

# 중저속 이동체환경에서의 MIMO시스템 기반 안테나 선택과 전력할당 성능분석

## Performance Analysis for MIMO Multiuser Systems considering Selection of Transmit Antennas, Constellations and Powers in Low-to-medium Mobile Speed

유현\* 김진수\* 김종기\*\* 서명석\*\*\* 박경섭\*\*\*  
Yoo, Hyun Kim, Jin-Su Kim, Jong-Ki Seo, Myoung-Seok Kwak, Kyung-Sup

---

### ABSTRACT

In this paper, using received channel information, we analyze performance in MIMO multiuser system in low-to-medium mobile speed by selecting each user's constellations, powers, and transmit antennas. Given a target probability of symbol error, we determine each user's constellations, powers, selected transmit antennas such that the required signal-to-noise(SNR) is minimized for MMSE, V-BLAST receiver according to each user's information and channel estimation information. When we do power control with antenna selection technique through uplink channels of MIMO system in low-to-medium mobile speed, we analyze system performance with wireless channel information from Base-Station(BS) to Users. By simulation, it has been shown that the proposed antenna selection scheme for transmitting data offer better performance improvement than all transmit antennas for transmitting data.

---

### 요약

본 논문은 수신된 채널 정보를 이용하여 각 사용자의 성상도와 전력, 송신 안테나를 선택함으로써 중저속 이동체를 위한 환경에서의 MIMO 다중 사용자 시스템에서 성능을 분석한다. 각 사용자의 성상도와 전력, 선택되는 송신 안테나는 주어진 목표 심볼 에러 확률에서 각 사용자의 정보량과 채널의 추정 정보에 따라 MMSE, V-Blast 수신기에서 요구되는 SNR이 최소화 되도록 결정한다. 또한 중저속 이동체 환경에서의 MIMO 시스템의 상향링크 채널을 통해 기지국으로부터 유저들에게 전송하는 무선 채널 정보를 안테나 선택기법으로 전력제어를 할 때 시스템 성능을 분석한다. 모의 실험을 통해, 송신 안테나를 모두 사용하여 데이터를 전송하는 것보다 선택 알고리즘을

---

\* 인하대학교 정보통신대학원 석사과정, 비회원

\*\* 철도기술연구원, 정회원

\*\*\* 인하대학교 정보통신공학과 박사과정, 비회원

\*\*\*\* 인하대학교 정보통신대학원 정교수, 비회원

사용하여 데이터를 전송하는 것이 독립 채널 뿐만 아니라 상단 채널에서도 상당한 성능 개선이 있음을 확인할 수 있었다.

**Key Words** : 다중안테나 시스템, Personal Rapid Transit, V-BLAST, 채널 정보 귀환 시스템

## 1. 서론

차세대 이동통신 시스템은 지상 통신망과 위성 통신망이 통합된 고속 멀티미디어 서비스를 제공하는 것을 목표로 하고 있다. 이러한 고품질, 고속의 데이터를 지원하기 위해 보다 진보된 형태의 통신 방법이 필요하게 되었다. 고속의 데이터 전송을 요하는 차세대 이동통신 시스템에서는 현재의 시스템들이 제공하는 것보다 현저하게 높은 채널용량(channel capacity)을 필요로 하게 한다.

이를 가능하게 하는 한 가지 방법은 채널환경에서 사용자 터미널(User Terminal)에 다중 수신 안테나(Multiple receive antenna)를 사용하여 간섭(interference)을 제거할 수 있게 함으로써 전체효율적인 데이터를 전송하는 것이다. 그러나, 이 방법은 전송 파형(Transmitted waveform)의 스펙트럼 효율이 제한되므로 새로운 용량 한계에 도달한다. 이를 극복할 수 있는 방법은 송신단 또한 다중 안테나를 사용하는 것이다. 결과적으로 이 시스템은 중저속 전송 변복조 방식을 PRT의 고속 전송 최적 변복조 방식 시뮬레이션 환경을 구축을 목표로 하여, 송수신단이 비교적 모두 다중 안테나를 갖는 MIMO(Multiple Input Multiple Output) 시스템이 된다. 현재 시스템은 크게 송신단에서 채널정보를 모르는 경우는 채널 용량에 도달하고자 하는 연구가 진행되고 있고, 송신단에서 채널 정보를 아는 경우는 채널 용량에 도달하고자 하는 연구가 진행되고 있다. 본 논문은 이 두 가지 측면에서 채널 용량을 분석하고, 이 채널 용량에 접근하고자 한 시스템들을 제시할 것이다.

## 2. 시스템 모델

다중접속 MIMO 시스템은  $n=1, \dots, N$ 에 대하여  $N$ 명의 사용자를 가진 PRT(Personal Rapid Transit) 환경에서의 MIMO 다중접속 채널을 가정한다. 사용자  $n$ 은  $K_n$ 개의 안테나와  $P_n$ 의 전력을 가지며, 기지국은  $K_R$ 개의 안테나를 갖는다. 이 경우 수신 안테나에서 다중 사용자의 데이터를 구별하기 위해서 필요한 안테나의 수는  $K_R \geq \sum_{n=1}^N K_n$ 이다.

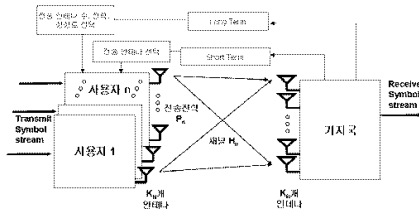


그림 1. 중저속 이동환경에서의 채널정보

그림 1은 다중접속 MIMO 시스템을 나타내며 Long-Term 귀환은 중저속 이동환경에서의 MIMO 채널에서 사용자의 수가 변할 때마다 각 사용자의 성상도와 전력, 안테나의 수를 계산하여 그 정보를 담고 있으며, Short-Term 귀환은 수신된 채널 정보를 계산하여 얻은 최적화된 안테나 선택 정보를 담고 있다. 사용자  $n$ 에 대한 안테나 선택의 결과인  $M_n$ 은 전송을 위해서 사용되는 안테나의 수를 나타내며,

각각의 안테나 전력은 선택된 안테나의 수에 따라  $P_n/M_n$ 의 전력을 갖는다.  $x_n = \sqrt{P_n/M_n} s_n$ 은 사용자  $n$ 에 의한 전송되는 벡터이고,  $s_{n,i}$ 는 단위 에너지를 갖는 성상도로부터 선택된 심벌이다.  $H_n$ 은 안테나 선택 후에 사용자  $n$ 에서 기지국 수신기까지의  $K_R \times M_n$  MIMO 채널 행렬이라고 할 때,  $y = [y_1 \dots y_{K_R}]^T$ 는 수신 신호 벡터를 나타낸다. 전력 할당 행렬을  $D$ 라고 할 때,  $D$ 는 다음과 같이 정의한다.

$$D = \begin{bmatrix} \sqrt{P_1/M_1} I_{M_1} & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & \sqrt{P_N/M_N} I_{M_N} \end{bmatrix} \quad (1)$$

중저속 이동환경에서의 MIMO 다중점속 채널 시스템 수신신호 모델은 아래와 같다.

$$y = HDs + w \quad (2)$$

여기서  $H = [H_1 \dots H_N]$ 은 채널,  $s = [s_1^T \dots s_N^T]^T$ 는 심벌이며,  $w$ 는  $N_0 I_{K_R}$ 을 가진 AWGN(a complex additive white Gaussian noise) 벡터를 나타낸다. 모든 사용자에게 대해서, 선택된 안테나의 송신 안테나수의 총합은  $M_{\text{tot}} = \sum_{n=1}^N M_n$ 이며,  $H$ 행렬  $K_R \times M_{\text{tot}}$ 의 모델은 다음과 같다

$$H = R_R^{1/2} H_w R_T^{1/2} \quad (3)$$

$$R_T = \begin{bmatrix} R_{T,1} & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & R_{T,N} \end{bmatrix}, \quad R_R = \sum_{n=1}^N \left( \frac{P_n}{P_{\text{tot}}} \right) R_{R,n} \quad (4)$$

여기서  $M_n \times M_n$ 행렬인  $R_T$ 는 송신단 안테나의 상관행렬,  $K_R \times K_R$ 행렬인  $R_R$ 은 수신단 안테나의 상관행렬을 나타내고, 이 상관행렬은 출발각, 도착각, angle spread 등 사용자  $n$ 의 송신안테나와 기지국의 수신안테나 사이 기하학적인 위치에 따라 결정된다.  $H_w$ 는 i. i. d 평균이 0이며, 유닛 분산을 가진 복소 가우시안 랜덤 변수이고,  $P_{\text{tot}} = \sum_{n=1}^N P_n$ 이다. 기지국은 수신된 채널 정보를 이용하여 각 사용자의 성상도와 전력, 안테나의 수를 계산하여 낮은 전송량을 가진 귀환 채널을 이용하여 송신기로 전달한다. 선형 수신기는  $\hat{s} = G y$ 를 이용하여 전송 심벌  $s$ 를 추정한다. 여기서  $G$ 는  $M_{\text{tot}} \times K_R$ 수신기행렬이다. ZF 수신기는  $G = D^{-1}(H^* H)^{-1} H^*$ 로 표현되며, 잡음 지수를 고려한 선형 MMSE 수신기는  $G = D^{-1}(H^* H + N_0 D^{-2})^{-1} H^*$ 가 된다. 선형 V-BLAST 수신기는 연속 간섭 제거 OSIC(Ordered Successive Interference Cancellation)를 사용하여 높은 다이버시티 이득을 얻을 수 있다.

### III. 성상도와 전력, 송신 안테나 수의 선택방법

선택 알고리즘은 주어진 목표 심벌 에러 확률에서 각 사용자의 성상도와 전력, 선택되는 송신 안테나의 수를 수신기에서 요구되는 평균 SNR이 최소화 되도록 결정한다. 논문[1]와 논문[2]에서 사용된 식을 Chernoff bound 사용하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$P_{r_{e,n}} \leq \frac{N_{e,n}}{M_n} \sum_{l=1}^{M_n} E \left[ \exp \left( - \frac{c_n \text{SNR}_{n,l}}{2(2^{b_{T,n,l}/M_n} - 1)} \right) \right] \leq N_{e,n} E \left[ \exp \left( - \frac{c_n \text{SNR}_{n,\min}}{2(2^{b_{T,n}/M_n} - 1)} \right) \right] \quad (5)$$

여기서  $n$ 은  $n$ 번째 사용자를,  $l$ 은  $l$ -번째 안테나를 나타내며,  $\text{SNR}_{n,\min} = \min_l \text{SNR}_{n,l}$ 이고  $\text{SNR}_{n,\min}$ 은 에러확률을 만족하기 위한 최소 SNR lower bound를 나타낸다.  $b_{T,n}$ 은 사용자  $n$ 의 정보량을 나타낸다. 상수  $c_n$ 과  $N_{e,n}$ 은 사용자  $n$ 의 성상도와 관계되며 다음과 같이 표현된다.

$$N_{e,n} = \begin{cases} 4(1 - 2^{-b_{T,n}/(2M_n)}) & \text{square QAM} \\ 2 & \text{8-PSK} \end{cases}, \quad c_n = \begin{cases} 3 & \text{square QAM} \\ 2 \sin^2 \frac{\pi}{8} & \text{8-PSK} \end{cases} \quad (6)$$

식(5)를 논문[2]에서 나와 있는 감마확률분포에 대입하면 다음 식을 얻는다.

$$\Pr_{e,n} \leq \frac{N_{e,n}}{(1 + \beta_n \rho_n)^{K_n - M_n + 1}} \quad (7)$$

$$\beta_n = \frac{c_n \lambda_{\min}(R_T) \lambda_{\min}(R_R)}{2M_n M_{\text{tot}} (2^{b_{T,n}/M_n} - 1)} \quad (8)$$

여기서  $\rho_n = \frac{P_n}{N_0}$ 는 사용자 n의 전송 SNR이고,  $\lambda_{\min}$ 은 행렬의 최소 고유값을 나타낸다. 목표 에러 확률  $P_{e,\text{target}}$ 을 이용하여 각 사용자의 SNR인  $\rho_n$ 을 구할 수 있다.

$$\rho_{n,\text{target}} = \frac{1}{\beta_n} \left[ \left( \frac{N_{e,n}}{\Pr_{e,\text{target}}} \right)^{\frac{1}{K_n - M_n + 1}} - 1 \right] \quad (9)$$

$SNR = P_{\text{tot}}/N_0$ 에 의해서 수신기에서 요구되는 SNR은  $SNR_{\text{required}} = \sum_{n=1}^N \rho_{n,\text{target}}$ 로 표현되며 사용자 n

의 할당되는 송신 전력은  $P_n = \left( \frac{\rho_{n,\text{target}}}{SNR_{\text{required}}} \right) P_{\text{tot}}$ 이다. 이 알고리즘의 최적의 선택방법은  $SNR_{\text{required}}$ 가 최소가 되는 송신전력과 성상도를 선택하는 것이다. 일단  $M_n$ 과  $P_n$ 의 최적값을 얻었을 때, n번째 사용자를 위한 성상도의 변조 지수는  $(b_{T,n}/M_n)$ 이다. 논문 [3]를 참조하면, 관련된 채널을 알 수 있는 다음과 같은 식이 나온다.

$$d_x^T(p, q) = 0, E[H_{m,p} H_{n,p}^*] \approx J_0 \left\{ \Delta \frac{2\pi}{\lambda} d_y^T(p, q) \right\} \quad (10)$$

$d^T(p, q)$ 는 전송안테나  $TA_p$ 와  $TA_q$  사이의 거리차이다.  $d_x^T(p, q)$ 와  $d_y^T(p, q)$ 는 각각  $d^T(p, q)$ 의 x축과 y축의 투영도들이다. 식(10)의 오른쪽 식들은 두 안테나 사이간에 거리를 나타낸 것이며  $\lambda$ 는 파장을 의미한다.

#### IV. 시뮬레이션 결과

표1. 모의실험에 사용된 파라미터

Parameter	User 1	User 2
Total Antenna	4	4
Active Antenna	3 (I.I.D) 2 (Correlation)	2 (I.I.D) 1 (Correlation)
Constellation	16-QAM	16-QAM
Power Allocation	0.6 (I.I.D) 0.33 (Correlation)	0.4 (I.I.D) 0.67 (Correlation)
Target Probability	$10^{-3}$	$10^{-3}$
Spectrum Efficiency	12 bps/Hz	8 bps/Hz
Angle Spread	30°(Correlation)	20°(Correlation)
Receiver Antenna	8	8

다중 접속채널에서 선택기법 알고리즘의 성능을 검증하기 위하여 모의실험을 수행하였다. 실험에서

사용된 파라미터는 표 1에 요약 제시하였다. 그림 2와 그림 3은 각각 I.I.D 채널에서 사용자 1과 사용자 2의 수신안테나 당 평균 SNR과 BER을 나타내는 그림이다. 다음 장의 그림에서는 모든 안테나를 다 사용했을 때와 최적의 안테나를 선택하여서 사용하는 방법 이 두 가지를 보여준다. 그림 2를 보면, I. I. D채널에서 사용자 1에 대한 BER성능을 보여준다. 중저속 이동환경에서 채널 정보를 파악할 때(Short-Term)와 파악을 하지 않을 때(Long-Term)의 성능 차이가 심하게 나는 것을 볼 수 있다. 이 결과에서 보면, MMSE V-BLAST가 Linear MMSE기법보다 성능이 더 좋은 반면에 MMSE V-BLAST는 그만큼 복잡도가 커지게 된다. 채널정보를 파악하지 않는 Long-Term의 경우에는 MMSE V-BLAST가 MMSE보다 대략 3dB 성능이 좋아지지만, 복잡도가 높은 V-BLAST를 쓰는 것보다는 MMSE를 쓰는 것이 복잡도를 줄이는 면에서 더 좋다는 것을 알 수 있다. 또한 여기서 모든 안테나를 사용했을 때보다 필요로 하는 활동적인 안테나를 썼을 때에 SNR도 성능이 더 우수한 것을 볼 수 있다.

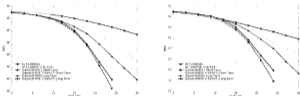


그림 2. I. I. D 채널에서의 사용자 1에 대한 BER성능 (왼쪽)과 사용자 2에 대한 BER성능 (오른쪽)

그림 2를 보면 모든 안테나를 사용했을 때에는 MMSE와 MMSE V-BLAST기법 모두 거의 유사한 성능이 나옴을 확인할 수 있다. MMSE V-BLAST인 경우에 BER이  $10^{-5}$ 의 비트 오류율에 도달하기 위해서 채널 정보를 파악한 것을 경우가 채널정보를 파악한 하지 않았을 경우보다 3dB 더 우수한 것을 볼 수 있다. 반면에 MMSE일 경우에는 채널정보를 파악한 경우가 채널정보를 파악한 하지 않았을 경우보다 7dB 더 우수한 것을 볼 수 있다. 그러므로 채널정보를 모를 때 V-BLAST를 써주면 V-BLAST를 쓰지 않았을 때보다 4dB정도 더 우수한 성능 이득을 얻을 수 있게 되는 것이다.

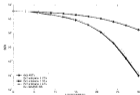


그림 3. 상관 채널에서의 사용자 1에 대한 안테나 선택 기법

그림 3에서 보면 상관된 채널에서의 수신단의 안테나 개수가 2개이고, 송신단의 안테나 개수가 1개일 경우에, 수신단에서 보내고자 하는 안테나간의 간격이 클수록 성능이 좋아진다는 것을 볼 수 있다.

안테나 1번과 2번을 썼을 때보다 안테나 1번과 4번을 썼을 때, 성능이 10dB정도 좋아지는 것을 볼 수 있으며, 안테나 1,3과 1,4를 썼을 경우에는 유사한 성능이 나옴을 볼 수 있다.

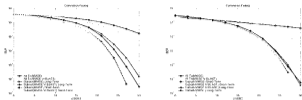


그림 4. 상관 채널에서의 사용자1에 대한 BER성능(왼쪽)과 사용자2에 대한 BER성능(오른쪽)

그림 4는 상관채널에서 안테나 선택기법을 이용하여 사용자 1의 경우와 사용자 2의 경우의 시스템 BER성능을 비교한 그래프이다. 상관된 채널에서 두 그림을 비교하면, Ant Tx에 대해서는 거의 같은 성능이 나오며, 채널정보를 도막일 하는 경우나 채널 정보를 도막일 하지 않는 경우엔 MMSE를 사용했거나 V-BLAST를 사용해도 거의 유사한 성능이 나옴을 알 수 있다. 안테나 선택기법을 사용한 경우엔 V-BLAST 수신기의 사용했을 경우, 10<sup>-4</sup>의 비트 오류율에 도달하기 위해 도막일이 있는 시스템에 도막일이 없는 시스템보다 3~4dB의 SNR이 요구된다.

## 5. 결론

본 논문은 상관된 MIMO 다중 접속 채널환경에서 각 사용자의 성장도와 전력, 송신 안테나를 선택하는 방법을 제안한다. 각 사용자의 성장도와 전력, 선택되는 안테나는 주어진 목표 심볼 에러 확률에서 각 사용자의 정보량과 채널의 추정 정보에 따라, MMSE와 V-Blast 수신기에서 요구되는 SNR이 최소화 되도록 결정한다. 낮은 전송량을 가진 도막일 채널은 사용자들에게 선택된 정보를 결과를 전송하는데 충분하다. 목적의 채널 정보를 요구하지 않을 뿐만 아니라 이 알고리즘의 중요한 이점은 특정 사용자에 대하여 간단한 선택 알고리즘에 따라 동일한 성장도와 전력을 할당함으로써 도막일 정보량을 줄였다. 본 논문에서 채널 코딩을 고려하지 않았으므로 채널 코딩이 더 높은 BER 개선이 가능하다. MIMO 다중 접속 채널에서 선택 알고리즘을 사용하는 것이 송신 안테나를 모두 사용하여 데이터를 전송하는 것보다 이 제안한 선택 알고리즘을 사용하여 데이터를 전송하는 것이 독립 피딩 채널뿐만 아니라 상관 채널에서도 3dB 성능 개선이 있음을 확인 할 수 있었다

## 참고문헌

1. J. M. Cioffi, Course Notes, EE 379, Stanford University, 2002
2. Ravi Narasimhan, "Selection of Transmit Antennas, Constellations, and Powers for Correlated MIMO Multiple Access Channels," *IEEE Communications Society*, pp. 625-629, 2004
3. De-Shan Shiu, Gerard J. Foschini, Michael J. Gans, Joseph M. Kahn, "Fading Correlation and Its Effect on the Capacity of Multielement Antenna Systems," *IEEE Transactions on communications*, vol. 48, no. 3, Mar. 2000
4. R. Narasimhan, "Spatial multiplexing with transmit antenna and constellation selection for correlated MIMO fading channels," *IEEE Trans. Signal Proc., Special Issue on MIMO Wireless Communications*, vol. 51, no. 11, pp. 2829-2839, Nov. 2003.