상향 링크 다중 사용자 환경에서 공간 변조의 BER 성능

BER Performance of Spatial Modulation in Uplink Multi-User Environment

김진관 · 현광민* · 박상규

Jin Kwan Kim · Kwangmin Hyun* · Sang Kyu Park

요약

본 논문에서는 다중 안테나 시스템(Multiple Input Multiple Output: MIMO)를 사용하는 상향 링크 다중 사용자 환경에서 공간 변조(Spatial Modulation: SM) 기법을 사용하고, 변조된 신호를 수신 신호와 모든 송신 신호 후보를 비교하는 최대 우도(Maximum Likelihood: ML) 기법으로 복조하는 방법을 사용하여 시스템의 성능을 평가한다. 같은 데이터율(data rate)로 전송하였을 때 공간 변조 기법이 기존에 제안된 다중 사용자 환경에서의 공간 편이 방식(Space Shift Keying: SSK)보다 비트오류율(Bit Error Rate: BER) 성능이 좋아졌다.

Abstract

In this paper, we evaluate the performance of up-link multi-user MIMO systems with SM. The receiver demodulates the received signal using ML method determines the signal which seems to be the most probable after comparing the received signal and all transmitted signal candidates. When transmitting with the same data rate, the SM method shows better performance of bit error rate(BER) than that of the space shift keying(SSK) of the previously proposed multi-user system.

Key words : Multiple-Input-Multiple-Output(MIMO), Spatial Modulation(SM), Space Shift Keying(SSK), Maximum Likelihood Detection(ML)

1. 서론

MIMO 전송기법은 단일 안테나 전송기법에 비해 채널 용량(capacity)과 신뢰성(reliability)을 증대시켰다^[1]. 대표적인 기법으로 V-BLAST(Vertical Bell Laboratories layered space-time)가 있다. V-BLAST는 각 송신 안테나로부터 전송된 신호들의 각 부 채널을 수직적으로 구분하여 복원하는 기법이다^[2]. 하지만 모든 안테나가 동시에 신호를 전송하기 때문에, 직교성을 유지하지 못할 경우에는 채널 간 간섭이 생

기는 문제가 발생한다. 또한, MIMO 시스템에서는 복잡도가 증가하고, 채널 간 간섭(Inter-Channel Interference: ICI)과 안테나 간 동기화(Inter-Antenna Synchronization: IAS) 등의 문제가 발생한다. 최근에 기존 MIMO 시스템에 비해 복잡도를 줄이면서 ICI와 IAS에 강한 공간 변조 기법이 제안되었다^[3]. 하지만 이러한 공간 변조 기법은 단일 사용자 환경에 대해서만 주로 연구되었다. 동일한 무선 채널에서 동시에 여러 명의 사용자가 통신이 가능하면 처리율(throughput rate)이 크게 증가되기 때문에, 다중 사용자

한양대학교 전자컴퓨터통신공학과(Department of Electronics and Computer Engineering, Hanyang University)

*강릉원주대학교 정보통신공학과(Department of Information & Telecommunication Engineering, Gangneung-Wonju National University)

· Manuscript received June 14, 2013 ; Revised July 24, 2013 ; Accepted July 24, 2013. (ID No. 20130614-054)

· Corresponding Author : Sang Kyu Park (e-mail : skpark@hanyang.ac.kr)

환경에서의 공간 변조 기법의 연구가 필요하다.

공간 변조 기법은 신호를 전송할 때 여러 개의 안테나 중 오직 하나의 안테나로만 전송하고, 전송하지 않는 나머지 안테나는 휴지상태를 유지함으로써 신호를 보내는 상황이 SIMO(single input multi output) 환경과 동일하게 되어 채널 간 간섭과 안테나 간 동기화를 피할 수 있다는 장점을 갖는다^[3]. 그리고 최선의 복조방법인 최대 우도 검출기법을 사용하여 공간 변조 기법으로 전송된 신호의 데이터 심볼과 전송 안테나 인덱스를 찾는 방법이 제안되었다^[4].

또한, 공간 변조 방식을 더 단순화 시킨 공간 편이 방식이 제안되었다^[5]. 공간 편이 방식은 공간 변조 방식과 다르게 성상도를 이용한 데이터 심볼 신호 없이 오직 송신 안테나 인덱스 신호만으로 데이터를 전송한다. 그래서 공간 편이 방식은 같은 데이터 전송률로 데이터를 전송할 때 공간 변조 방식보다는 더 많은 송신 안테나 수를 요구하는 단점을 가지고 있다.

다중 사용자 환경에서는 각각의 사용자가 동시에 같은 시간, 같은 주파수 대역에 신호를 전송하고, 수신기에서는 수신된 서로 다른 신호들을 구별하여 복조하기 때문에 공간 편이 방식의 처리율을 극대화시킬 수 있다^[6]. 그러나 여전히 공간 변조 기법은 다중 사용자 환경에서는 연구가 부족하다.

본 논문에서는 상향 링크 다중 사용자 환경에서의 공간 변조 방식의 복조를 최적의 방식인 최대 우도 검출 기법을 이용하고, Monte Carlo 모의실험을 통해 다양한 조건에 따른 비트 오류율 성능을 비교한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2절에서는 다중 사용자 환경에서의 공간 변조 기법의 시스템 모델을 고찰한다. 3절에서는 최대 우도 검출기법을 기반으로 한 검출방법을 적용한다. 4절에서는 각각의 조건에 따른 BER 성능을 모의실험 결과를 비교분석하며, 5절에서 결론을 맺는다.

II. 공간 편이 방식의 시스템 모델

단일 사용자 환경에서 공간 편이 방식은 성상도로 변조한 데이터 심볼 신호 없이 오직 송신 안테나 인덱스 신호만으로 데이터를 전송하는 변조 기법이다.

공간 편이 방식의 전송 효율 n 은 다음과 같다.

그림 1. 공간 편이 방식의 성상도($M=4$)

Fig. 1. Constellation of SSK($M=4$).

$$n = \log_2 M \text{ (bit/s/Hz)} \quad (1)$$

하지만 공간 편이 방식은 데이터 심볼 신호를 사용하지 않기 때문에 전송 효율을 높이기 위해서는 더 많은 송신 안테나 수를 요구해야 하는 단점을 가지고 있다. 그림 1은 4개의 전송안테나 수를 사용하여 전송 효율이 2 bit/s/Hz인 공간 편이 방식의 성상도를 나타낸다.

M 개의 송신 안테나 중 $m(m=1, \dots, M)$ 번째 안테나로 전송하였을 때 송신기에서 전송하는 신호 s_m 는 다음과 같이 정의한다.

$$\mathbf{s}_m \triangleq [\mathbf{0}_{m-1} \quad 1 \quad \mathbf{0}_{M-m}]^T \quad (2)$$

채널을 통과한 수신된 신호 벡터 $\mathbf{r}$ 는 수신안테나 수가 N 일 때 $N \times 1$ 크기를 갖는 열벡터로 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{r} = \mathbf{C} \cdot \mathbf{s}_m + \mathbf{w} \quad (3)$$

여기서 $\mathbf{C} = [\mathbf{c}_1 \mathbf{c}_2 \dots \mathbf{c}_M]$ 은 $N \times M$ 크기의 채널 행렬이며, $\mathbf{c}_m = [c_{1,m} c_{2,m} \dots c_{N,m}]^T$ 는 m 번째 송신안테나의 채널 벡터를 나타낸다. $\mathbf{w} = [w_1 w_2 \dots w_N]^T$ 는 벡터 크기가 N 이고, 전력 스펙트럼 밀도가 $N_0/2$ watts/Hz인 AWGN(additive white Gaussian noise) 벡터이다.

그리고 식 (2)를 이용하여 식 (3)을 간략히 하면 한 심볼 시간 동안 s_m 은 1의 값을 갖고, 따라서 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{r} = \mathbf{c}_m + \mathbf{w} \quad (4)$$

따라서, 수신 신호 식 (4)는 최대 우도 검출기법을

이용하여 송신 신호를 찾을 수 있다^[5].

다중 사용자 환경에서도 최대 우도 방식으로 각 사용자의 안테나 인덱스 벡터를 추정하여 각 사용자의 신호를 구별한다^[6].

Ⅲ. 상향 링크 다중 사용자 환경에서의 공간 변조 시스템 모델

기존 단일사용자 환경에서 공간 변조 기법은 정보 비트를 두 가지 구성 단위(unit)로 전송한다. 즉, PSK(phase shift keying), QAM(quadrature amplitude modulation)과 같은 변조 기법에 따른 데이터 심볼 신호와 어떤 송신 안테나로 전송했는지에 대한 안테나 인덱스 신호를 전송한다. 성상도의 크기가 Q 개인 Q 진 데이터 심볼신호를 통해 $\log_2 Q$ 개의 정보 비트를 전송하고, M 개의 전송안테나를 이용한 안테나 인덱스 신호를 통해 $\log_2 M$ 개의 비트를 전송한다.

본 논문에서는 기존 공간 변조 기법을 다중 사용자 환경에서 고려하였다. 그림 1은 상향 링크 다중 사용자 MIMO 시스템 모델이며, U 명의 사용자와 N 개의 수신 안테나를 가진 하나의 기지국에 의해 형성된다.

각 사용자 당 전송 효율 n 은 다음과 같이 나타낼 수 있다^[3].

$$n = \log_2 M + \log_2 Q = \log_2 (MQ) \text{ (bit/s/Hz/users)} \quad (5)$$

그림 2. 상향 링크 다중 사용자 MIMO 시스템 모델
Fig. 2. Uplink multi-user MIMO system model.

여기서 M 은 모든 사용자의 동일한 송신 안테나 수 ($M=1, 2, 4, \dots, 2^m$)이고, Q 는 모든 사용자 신호에서 사용하는 변조 기법의 차수($Q=1, 2, 4, \dots, 2^q$)이다.

m_u 번째 송신안테나로 전송하는 신호 벡터 $\mathbf{s}_{m_u, q_u}^{(u)}$ 는 다음과 같이 나타낸다.

$$\mathbf{s}_{m_u, q_u}^{(u)} = [\mathbf{0}_{m_u-1} \quad s_{q_u}^{(u)} \quad \mathbf{0}_{M-m_u}]^T \quad (6)$$

여기서 $\mathbf{0}_{m_u}$ 은 크기가 $1 \times m_u$ 인 영벡터이고, $[\cdot]^T$ 는 전치 연산을 나타낸다. $s_{q_u}^{(u)}$ 는 U 명의 사용자 중 u 번째 사용자가 전송하는 Q 진 성상도의 q_u ($q_u=1, \dots, Q$)번째 위치한 데이터 심볼 신호이며, 전력은 $\sigma_s^2 = E\{s_{q_u}^{(u)} \cdot (s_{q_u}^{(u)})^*\}$ 이다. 본 논문에서는 기지국에 들어오는 모든 사용자 신호의 수신 전력은 같다고 가정한다. 또한, 각 사용자는 기지국에서 동시에 같은 주파수 대역으로 신호를 받고, 송신기와 수신기의 시간과 주파수 동기가 완벽하다고 가정한다. 그리고 각 사용자의 채널 정보는 다르다고 가정한다. 따라서 수신신호 벡터 $\mathbf{r}$ 은 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{r} = \sum_{u=1}^U [\mathbf{C}^{(u)} \mathbf{s}_{m_u, q_u}^{(u)}] + \mathbf{w} \quad (7)$$

여기서 $\mathbf{C}^{(u)} = [\mathbf{c}_1^{(u)} \quad \mathbf{c}_2^{(u)} \quad \dots \quad \mathbf{c}_M^{(u)}]$ 는 $N \times M$ 크기의 행렬로써 사용자 u 의 채널 행렬이고, $\mathbf{c}_{m_u}^{(u)} = [c_{1, m_u}^{(u)} \quad c_{2, m_u}^{(u)} \quad \dots \quad c_{N, m_u}^{(u)}]^T$ 는 m_u ($m_u=1, 2, \dots, M$)번째 송신안테나의 채널 벡터를 나타낸다. 또한, 각 성분인 $c_{n, m_u}^{(u)}$ 는 m_u 번째 송신안테나에서 n 번째 수신안테나로 전송할 때의 채널을 나타낸다.

식 (6)을 이용하여 식 (7)을 간략히 하면 수신신호 벡터 $\mathbf{r}$ 은 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{r} = \sum_{u=1}^U [\mathbf{c}_{m_u, q_u}^{(u)} s_{q_u}^{(u)}] + \mathbf{w}. \quad (8)$$

Ⅳ. 공간 변조 방식에서의 최대 우도 검출기법

단일 사용자 환경에서 최대 우도 검출 방식은 송신 가능한 심볼 벡터들을 모두 고려하여 아래 식 (9)로 표현되는 메트릭 값을 최소화 하는 송신 벡터를 찾아내는 방식으로 송신 심볼 벡터의 전송 확률이

모두 같을 때 최적의 성능을 얻을 수 있다.

각 사용자의 안테나 인덱스 $\tilde{m}$ 과 각 사용자의 데이터 심볼 $\tilde{q}$ 을 다음과 같이 추정한다.

$$(\tilde{m}, \tilde{q}) = \arg \min_{m, q} \|\mathbf{r} - \mathbf{c}_m s_q\|_F^2 \quad (9)$$

수신된 공간 편이 신호 식 (4)는 이미 알고 있는 채널과 최대 우도 검출 기법을 이용하여 복조를 수행하면 다음 식과 같다^[5].

$$\begin{aligned} \tilde{m} &= \arg \max_m p_{\mathbf{R}}(\mathbf{r} | \mathbf{c}_m) \\ &= \arg \min_m \|\mathbf{r} - \mathbf{c}_m\|_F^2 \end{aligned} \quad (10)$$

여기서 $p_{\mathbf{R}}(\mathbf{r} | \mathbf{c})$ 은 다음과 같다.

$$p_{\mathbf{R}}(\mathbf{r} | \mathbf{c}_m) = \frac{\exp(-\|\mathbf{r} - \mathbf{c}_m\|_F^2)}{\pi^N} \quad (11)$$

따라서, 상향 링크 다중 사용자 환경에서의 공간 변조 방식도 식 (10)과 식 (11)을 확장한 최적의 검출 기법인 최대 우도 검출기법을 사용하여 신호를 복조한다. 즉, 수신기는 각 사용자의 데이터 심볼 신호와 안테나 인덱스를 최대 우도 검출기법을 사용하여 추정한다.

수신기는 채널 정보를 완벽히 알고 있다고 가정하므로, 각 사용자의 안테나 인덱스 벡터 $\tilde{\mathbf{m}} = [\tilde{m}_1, \tilde{m}_2, \dots, \tilde{m}_U]$, $\tilde{m}_u = 1, \dots, M$ 과 각 사용자의 데이터 심볼 벡터 $\tilde{\mathbf{q}} = [\tilde{q}_1, \tilde{q}_2, \dots, \tilde{q}_U]$, $\tilde{q}_u = 1, \dots, Q$ 을 추정하기 위해서 식 (12)를 이용한다.

$$\begin{aligned} (\tilde{\mathbf{m}}, \tilde{\mathbf{q}}) &= \arg \max_{m_1, m_2, \dots, m_U, q_1, q_2, \dots, q_U} p_{\mathbf{R}}(\mathbf{r} | \mathbf{c}_{m_1}^{(1)}, \mathbf{c}_{m_2}^{(2)}, \dots, \mathbf{c}_{m_U}^{(U)}, s_{q_1}^{(1)}, s_{q_2}^{(2)}, \dots, s_{q_U}^{(U)}) \\ &= \arg \max_{m_1, m_2, \dots, m_U, q_1, q_2, \dots, q_U} \frac{\exp(-\|\mathbf{r} - \mathbf{c}_{m_u}^{(u)} s_{q_u}^{(u)}\|_F^2)}{\pi^N} \\ &= \arg \min_{m_1, m_2, \dots, m_U, q_1, q_2, \dots, q_U} \|\mathbf{r} - \mathbf{c}_{m_u}^{(u)} s_{q_u}^{(u)}\|_F^2 \end{aligned} \quad (12)$$

식 (12)에서 Frobenius norm 연산을 풀어 쓰면 식 (13)과 같이 표현된다.

$$(\tilde{\mathbf{m}}, \tilde{\mathbf{q}}) = \arg \min_{m_1, m_2, \dots, m_U, q_1, q_2, \dots, q_U} \sum_{u=1}^U (\Theta_1 + \Theta_2 + \Theta_3) \quad (13)$$

여기서

$$\begin{aligned} \Theta_1 &= \|\mathbf{c}_{m_u}^{(u)}\|_F^2 (s_{q_u}^{(u)})^* s_{q_u}^{(u)} \\ \Theta_2 &= -2 \operatorname{Re} \left\{ \mathbf{r}^H \mathbf{c}_{m_u}^{(u)} s_{q_u}^{(u)} \right\} \\ \Theta_3 &= -2 \sum_{l=u+1}^U \operatorname{Re} \left\{ (\mathbf{c}_{m_u}^{(u)})^H \mathbf{c}_{m_l}^{(l)} (s_{q_u}^{(u)})^* s_{q_l}^{(l)} \right\} \end{aligned} \quad (14)$$

그리고 $(\cdot)^H$ 는 Hermitian 연산을 나타내고, $(\cdot)^*$ 는 공액(conjugate)임을 나타낸다.

위의 식 (12)와 식 (13)에서 보는 바와 같이 최적의 검출기법인 최대 우도 검출 기법으로 복조하려면 안테나 인덱스와 심볼을 동시에 비교 판별하는 결합 검출을 사용해야 한다.

V. 모의실험 결과 및 분석

이 절에서는 Monte Carlo 모의실험을 통해 상향 링크 다중 사용자 환경에서의 공간 변조 기법으로 전송한 신호를 3절에서 소개된 최대 우도 기법으로 검출하였을 때 SNR(signal to noise ratio) = E_b/N_0 에 따른 신호의 BER 성능을 분석한다. 기존에 제안된 공간 편이 기법과 단일 전송 안테나 기법을 같은 비트 수 조건에서 비교하고, 송, 수신안테나 수와 사용자 수에 따른 성능 변화를 분석한다. BER 모의실험을 위하여 데이터 심볼 신호는 Gray 맵핑을 한다. 채널은 independent identically distributed (i.i.d.) 레일레이 페이딩 채널을 사용한다.

그림 3는 수신기에서 2개의 수신안테나를 사용하

그림 3. 비트 수 $n=3$ bits/s/Hz/users에서 사용자 수에 따른 BER 성능비교($M=2$, $N=2$, $Q=4$ (QPSK))

Fig. 3. BER performance comparison for various number of users with $n=3$ bits/s/Hz/users($M=2$, $N=2$ and $Q=4$ (QPSK)).

그림 4. 비트 수 $n=4$ bits/s/Hz/users에서 공간 변조 기법과 공간 편이 기법, 단일 전송 안테나 기법 BER 성능 비교($N=4$, $U=1$ and 2)

Fig. 4. BER performance of SM versus SSK with single antenna, for $n=4$ bits/s/Hz/users transmission($N=4$, and $U=1$ and 2).

고, 각 사용자가 2개의 송신 안테나와 QPSK 변조를 하여 비트 수 $n=3$ (bits/s/Hz/user)인 공간 변조에 적용하였을 때 사용자 수에 따른 BER 성능 결과이다. 위 조건에서 사용자 수가 1명씩 증가할 때마다 대략 2.5 dB 정도의 성능 저하가 발생하는 것을 관찰할 수 있다.

그림 4는 각 사용자당 비트 수 $n=4$ 인 조건에서 송신 안테나 수 M 과 데이터 심볼 수 Q 를 다르게 한 ($M \times Q=16$) 공간 변조 기법과 16개의 송신안테나를 사용한 공간 편이 기법, 16QAM으로 변조한 단일 전송 안테나 기법의 BER 성능을 나타냈다. 여기서 수신안테나의 수 $N=4$ 로 하였고, 실선은 단일사용자 환경에서의 성능이고, 점선은 두 명의 사용자 환경에서의 성능이다. 단일사용자 환경과 두 명의 사용자 환경 모두 2개의 전송안테나를 사용하였다. BER 10^{-5} 을 기준으로 했을 때, BPSK($Q=2$)이나 QPSK($Q=4$) 기법으로 변조한 공간 변조의 BER 성능은 16개의 전송 안테나를 사용한 공간 편이 기법과 BER 성능이 같고, 16QAM으로 전송한 단일 전송 안테나 기법보다 거의 3.5 dB 정도 성능이 우수하다.

VI. 결 론

다중 사용자 환경에서는 각각의 사용자가 동시에 같은 시간 같은 주파수 대역에 신호를 전송하고, 수신기에서는 수신된 서로 다른 신호들을 구별하여 복

조하기 때문에 총 처리율이 크게 증가된다. 본 논문에서는 상향 링크 다중 사용자 MIMO 시스템 환경에서 공간 변조 기법을 이용하여 송신된 신호를 최대 우도 기법을 사용하여 검출하는 방법을 제시하고, 모의실험을 통해 BER 성능을 비교하였다. 동일 비트 수로 전송한다고 할 때, 공간 변조 기법과 공간 편이 기법을 비교하면 BPSK나 QPSK로 변조한 경우에는 BER 성능이 동일하지만, 공간 변조 기법은 공간 편이 기법으로 보내는 비트 수와 같은 비트 수를 보내려면 공간 편이 기법에서 사용한 송신 안테나 수보다 더 적은 수의 안테나를 필요로 하는 장점을 갖고 있다.

References

- [1] G. J. Foschini, M. J. Gans, "On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas", *Wireless Pers. Commun.*, vol. 6, pp. 311-335, Mar. 1998.
- [2] P. Wolniansky, G. Foschini, G. Golden, and R. Valenzuela, "V-BLAST: an architecture for realizing very high data rates over the rich-scattering wireless channel", *Proc. 1998 International Symp. Signals, Syst., Electron.*, pp. 295-300, Sep. 1998.
- [3] R. Mesleh, H. Haas, S. Sinanovic, C. W. Ahn, and S. Yun, "Spatial modulation", *IEEE Trans. Veh. Tech.*, vol. 57, no. 4, pp. 2228-2241, Jul. 2008.
- [4] J. Jeganathan, A. Ghrayeb, and L. Szczecinski, "Spatial modulation: optimal detection and performance analysis", *IEEE Commun. Lett.*, vol. 12, no. 8, pp. 545-547, Aug. 2008.
- [5] J. Jeganathan, A. Ghrayeb, L. Szczecinski, and A. Ceron, "Space shift keying modulation for MIMO channels", *IEEE Trans. on Wireless Commun.*, vol. 8, no. 7, pp. 3692-3703, Jul. 2009.
- [6] D. Gesbert, M. Kountouris, R. W. Heath, Jr., C. B. Chae, and T. Salzer, "Shifting the MIMO paradigm: from single user to multiuser communications", *IEEE Signal Processing Mag.*, vol. 24, no. 5, pp. 36-46, Oct. 2007.
- [7] M. Di Renzo, H. Haas, "Bit error probability of spa-

ce-shift keying MIMO over multiple-access independent fading channels", *IEEE Trans. Veh. Tech.*,

vol. 60, no. 8, pp. 3694-3711, Oct. 2011.

김 진 관

2005년 2월: 충북대학교 전기전자
컴퓨터공학부 (공학사)
2007년 2월: 충북대학교 전자공학
과 (공학석사)
2007년 3월~현재: 한양대학교 전자
컴퓨터통신 박사과정
2008년 7월~2012년 10월: (주)파인

디지털

2012년 10월~현재: (주)아이티텔레콤

[주 관심분야] 가시광통신, 채널 추정, Wireless Access in
Vehicle Environments

박 상 규

1974년: 서울대학교 전기공학과 (공
학사)
1980년: Duke University (공학석사)
1987년: University of Michigan (공학
박사)
1987년~현재: 한양대학교 융합전
자공학부 교수

[주 관심분야] 차세대 이동통신 시스템, 확산대역통신, MI-
MO-OFDM, Relay Communications

현 광 민

1989년 2월: 한양대학교 전자통신
공학과 (공학사)
1995년 2월: 한양대학교 전자통신
공학과 (공학석사)
2004년 8월: 한양대학교 전자통신
전파공학과 (공학박사)
1989년~1994년: (주)대우통신

1995년~1996년: (사)고등기술연구원

1997년~2001년: (주)케이엠더블유

2005년~현재: 국립강릉원주대학교 정보통신공학과 교수

[주 관심분야] 디지털통신, 이동통신, 통신신호처리