

다중 사용자 및 다중 안테나 하향링크 네트워크에서 적응적 사용자 선택 기법

반태원 · 정방철*

Adaptive User Selection in Downlink Multi-User MIMO Networks

Tae-Won Ban · Bang Chul Jung*

Department of Information and Communication Engineering, Gyeongsang National University, Tongyeong
650-160, Korea

요 약

향후 폭발적인 증가가 예상되는 모바일 데이터 트래픽을 효과적으로 수용하기 위해서 다중 안테나 기술이 차세대 이동통신 시스템의 핵심 기술로 주목을 받고 있다. 특히, 기지국에 수십 개의 안테나를 탑재하여 동시에 복수의 단말에게 데이터를 동시에 전송하는 다중 사용자 기반 다중 안테나 기술에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 본 논문에서는, 이러한 다중 사용자 기반 다중 안테나 통신 시스템에서 시스템의 성능을 향상시키기 위해서 채널 상태에 따라서 적응적으로 데이터를 전송할 단말 조합을 선택할 수 있는 알고리즘을 제안한다. Monte-Carlo 기반 시뮬레이션을 통한 성능 분석 결과 제안 방식은 단말 선택 기법을 적용하지 않는 기존 방식 대비 우수한 성능을 나타내며 Exhaustive Search 기반 최적 방식에 근접하는 성능을 보여준다. 반면에, 시스템 내 단말의 수를 K 라고 할 때 제안 방식은 최적 방식 대비 계산량을 $K/(2^K - 1)$ 로 줄일 수 있다.

ABSTRACT

Multiple antenna technique is attracting attention as a core technology for next-generation mobile communication systems to accommodate explosively increasing mobile data traffic. Especially, recent researches focus on multi-user multiple input multiple output (MU-MIMO) system where base stations are equipped with several tens of transmit antennas and transmit data to multiple terminals (users) simultaneously. To enhance the performance of MU-MIMO systems, we, in this paper, propose an adaptive user selection algorithm which adaptively selects a user set according to varying channel states. According to Monte-Carlo based computer simulations, the performance of proposed scheme is significantly improved compared to the conventional scheme without user selection and approaches that of exhaustive search-based optimal scheme. On the other hand, the proposed scheme can reduce the computational complexity to $K/(2^K - 1)$ compared to the optimal scheme where K denotes the number of total users.

키워드 : 다중 안테나 네트워크, 셀룰라 네트워크, 다중 사용자 스케줄링, 복잡도

Key word : Cellular networks, Complexity, MIMO networks, Multi-user scheduling

접수일자 : 2013. 05. 14 심사완료일자 : 2013. 06. 23 게재확정일자 : 2013. 06. 30

* **Corresponding Author** Bang Chul Jung(E-mail:bcjung@gnu.ac.kr, Tel:+82-55-772-9171)

Department of Information and Communication Engineering, Gyeongsang National University, Tongyeong 650-160, Korea

Open Access <http://dx.doi.org/10.6109/jkiice.2013.17.7.1597>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

©This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

I. 서 론

최근 무선 접속 기기들의 급격한 증가와 대용량 멀티 미디어 서비스의 급속한 성장으로 인해 무선 데이터 트래픽이 폭발적으로 증가하고 있으며, 향후 증가 속도가 더욱 빨라질 것으로 예상된다[1, 2]. 차세대 이동통신 시스템에서 이렇게 급격하게 증가하고 있는 모바일 데이터 트래픽을 효과적으로 수용하기 위해서는 데이터 전송 용량의 획기적인 증대가 필요하며 이를 위해서 스펙트럼의 획기적 확대, 소형 셀을 활용한 이종망 기술, 그리고 다중 안테나 기술 등이 대안 기술로 거론되고 있다 [3, 4]. 특히, 다중 안테나 기술은 제한된 주파수 대역을 활용하여 서로 다른 데이터를 단일 또는 복수의 단말에게 동시에 전송할 수 있으므로 주파수 효율성을 획기적으로 개선할 수 있는 핵심 기술 중의 하나이다. 4세대 이동통신 시스템인 3rd Generation Partnership Project (3GPP) Long Term Evolution (LTE)-Advanced 시스템의 하향 링크에서는 8개 까지의 안테나를 지원한다 [4]. 그러나, 기지국과 달리 사용자 휴대 단말은 단말의 크기, 복잡도 그리고 비용 등 많은 문제점들로 인해서 기지국처럼 많은 수의 안테나를 탑재하는 것이 불가능하다. 따라서, 기지국에 탑재된 많은 수의 안테나를 활용하여 복수의 단말에게 동시에 데이터를 전송할 수 있는 다중 사용자 기반 다중 안테나 (Multi-User Multiple Input Multiple Output: MU-MIMO) 전송 기법이 대안으로 연구되고 있다 [5~7]. 기지국이 N 개의 송신 안테나를 탑재하고 단말들이 R 개의 수신 안테나를 탑재한 MU-MIMO 통신 시스템은 최대 $\lfloor \frac{N}{R} \rfloor$ 개의 단말에게 동시에 데이터를 전송할 수 있다. 여기서 $\lfloor x \rfloor$ 는 x 보다 크지 않은 가장 큰 정수를 나타낸다. 기지국에 탑재된 안테나의 수 N 이 큰 MU-MIMO 시스템의 성능은 단말 조합뿐만 아니라, 동시에 데이터를 전송하는 단말의 개수에 따라서 영향을 받게 된다. 그러나, 동시 전송을 위한 최적 단말의 수와 단말 조합을 찾는 문제는 기하급수적인 높은 계산 복잡도를 유발한다. 따라서, 본 논문에서는 안테나의 개수가 많은 MU-MIMO 통신 시스템에서 선형적인 계산 복잡도를 가지면서 채널 상황에 따라서 적응적으로 동시 전송을 위한 단말의 수와 단말 조합을 선택할 수 있는 기법을 제안하고 기존 방법 및 최적 단말 선택 기법과 성능을 비교한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서 시스템 및 채널 모델에 대하여 설명하고 채널 상황에 따라서 간단하게 단말 조합을 선택할 수 있는 기법을 제안한다. III장에서는 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 제안 방식의 성능을 분석하고 기존 방법 및 최적 단말 선택 기법과 비교한다. 마지막으로, IV장에서 본 논문의 결론을 맺는다.

II. 시스템 모델 및 적응적 단말 선택 기법

2.1. 시스템 및 채널 모델

그림 1은 기지국에 N 개의 전송 안테나 탑재되어 있고, 단말에는 단일 수신 안테나가 탑재된 MU-MIMO 하향 링크 통신 시스템을 나타낸다. s_k 와 \mathbf{v}_k 는 기지국이 $k(1 \leq k \leq K)$ 번째 단말에게 전송하는 신호와 s_k 에 곱해지는 $N \times 1$ 크기의 빔포밍 벡터를 각각 나타내며 다음 조건을 만족한다.

$$E[s_k^2] = \frac{P}{K}, \quad \|\mathbf{v}_k\|^2 = 1 \quad (1)$$

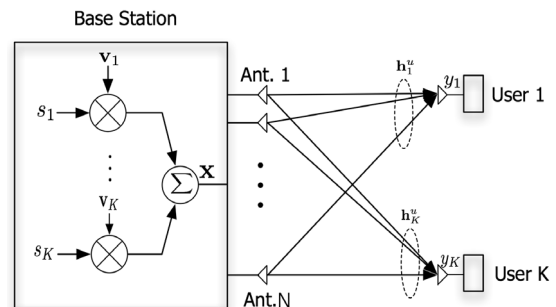


그림 1. 다중 사용자 다중 안테나 통신 시스템
Fig. 1 Multi-user MIMO Communication System

P 는 기지국 전체 전송 전력을 나타내며 본 논문에서는 모든 단말에게 전송 전력을 동일하게 배분하는 것으로 가정한다. K 개의 단말에게 전송되는 신호의 합 $\mathbf{x} = \sum_{k=1}^K \mathbf{v}_k s_k$ 로 주어진다. 기지국의 모든 송신 안테나와 단말 사이의 채널 정보는 평균이 0이고 분산이 1인 complex Gaussian, 즉 $CN(0,1)$ 의 분포를 따르고

independent and identically distributed (i.i.d.)라고 가정한다. \mathbf{h}_i^u 는 N 개의 송신 안테나와 i 번째 단말간의 채널 정보를 나타내는 행 벡터이다. 이때, i 번째 단말의 수신 신호 y_i 는 다음과 같이 표현된다.

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

n_i 는 Additive White Gaussian Noise (AWGN)을 나타내며 역시 $CM(0,1)$ 의 분포를 따른다. 식 (2)에서 i 번째 단말의 수신 SINR은 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$\begin{aligned} SINR_i &= \frac{P \|\mathbf{h}_i^u \mathbf{v}_i\|^2}{K \left(1 + \sum_{k=1, k \neq i}^K \frac{P}{K} \|\mathbf{h}_k^u \mathbf{v}_k\|^2 \right)} \quad (3) \\ &= \frac{P \|\mathbf{h}_i^u \mathbf{v}_i\|^2}{K + P \sum_{k=1, k \neq i}^K \|\mathbf{h}_k^u \mathbf{v}_k\|^2} \end{aligned}$$

그리고, 주어진 SINR에 따른 사용자 전송율의 합은 다음과 같이 주어진다.

$$c_i = \log_2(1 + SINR_i) \quad (4)$$

2.2. 적응적 단말 선택 기법

본 절에서는 채널 상태에 따라서 적응적으로 동시에 데이터를 전송할 사용자 선택 알고리즘을 제안한다. 표 1은 제안하는 사용자 선택 알고리즘의 동작 과정을 나타낸다. 기지국은 N 개의 기지국 송신 안테나와 단말간의 채널 이득의 합을 다음과 같이 내림차순으로 정렬한다.

$$\|\mathbf{h}_1^u\|^2 \geq \|\mathbf{h}_2^u\|^2 \geq \dots \geq \|\mathbf{h}_K^u\|^2 \quad (5)$$

그리고, $\hat{1}$ 에서 \hat{k} 번째까지 k 개의 단말들을 대상으로 프리코딩 벡터, SINR, 그리고 각 단말별 전송율을 계산하여 최종적으로 사용자들의 전송율의 합 $C_k = \sum_{i=1}^k c_i$ 를 계산한다. 기지국은 C_k 의 값이 가장 큰 k^* 값을 찾는다. 이때 데이터를 전송할 사용자 집합은 $\{\hat{1}, \dots, \hat{k}^*\}$ 로 결정된다.

표 1. 제안한 사용자 선택 알고리즘

Table. 1 Proposed User Selection Algorithm

-
- 1) Initially, sort $\|\mathbf{h}_i^u\|^2$ in descending order so that $\|\mathbf{h}_1^u\|^2 \geq \|\mathbf{h}_2^u\|^2 \geq \dots \geq \|\mathbf{h}_K^u\|^2$
 - 2) for $k = 1 : K$
 - a) for $i = 1 : k$
 - i) Find precoder vector \mathbf{v}_i for i -th terminal
 - b) Compute $SINR_i$ for i -th terminal
Compute sum rate of k terminals from $\hat{1}$ to \hat{k} , C_k
$$C_k = \sum_{i=1}^k c_i$$
 - 3) Find $k^* = \arg \max_k C_k$
Algorithm is terminated. selected user set is $\{\hat{1}, \dots, \hat{k}^*\}$
-

III. 성능 분석

본 절에서는 Monte-Carlo 기반 컴퓨터 시뮬레이션을 이용하여 제안 방식의 성능을 평균 사용자 전송율의 합 관점에서 분석하고 사용자 선택 기법을 적용하지 않는 기존 방식과 Exhaustive Search 기반의 최적 알고리즘의 성능과 비교한다. 제안 알고리즘은 빔포밍 방식에 관계없이 적용 가능하지만 본 논문에서는 성능 분석을 위해서 Block-Diagonalization 기반의 빔포밍을 방식을 가정한다[8].

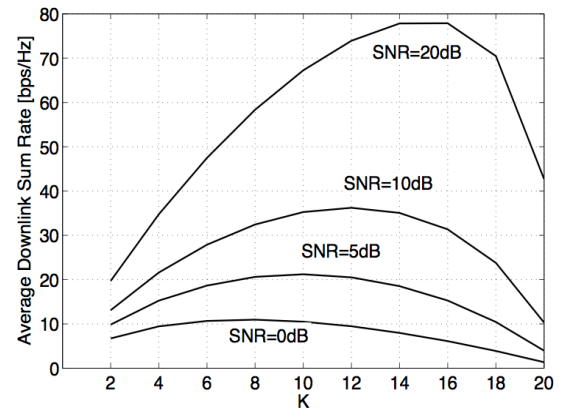


그림 2. 동시 전송자 수에 따른 MU-MIMO 시스템의 평균 사용자 전송율의 합 ($N=20$)
Fig. 2 Downlink Average Sum Rate of MU-MIMO System for different Number of Users ($N=20$)

먼저, 그림 2는 기지국의 송신 안테나가 20개이고, 기지국이 동시에 데이터를 전송하는 단말의 수가 고정되어 있는 기존 방식의 성능을 단말 수와 SNR에 대하여 나타낸다. 그림에서 확인할 수 있듯이 SNR이 낮을 경우에는 동시에 많은 수의 단말에게 데이터를 전송하는 것보다 적은 단말을 선택하여 빔포밍 이득을 높이는 것이 유리함을 알 수 있다. 반면에, SNR이 높을 경우에는 빔 포밍 이득보다는 많은 수의 단말에게 동시에 데이터를 전송하는 것이 최적 성능을 나타낸다.

그림 3은 기지국 송신 안테나가 5개, 단말의 수가 5개일 경우에 단말 선택 기법 없이 항상 모든 단말에게 동시에 데이터를 전송하는 기존 방식, 본 논문에서 제안한 방식, 그리고 Exhaustive Search 기반의 최적 방식의 하향 링크 평균 사용자 전송율의 합을 보여준다. 그림에서 확인할 수 있듯이, 채널 상태에 따라서 적응적으로 동시에 데이터를 전송할 단말을 선택하는 제안 방식의 성능이 기존 방식 대비 훨씬 우수할 뿐만 아니라 이론적 최적 방식의 성능에 근접함을 확인할 수 있다.

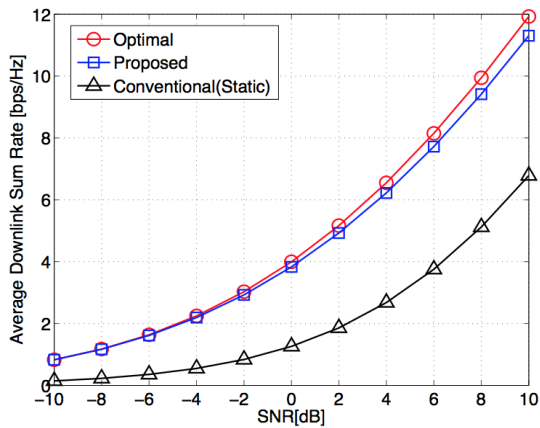


그림 3. 하향 링크 평균 데이터 전송율의 합 ($K=5, N=5$)
Fig. 3 Downlink Average Sum Rate ($K=5, N=5$)

그림 4는 기지국 송신 안테나가 10개, 단말의 수가 10개일 경우에 세 가지 방식의 하향 링크 평균 사용자 전송율의 합을 나타낸다. 그림 3과 동일하게 제안 방식의 성능이 기존 방식 대비 월등히 우수하며, 이론적 최적 알고리즘의 성능에 근접함을 확인할 수 있다.

그림 3과 4에서 확인할 수 있듯이, 제안 방식의 성능

은 단말 선택 기법을 적용하지 않고 항상 모든 단말에게 데이터를 전송하는 기존 방식 대비 성능이 월등히 우수할 뿐만 아니라 이론적 최적 방식의 성능에 거의 근접한다. 반면에, 제안 방식은 이론적 최적 방식 대비 단말 선택 시 알고리즘의 계산량 측면에서 훨씬 간단하다. Exhaustive Search 기반 이론적 최적 방식의 경우 $\sum_{k=1}^K \binom{K}{k} = 2^K - 1$ 에 해당하는 단말 조합에 대한 계산이 필요한 반면, 제안 방식은 K 개의 조합에 대한 계산만으로 동시 전송 단말 조합을 선택할 수 있으므로 계산량을 $K/(2^K - 1)$ 로 줄일 수 있다.

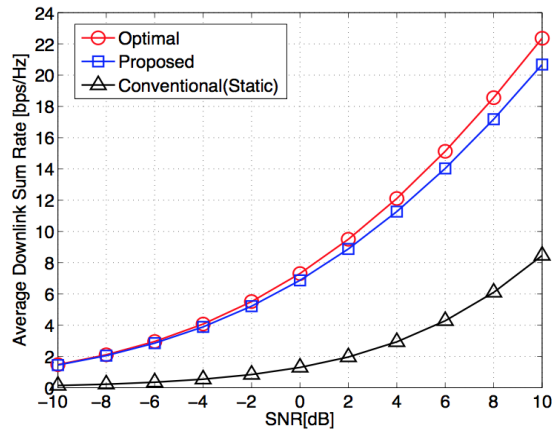


그림 4. 하향 링크 평균 데이터 전송율의 합 ($K=10, N=10$)
Fig. 4 Downlink Average Sum Rate ($K=10, N=10$)

IV. 결론

본 논문에서는 기지국에 탑재된 많은 송신 안테나를 활용하여 동시에 복수의 단말에게 데이터를 동시에 전송하는 MU-MIMO 통신 시스템에서 평균 사용자 전송율의 합을 향상시키기 위해서 채널 상태에 따라서 적응적으로 단말 조합을 선택하는 방식을 제안하였다. 제안 방식의 성능은 단말 선택 없이 모든 단말에게 데이터를 전송하는 기존 방식 대비 우수할 뿐만 아니라, Exhaustive Search 기반 최적 방식의 성능에 근접하였다. 반면에 제안 방식은 이론적 최적 방식 대비 계산량을 $K/(2^K - 1)$ 로 낮출 수 있다.

감사의 글

이 논문은 2013년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(2013R1A1A2A10004905).

REFERENCES

[1] Cisco Visual Networking Index, Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2012-2017, Feb. 2013.

[2] Hyung-Young Yoon, "Spectrum Strategy for 4G," KT Digieco, Jan. 2012 [Online]. Available: http://www.digieco.co.kr/KTFront/report/report_focus_view.action?board_seq=6275&board_id=focusD

[3] Small Cell Forum, <http://smallcellforum.org>

[4] 3GPP TS 36.300 v11.5.0 E-UTRA and E-UTRAN Overall description;Stage 2(Relase 11)

[5] 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, Aug. 2011 [Online]. Available: <http://jwcn.eurasipjournals.com/content/2011/1/59>, 2011

[6] 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, pp. 686-690, Dec. 2012

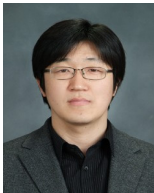
[7] R. W. Heath, S. Sandhu, and A. Paulraj, "Antenna Selection for Spatial Multiplexing Systems with linear receivers," IEEE Commun. Lett., Vol. 5, no. 4, pp. 142-144, Apr. 2001.

[8] 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.



반태원(Tae-Won Ban)

1998년 2월 경북대학교 전자공학과 학사
 2000년 2월 경북대학교 전자공학과 석사
 2010년 2월 KAIST 전기전자공학과 박사
 2000년 2월 ~ 2012년 8월 KT 네트워크부문
 2012년 9월~현재 경상대학교 정보통신공학과 조교수
 ※관심분야 : 이동통신, 자원관리, 간섭관리, 협력 및 중계통신, 인지통신, 주파수 공유, 차세대 이동통신 시스템



정방철(Bang Chul Jung)

2002년 2월 아주대학교 전자공학부 학사
 2004년 8월 KAIST 전자전산학과 석사
 2008년 2월 KAIST 전자전산학과 박사
 2008년 3월~2009년 8월 KAIST IT 융합연구소 팀장
 2009년 9월~2010년 2월 KAIST IT 융합연구소 연구교수
 2010년 3월~현재 경상대학교 정보통신공학과 조교수
 ※관심분야 : 이동통신, 신호처리, 협력 및 중계통신, Cognitive Radios, Compressed Sensing, 차세대 이동통신 시스템