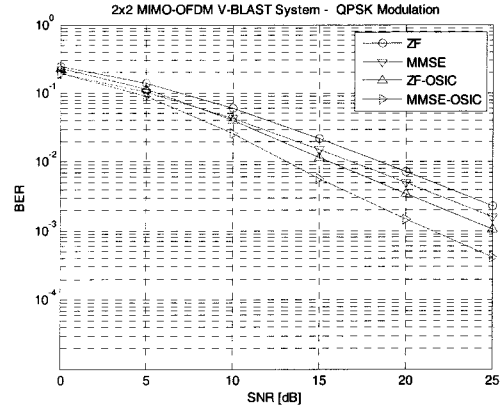
$$i = i + 1 \quad (6i)$$

위 알고리즘에서 식 (6a) $(\mathbf{G}_1)_1$ 은 1 번째 부반송파에 대하여 알고리즘이 ZF-OSIC 인지 MMSE-OSIC 인지에 따라 초기화 하는 과정이다. 식 (6c-i)는 반복되는 과정으로, (6c)의 $((\mathbf{G}_i)_i)_j$ 에서 j는 행을 나타낸다. (6d)에서 널링 벡터(Nulling Vector)를 정의 하고 식(6e-f)에서 k_i 번째 성분에 대한 추정치를 구한다. 식(6g-h)는 간섭 성분을 제거하고 다음 i 번째 반복을 위하여 \mathbf{H}_i 의 k_i 번째 열벡터 성분을 0으로 널링하여 다시 준역행렬을 구하는 과정이다.

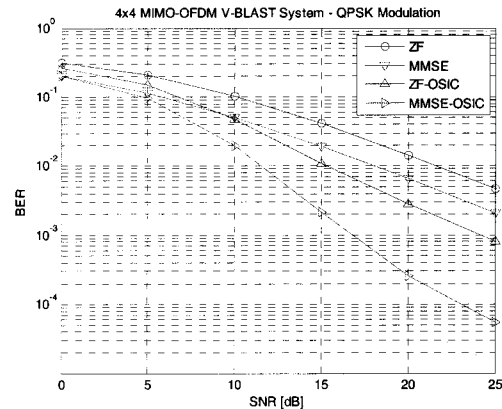
2.3 시뮬레이션 결과

BER 성능을 측정하기 위하여 모의실험은 100,000 회의 독립적인 Monte-Carlo 모의실험을 하였으며, QPSK 변조와 복조 방식을 사용한다. FFT 길이는 64를 사용하여 SNR에 따른 BER 특성을 나타내었다. 그림 2.3.1에서 결과 그래프는 송신 안테나와 수신 안테나는 각각 2개로 사용되었고, 그림 2.3.2에서는 송신 안테나와 수신 안테나가 각각 4개로 사용되었다. 그림 2.3.1에서 ZF 방식이 BER이 가장 높게 나타났으며, MMSE 방식은 잡음의 영향을 고려함으로써 ZF 방식보다 좀 더 좋은 BER 성능을 보인다. ZF-OSIC 방식은 ZF 방식에 OSIC 방식을 결합하여 간섭의 영향을 줄일 수 있으므로 ZF 방식이나 MMSE 방식 보다 좋은 BER 성능을 확인할 수 있다. 또한 MMSE-OSIC 방식은 MMSE 방식에 OSIC 방식을 결합하여 간섭의 영향을 효과적으로 줄임으로써 모의실험에 사용된 나머지 방식에 비해 BER 성능이 가장 좋은 결과를 보인다. 그림 2.3.2에서는 그림 2.3.1에서의 결과와 같이 성능이 좋은 순서가 MMSE-OSIC 방식, ZF-OSIC 방식, MMSE 방식, ZF 방식 순으로 결과를 보이고 있으나 송신 단과 수신단의 안테나 수가 늘어나면서 간섭의 영향이 커져 ZF 방식과 MMSE 방식은 송·수신단의 안테나수가 작을 때보다 BER 성능이 떨어진

다. 그러나 ZF-OSIC 방식과 MMSE-OSIC 방식에서는 안테나 수가 많을 때 간섭의 영향을 효과적으로 줄일 수 있어 송·수단 안테나수가 적을 때보다 BER 성능이 더 좋게 나타나는 것을 확인할 수 있다.



<그림 2.3.1> BER of 2x2 MIMO-OFDM SYSTEM



<그림 2.3.2> BER of 4x4 MIMO-OFDM SYSTEM

3. 결 론

본 논문에서는 MIMO-OFDM 페이딩 채널에서 V-BLAST 수신기를 이용한 BER 성능을 분석하였다. 시뮬레이션 결과에서 기존의 ZF 방식과 MMSE 방식에 OSIC 방식을 결합시킨 ZF-OSIC 방식과 MMSE-OSIC 방식은 간섭의 영향을 적절히 제거하여 ZF 방식과 MMSE 방식의 선형 검출 방식 보다 성능이 개선되는 것을 볼 수 있고, 또한 송·수신단의 안테나 수가 늘어날수록 ZF 방식과 MMSE 방식은 성능이 나빠지는데 반해 ZF-OSIC 방식과 MMSE-OSIC 방식은 송·수신 안테나 수가 늘어날수록 간섭을 효과적으로 제거하여 성능이 향상되는 결과를 확인할 수 있다.

[참 고 문 헌]

- [1] P. W. Wolniansky, G. J. Foschini, G. D. Golden, and R. A. Valenzuela, "V-BLAST: An Architecture for Realizing Very High Data Rates Over the Rich-Scattering Wireless Channel," ISSSE, URSI International Symposium on 29, pp.295-300, Sept, 1998.
- [2] Mohinder J., Space-Time Codes and MIMO Systems, Artech House, 2004
- [3] Trung Q. D., E. K. Hong, S. Y. Lee, "Effect of the Modified Channel Matrix on the MMSE V-BLAST System Performance," Wimob, IEEE International Conference, Vol. 1, pp. 133-136, Aug, 2005.
- [4] M. Debbah, P. Loubaton, M. Muck, B. Muquet, S. Simoens, and L. Philippe, "A MMSE successive interference cancellation scheme for a new adjustable hybrid spread OFDM system," Proc. IEEE Vehicular Technol. Conf. (VTC 2000-Spring), pp. 745-749, Tokyo, Japan, May 2000.
- [5] K.-W. Ng, R. S. Cheng, and R. D. Murch, "A simplified bit allocation for V-BLAST based OFDM MIMO systems in frequency selective fading channels," Proc. IEEE Int'l Conf. Commun. (ICC 2002), vol. 1, pp. 411-415, New York City, USA, May 2002.
- [6] L. J. Cimini, "Analysis and simulation of a digital mobile channel using orthogonal frequency division multiplexing," IEEE Trans. Commun., vol. 33, no. 7, pp. 665-675, Jul.1985.
- [7] R. V. Nee and R. Prasad, OFDM for wireless multimedia communications. Artech House, 2000.