BD 빔포밍을 이용한 다중 사용자 기반 거대 안테나 통신 시스템용 안테나 선택 기법

반태원 , 정방철, 박연식[1)]

경상대학교

Antenna Selection Scheme for BD Beamforming-based Multiuser Massive MIMO Communication Systems

Tae-Won Ban, Bang Chul Jung, Yeon-Sik Park

Gyeongsang National University

E-mail : {twban,bcjung,parkys}@gnu.ac.kr

요 약

많은 수의 안테나를 활용하는 Massive MIMO 통신 기술은 부족한 주파수 자원의 효율성을 높이기 위한 핵심 기술들 중의 하나로 많은 관심을 끌고 있다. 기존에는 이동통신 시스템의 하향링크에서 단일 사용자 기반의 Massive MIMO 기술에 대하여 많은 연구가 이루어 졌으나, 최근에는 단말 안테나 수의 제한으로 인해 다중 사용자 기반 Massive MIMO에 대한 활발한 연구가 이루어진다. 이렇게 많은 송신 안테나를 사용하는 Massive MIMO 기술은 기지국의 기저대역 (Baseband)과 Radio Frequency와 같은 전송단의 하드웨어 복잡도와 빔포밍 벡터 계산량이 급격히 증가시키는 문제를 야기한다. 이러한 문제점은 기지국에서 전송단의 개수를 송신 안테나 수보다 작게 제한하고, 전체 송신 안테나들 중에서 채널 상태를 고려하여 전송단의 개수에 해당하는 안테나만을 선택하여 데이터를 전송함으로써 큰 성능 저하 없이 해결될 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 다중 사용자 기반의 Massive MIMO 시스템에 적용할 수 있는 간단하고 효율적인 안테나 선택 기법을 제안한다. 성능 분석 결과에 따르면, 제안된 방식은 안테나 선택 기법 없이 동일한 수의 안테나를 고정적으로 사용하는 기존 시스템 대비 큰 폭의 성능 개선 효과를 나타내었다.

ABSTRACT

Massive MIMO communication system with huge antennas has been attracting intensive attention as one of key technologies to increase the spectral efficiency. Many previous studies investigated single user Massive MIMO scheme in cellular downlink. Recently, however, intensive researches on multiuser-based Massive MIMO are performed to overcome the problem caused by the limited number of antennas in mobile stations. Although the Massive MIMO scheme based on huge number of antennas inevitably causes hardware and computational complexity in baseband and radio frequency (RF) elements, the problem can be mitigated without serious performance degradation by limiting the number of baseband and RF elements below the number of transmit antennas of base station and opportunistically selecting transmit antennas according to channel states, where the number of selected antennas corresponds to the number of baseband and RF elements in base station. Accordingly, this paper proposes a simple antenna selection scheme for multiuser-based Massive MIMO systems. Our simulation results indicate that the proposed antenna selection scheme can achieve comparable performance to the conventional scheme without antenna selection.

키워드

다중안테나, 다중사용자 다중안테나, 거대 안테나, 안테나 선택

Ⅰ. 서 론

최근 스마트폰의 등장으로 인해 모바일 패킷 데이터 트래픽이 급격히 증가하고 있으므로, 차세대 이동통신 네트워크에서는 무선 네트워크 용량의 획기적인 개선이 필요하다. Massive MIMO는 기지국에서 거대한 수 (N)의 안테나를 이용하여 K ($K \ll N$)개의 단말과 데이터를 주고받을 수

1)교신저자

있으며, 무선 네트워크 용량을 획기적으로 개선시킬 수 있는 가장 유망한 기술들 중 하나로 평가받고 있다 [1, 2]. 그러나, 거대한 수의 안테나와 동일한 baseband와 radio frequency (RF) 전송단이 필요하므로 하드웨어의 복잡도가 기하급수적으로 증가하고, 안테나 수가 증가할수록 기지국에서 프리코딩 벡터 값을 계산하기 위한 계산량 또한 급격히 증가한다. 이러한, 문제점들은 하드웨어 복잡도와 계산량을 고려하여 적절한 기저대역과 RF 단의 수 $S(S \le N)$를 결정하고, 각 안테나와 단말들간의 채널 상태를 고려하여 N 개의 전체 안테나 중에서 S 개의 최적 안테나를 선택함으로써 완화될 수 있다 [1, 3~9]. 그러나, 최적의 안테나 조합을 선택하는 문제는 $\binom{N}{S}$ 정도의 복잡도를 가지므로 보다 단순한 안테나 선택 알고리즘이 필요하다. 따라서, 본 논문에서는 다중 사용자 기반 Massive MIMO 환경에서 기지국의 복잡도를 획기적으로 줄이면서 단순한 안테나 선택 알고리즘을 제안한다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. Ⅱ장에서 Massive MIMO의 시스템 모델에 대해서 살펴보고, Ⅲ장에서 안테나 선택 알고리즘을 제안한다. Ⅳ장에서는 모의실험을 통해서 기존의 방식과 제안한 방식의 성능을 비교 및 분석하고, 마지막으로 Ⅴ장에서 결론을 맺는다.

Ⅱ. 시스템 및 채널 모델

그림 1은 다중 사용자 기반 Massive MIMO 통신 시스템을 나타낸다. 기지국은 N 개의 전송 안테나를 가지고 있으며, 단일 수신 안테나를 가진 K 개의 단말과 동시에 데이터를 주고받을 수 있다.

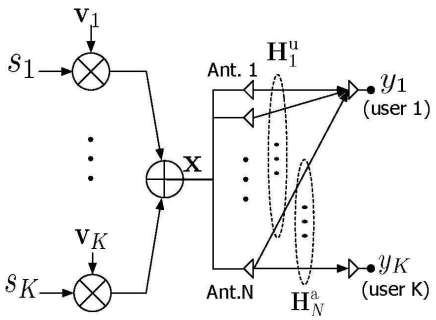

그림 1. 다중 사용자 기반 Massive MIMO 통신 시스템

s_k는 기지국이 $k(1 \le k \le K)$번째 단말에게 전송하는 신호를 나타내며 $N \times 1$ 크기의 빔포밍 벡터 $\mathbf{v_k}$와 곱해진다. s_k와 $\mathbf{v_k}$는 다음 조건을 만족하여야 한다.

$$E\left[|s_k|^2\right] = \frac{P}{K} \ , \ \| \mathbf{v_k} \|^2 = 1 \qquad (1)$$

여기서, P는 기지국 전체 전송 전력을 나타낸다. K개의 단말에게 전송되는 신호의 합 $\mathbf{x}$는 $\mathbf{x} = \sum_{k=1}^{K} \mathbf{v_k} s_k$ 로 주어진다. 그림 2는 그림 1의 시스템에 대한 채널 모델을 나타낸다. 기지국의 $j(1 \le j \le N)$번째 송신 안테나와 $i(1 \le i \le K)$번째 단말 사이의 채널 정보를 나타내는 h_{ij}는 $CN(0,1)$의 분포를 따르고 independent and identically distributed (i.i.d.)라고 가정한다. $\mathbf{H}_i^u$는 N개의 송신 안테나와 i번째 단말간의 채널 정보를 나타내는 행 벡터이며, $\mathbf{H}_j^a$는 기지국의 j번째 송신 안테나와 K개의 단말 간 채널 정보를 나타내는 열 벡터이다.

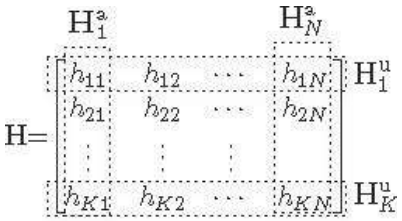

그림 2. 채널 모델

그림 1의 시스템 모델과 그림 2의 채널 모델을 바탕으로 i번째 단말의 수신 신호 y_i는 다음과 같이 표현된다.

$$y_i = \mathbf{H}_i^u \mathbf{x} + n_i \qquad (2)$$

n_i는 Additive White Gaussian Noise (AWGN)을 나타내며 $CN(0,1)$의 분포를 따른다. 이때, i 번째 단말의 수신 SINR은 다음과 같이 주어진다.

$$SINR_i = \frac{P \| \mathbf{H}_i^u \mathbf{v}_i \|^2}{K\left(1 + \sum_{k=1, k \ne i}^{K} \frac{P}{K} \| \mathbf{H}_k^u \mathbf{v}_k \|^2\right)} \qquad (3)$$

$$= \frac{P \| \mathbf{H}_i^u \mathbf{v}_i \|^2}{K + P \sum_{k=1, k \ne i}^{K} \| \mathbf{H}_k^u \mathbf{v}_k \|^2}$$

Ⅲ. Sliding Window 기반 안테나 선택 기법

본 장에서는 전체 N개의 송신 안테나 중에서 $S(K \le S \le N)$개의 안테나만을 선택하여 실제 데이터 전송에 사용하는 Sliding Window (SW)-W 안테나 선택 기법을 제안한다. 제안 방식에서는 그림 3에서와 같이 각각의 송신 안테나에 대하여 K개 단말로의 채널 이득의 합 $\| \mathbf{H}_j^a \|^2 (1 \le j \le N)$ 를 계산하여 내림차순으로

그림 3. 슬라이딩 윈도우 기반 안테나 선택 기법

정렬한다. 내림차순으로 정렬된 안테나의 인덱스를 $\hat{j}$로 새롭게 정의한다. 내림차순으로 정렬된 안테나들 중에서 $\hat{w}$에서 $w+S-1$까지 연속적인 S개의 안테나 집합을 윈도우 w $(1 \le w \le N-S+1)$로 정의한다. 전체 N 개의 전송 안테나 중에서 S개의 안테나를 선택할 경우 $(N-S+1)$개의 윈도우가 존재한다. 이때 윈도우 w에 속하는 S개의 안테나를 통해서 i번째 단말이 수신할 수 있는 $SINR$ 값은 다음과 같이 새롭게 정의된다.

$$SINR_{i,w} = \frac{P \| \mathbf{H}_{i,w}^{u} \mathbf{v}_{i,w} \|^2}{K\left(1 + \sum_{k=1, k \neq i}^{K} \frac{P}{K} \| \mathbf{H}_{k,w}^{u} \mathbf{v}_{k,w} \|^2\right)} \quad (4)$$

$$= \frac{P \| \mathbf{H}_{i,w}^{u} \mathbf{v}_{i,w} \|^2}{K + P \sum_{k=1, k \neq i}^{K} \| \mathbf{H}_{k,w}^{u} \mathbf{v}_{k,w} \|^2}$$

$\mathbf{H}_{i,w}^{u}$와 $\mathbf{H}_{k,w}^{u}$는 윈도우 w에 속하는 S개의 안테나들과 단말 i 또는 k 사이의 채널 벡터를 나타내며, $\mathbf{v}_{i,w}$와 $\mathbf{v}_{k,w}$ 윈도우 w에 속하는 안테나들에 적용되는 단말 i 또는 k를 위한 빔포밍 벡터를 나타낸다. 이때, 윈도우 w에 대해서 K개 단말들에게 동시에 전송할 수 있는 데이터 전송율의 합은 다음과 같이 계산된다.

$$C_w = \sum_{i=1}^{K} \log_2(1 + SINR_{i,w}) \quad (5)$$

본 논문에서 제안하는 Sliding Window (SW)-W 방식은 윈도우 1에서부터 윈도우 $W(\le N-S+1)$까지 각 윈도우에 대한 데이터 전송율의 합을 계산한 다음에 전송율이 가장 높은 윈도우 w^*를 다음과 같이 선택한다.

$$w^* = \arg\max_{1 \le w \le W} C_w \quad (6)$$

마지막으로, 선택된 윈도우 w^*에 속하는 안테나 S개를 이용하여 데이터를 전송하며, 사용자 전송율의 합은 다음과 같이 주어진다.

$$C_{SW-W} = C_{w^*} \quad (5)$$

Ⅳ. 성능 분석

본 장에서는 Monte-Carlo 시뮬레이션을 통하여 제안한 안테나 선택 기법의 성능을 분석하고 안테나 선택 없이 S개의 전송 안테나만을 사용하는 기존 시스템 (Reference)의 성능과 비교한다. 제안된 SW-W 안테나 선택 기법은 빔포밍 방식과 무관하게 적용될 수 있지만, 본 논문에서는 성능 분석을 위하여 Block Diagonalization (BD) 기반 빔포밍 방식을 가정한다 [10]. 그림 4는 $N=100, P$ =0dB, $K=10$일 때 서로 다른 S 값에 대한 평균적인 사용자 전송율의 합을 보여준다. SW-1은 첫 번째 윈도우에 속하는 S개의 안테나만을 선택하는 반면, SW-Full은 전체 $(N-S+1)$ 개의 윈도우에 대하여 사용자 전송율의 합의 가장 높은 윈도우를 선택한다. S값이 커질수록 보다 간단한 SW-1방식만으로도 SW-Full과 동등한 성능을 얻을 수 있다. 그리고 S값에 관계없이 제안 방식의 성능이 기존 방식 대비 우수함을 확인할 수 있다.

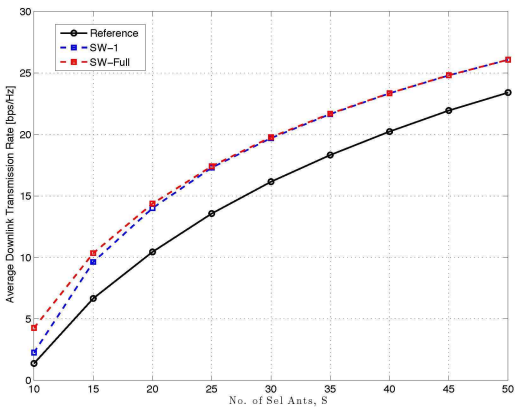

그림 4. S 값에 따른 하향링크 사용자 전송율의 합 $(P=0dB, N=100, K=10)$

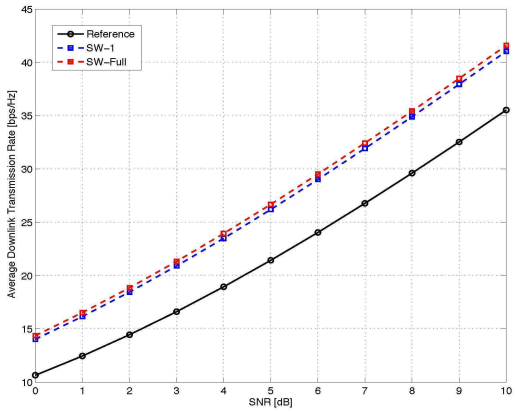

그림 5. P 값에 따른 하향링크 사용자 전송율의 합 $(S=20, N=100, K=10)$

그림 5는 $N=100$, $K=10$, $S=20$일 때 서로 다른 P 값에 대한 평균 사용자 전송율의 합을 보여준다. 그림에서 확인할 수 있듯이 모든 P 값에 대하여 제안된 방식이 기존 방식 대비 우수하며, SW-1의 성능이 SW-Full에 근접함을 알 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 기지국이 많은 수의 전송 안테나를 활용하여 복수의 사용자와 동시에 통신을 하는 다중 사용자 기반 Massive MIMO 시스템에서 기지국의 하드웨어와 계산 복잡도를 낮추기 위한 효율적인 안테나 선택 기법을 제안하였다. 제안한 SW-W 방식에서는 먼저 전체 전송 안테나 N개를 K개의 단말들과의 채널 이득의 합에 따라서 내림차순으로 정렬하고 연속적인 S개의 안테나 집합을 윈도우로 정의한다. 윈도우 1에서부터 출발하여 W개의 윈도우에 대하여 사용자 전송율의 합을 계산하여 전송율이 가장 높은 윈도우를 선택한다. 제안된 SW-W 방식의 성능은 안테나 선택없이 S개의 안테나만을 고정적으로 사용하는 기존 시스템 대비 평균 사용자 전송율 측면에서 상당한 개선 효과를 나타내었다. 그리고, 첫 번째 윈도우에 해당하는 안테나만을 선택하는 SW-1 방식만으로도 모든 윈도우를 탐색하는 SW-Full 방식과 유사한 성능을 얻을 수 있었다. 향후 SW-W 방식과 다른 안테나 선택 기법과의 성능 및 복잡도 비교 연구를 진행할 계획이다.

참고문헌

[1] K. Dong, N. Prasad, X. Wang, and S. Zhu, "Adaptive antenna selection and Tx/Rx beamforming for large-scale MIMO systems in 60 ghz channels," *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, http://jwcn.eurasipjournals.com/content/2011/1/59, 2011

[2] G. Lee, J. Park, Y. Sung, and J. Seo, "A new approach to beamformer design for massive MIMO systems based on k-regularity," *IEEE GLOBECOM*, June 2012

[3] R. W. Heath, S. Sandhu, and A. Paulraj, "Antenna Selection for Spatial Multiplexing Systems with linear receivers," *IEEE Commun. lett.*, Vol. 5, no. 4, pp. 142-144, Apr. 2001.

[4] A. F. Molisch, M. Z. Win, Y. S. Choi, and J. H. Winters, "Capacity of MIMO systems with Antenna Selection," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 4, no. 4, pp. 1759-1772, July 2005.

[5] R. Chen, J. G. Andrews, and R. W. Heath, "Efficient transmit antenna selection for multiuser MIMO systems with block diagonalization," *IEEE GLOBECOM*, pp. 3499 - 3503, Dec. 2007

[6] F. Wang and M. E. Bialkowski, "Fast transmit antenna selection scheme employing block diagonalization for multiuser MIMO system," *Asia-Pacific Microwave Conference*, pp. 2087-2090, Dec. 2010

[7] J. Feng and J. Wang, "A low complexity antenna selection algorithm for multiuser MIMO systems," *International Conference on CECNet*, pp. 4630-4633, Apr. 2011

[8] G. -H. Lin and S.-H. Tsai, "Performance analysis and algorithm designs for transmit antenna selection in linearly precoded multiuser MIMO systems," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 61, no. 4, pp. 1698-1708, May 2012

[9] 이병수, 반태원, 정방철, "Multiuser Massive MIMO 네트워크에서의 안테나 선택 알고리즘," *제23회 정보·통신 합동학술대회*, 2013년 5월.

[10] S. Shim, J. S. Kwak, R. W. Heath, and J. G. Andrews, "Block diagonalization for multi-user MIMO with other-cell interference," *IEEE Trans. Wireless Comm.*, vol. 7, no. 7, pp. 2671-2681, July 2008.