2019년도 한국통신학회 동계종합학술발표회

다중 빔 행렬 선택 기반 하향링크 의사-무작위 빔포밍 시스템용 저복잡도 빔 선택 기법

윤장혁(충남대학교), 김연주(충남대학교), 손 웅(충남대학교), 정방철(충남대학교)

holmes1081@gmail.com, rodls5484@naver.com, woongson@cnu.ac.kr, bcjung@cnu.ac.kr

A Low-Complexity Beam Selection Technique for Downlink Pseudo-Random Beamforming Systems

Janghyuk Yoon(CNU), Yeon-ju Kim(CNU), Woong Son(CNU), and Bang Chul Jung(CNU)

요 약

본 논문은 다중안테나 기지국과 다수의 단일 안테나 사용자 단말들이 존재하는 하향링크 셀룰라 네트워크에서 의사-무작위적으로 생성된 다수의 빔행렬 후보 중 전송률을 극대화하는 빔행렬 및 빔벡터를 선택하는 다중 빔행렬 선택 기반 빔포밍 기법에 적용가능한 사용자-빔 스케쥴링 기법을 제안한다. 다중 빔행렬 선택 기반 빔포밍 기법에서의 스케쥴링에서 기존에 모든 사용자 단말들의 피드백 정보를 이용하는 최적 선택 기법과 본 논문에서 제안한 탐욕적 (greedy) 및 강화 탐욕적 (enhanced greedy) 선택 기법의 달성가능한 합계 전송률 (achievable sum-rate)을 컴퓨터 모의 실험으로 비교분석하였고, 스케쥴링시 계산 복잡도가 낮아짐과 동시에 합계 전송률이 거의 유지됨을 확인하였다.

Ⅰ. 서 론

최근 무선 통신 네트워크에서의 채널 용량을 증가시키기 위해서 기지국이 다수의 사용자 단말들로 동시에 여러 개의 데이터를 전송할 경우에 발생하는 다중 데이터 신호 간의 간섭을 제어하기 위한 다중안테나 기반의 빔포밍 기술이 각광을 받고 있다 [1]. 데이터 신호를 전송하기 전에 기지국이 파일럿 신호를 방송한 후, 이를 수신한 각 사용자 단말들로부터의 채널 정보를 피드백받아 각 빔벡터별로 전송률을 극대화할 수 있는 사용자를 할당하는 사용자-빔 스케쥴링 과정이 필요하다. 사용자-빔 스케쥴링 과정에서 기지국의 안테나 수와 단말들이 증가할수록 기지국에서의 계산의 복잡도가 매우 크게 증가하게 되는데, 이를 해결하기 위한 연구들 중 기존에 제안된 탐욕적 선택 기술 [2]은 기지국에서 사용하는 빔행렬을 사용할 때, 빔행렬을 구성하는 다수의 직교성을 갖는 빔벡터들 중 사용할 빔벡터를 1개부터 최대로 기지국의 안테나 수만큼 증가시키면서 합계 전송률을 극대화할 수 있는 사용자-빔 조합을 선택하는 기법이다. 한편, 다중셀 하향링크에서 다수의 의사-무작위 빔행렬 후보들 중 전체 셀의 합계 전송률을 극대화하는 빔행렬을 선택하여 전송하는 기법이 기존에 제안되었다 [3]. 그러나 빔행렬 후보 수 및 사용자 단말의 수가 증가함에 따라 기지국의 계산 복잡도가 급격하게 증가하는 문제가 발생한다. 따라서 본 논문에서는 하향링크 셀룰라 네트워크에서 다중 빔행렬 선택 기법과 탐욕적, 강화 탐욕적 선택 기법을 결합한 방법하여 기지국에서의 스케쥴링시 계산 복잡도를 효과적으로 줄이면서 합계 전송률 성능을 유지할 수 있는 방법을 제안한다.

Ⅱ. 시스템 모델

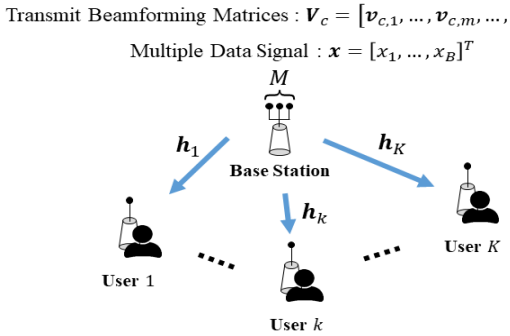

그림 1. 하향링크 셀룰라 네트워크의 시스템 모델

그림 1은 본 논문에서 고려하는 M개의 안테나를 장착한 기지국과 K개의 단일안테나 사용자 단말들이 이루는 하향링크 셀룰라 네트워크를 나타낸다. 기지국은 사전에 C개의 빔 행렬 $\boldsymbol{V}_1, \boldsymbol{V}_2, \dots, \boldsymbol{V}_C$를 의사-무작위적으로 생성하고, 하향링크 사용자 단말들과 빔 정보들을 공유한다. c번째 빔행렬은 $\boldsymbol{V}_c = [\boldsymbol{v}_{c1}, \boldsymbol{v}_{c2}, \dots, \boldsymbol{v}_{cm}, \dots, \boldsymbol{v}_{cM}] \in \mathbb{C}^{M\times M}$, c번째 빔행렬을 구성하는 m번째 빔벡터는 $\boldsymbol{v}_{cm} \in \mathbb{C}^{M\times 1}$의 크기를 갖는다. 이때, 빔행렬의 참조번호는 $c \in \{1,2,\dots,C\}$, 빔벡터의 참조번호는 $m \in \{1,2,\dots,M\}$이다. 또한 기지국으로부터 k번째 사용자 단말까지의 무선 채널 벡터는 $\boldsymbol{h}_k = [h_{1,k}\ h_{2,k} \dots h_{Mk}]^T \in \mathbb{C}^{M\times 1}$의 크기를 가지며, 각 성분은 독립적이고 균등한 분포를 따르고 데이터를 전송하는 동안 채널이 변하지 않는 준정적 상태를 가정한다. 이때, 사용자 단말의 참조번호는 $k \in \{1,\dots,K\}$이다. 기지국이 c번째 빔행렬을 구성하는 $i \in \{1,\dots,M\}$번째 빔벡터 $\boldsymbol{v}_{c,i}$를 k번째 사용자 단말에게 할당했을 때, k번째 사용자 단말에서의 수신 신호 $y_{c,k,i}$는 다음과 같다.

$$y_{c,k,i} = \boldsymbol{h}_k^T \boldsymbol{v}_{ci} x_i + \sum_{j\in B, j\neq i} \boldsymbol{h}_k^T \boldsymbol{v}_{cj} x_j + n_k, \quad (1)$$

이때, $\boldsymbol{x} = [x_1, \dots, x_M]^T \in \mathbb{C}^{M\times 1}$은 기지국에서 보내는 데이터 신호 벡터이며, x_i는 i번째 빔벡터를 통해 전송되는 데이터 신호를 의미한다. 또한 $\mathbb{E}\left[\|\boldsymbol{x}\|_2^2\right] = P$ 의 전력 제한이 존재한다고 가정한다. $B \subset \{1,2,\dots,M\}$는 이미 할당되어 사용 중인 빔의 참조번호의 집합을 의미하며, n_k는 k번째 사용자 단말이 수신한 신호에 더해진 잡음으로, $CN(0,N_0)$의 분포를 따른다고 가정한다. k번째 사용자 단말은 모든 c, i에 대해 총 CM개의 수신 신호의 SINR값들을 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\gamma_{c,ki} = \frac{\left|\boldsymbol{h}_k^T \boldsymbol{v}_{ci}\right|^2}{\sum_{j\in B, j\neq i} \left|\boldsymbol{h}_k^T \boldsymbol{v}_{cj}\right|^2 + \frac{|B| M N_0}{P}}, \quad \forall c, \forall i. \quad (2)$$

할당된 사용자 단말들의 참조번호의 집합이 $U \subset \{1,2,\dots,K\}$일때, 기지국에서 할당된 전체 사용자 단말들에 대한 합계 전송률을 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$R_{c,U,B} = \sum_{\{k,i\}\subset\{U,B\}} \log(1+\gamma_{cki}), \quad (3)$$

이때, 생성된 C개의 다중 빔행렬에 대해 최대 달성가능한 합계 전송률을 얻을 수 있는 빔행렬의 빔벡터와 사용자 단말의 조합은 가능한 모든 조합을 비교하여 찾을 수 있으며, 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\{c_{\max}, U_{\max}, B_{\max}\} = \underset{\{c,U,B\}}{\operatorname{argmax}} \left(R_{c,U,B}\right), \quad R_{\max} = R_{c_{\max},U_{\max},B_{\max}}. \quad (4)$$

이와 같은 기법은 다중 빔행렬 후보의 빔벡터, 사용자 단말의 조합에 대해 합계 전송률을 극대화할 수 있는 최적 선택 기법이지만, $CKM\sum_{m=1}^{M}\binom{M-1}{M-m}$개의 SINR을 계산해야 하기 때문에 빔행렬의 개수, 빔벡터와 사용자 단말의 수가 증가할수록 계산 복잡도가 현저히 증가하는 문제가 있다.

Ⅲ. 제안하는 사용자-빔 선택 기법

본 논문에서는 다중 빔행렬 선택 기반 빔포밍 기법에서 기지국에서 사용자-빔 스케쥴링 시 높은 계산 복잡도를 해결하기 위한 기법을 제안한다.

탐욕적 (greedy) 선택 기법 : 기지국은 각 빔행렬 후보에서 1개의 빔벡터부터 시작해서 빔행렬을 구성하는 빔벡터의 수만큼 SINR값 기반으로 전송률을 극대화하는 사용자-빔 조합을 포함하여 순차적으로 선택한다. 이렇게 선택된 C개의 빔행렬 후보 중 c번째 빔행렬 후보가 달성가능한 합계 전송

률 $R_{a\,U_{\max},B_{\max}}$로 나타낼 수 있다. 최종적으로 기지국은 모든 C개의 빔행렬 후보 중 달성가능한 최대 합계 전송률을 얻을 수 있는 빔행렬 $\boldsymbol{V}_{c_{\max}}$을 이용하여 데이터 신호를 전송한다. 이때, 기지국은 사용자-빔 스케쥴링시 총 $CK\sum_{m=0}^{M-1}(M-m)$번의 계산량이 요구된다.

강화 탐욕적 (enhanced greedy) 선택 기법 : 앞의 탐욕적 선택 기법은 계산의 복잡도를 크게 낮출 수 있으나, 순차적으로 이전의 조합을 포함하여 새로운 조합을 찾는다. 즉, 처음 선택된 사용자-빔 조합이 달성가능한 합계 전송률에 큰 영향을 주기 때문에 처음 선택된 사용자-빔 조합에 크게 의존한다. 이러한 문제를 해결하기 위해 제안된 강화 탐욕적 선택 기법은 각 빔행렬 후보에서 1개의 빔벡터를 고정하여 탐욕적 선택 기법으로 사용자-빔을 순차적으로 선택하고, 이후 다른 1개의 빔벡터를 고정하여 탐욕적 선택 기법을 수행하는 과정을 모든 빔행렬과 빔벡터에 대해 반복수행한다. 이를 통해 모든 C개의 빔행렬 후보 중 달성 가능한 최대 합계 전송률을 얻을 수 있는 빔행렬을 이용하여 데이터를 전송한다. 이때, 기지국은 스케쥴링시 총 $CMK\left(1+\sum_{m=1}^{M-1}(M-m)\right)$번의 계산량이 요구된다.

Ⅳ. 시뮬레이션 결과

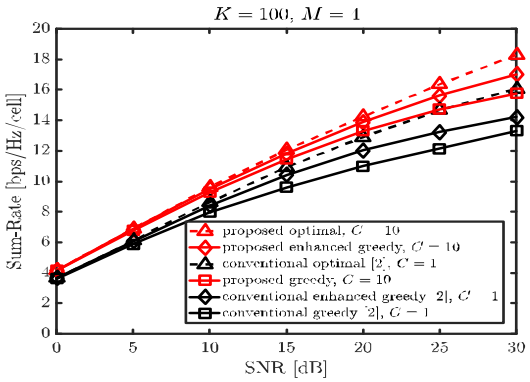

그림 2. 송신 SNR의 증가에 따른 달성가능한 합계 전송률 비교

그림 2는 100개의 사용자 단말과 기지국 안테나 수가 4개가 존재할 때, 송신 SNR의 증가에 따른 달성할 수 있는 합계 전송률을 사용자-빔 선택 기법별로 보여주고 있다. 기지국의 송신 SNR이 증가할수록 합계 전송률은 향상된다. 빔행렬 후보를 1개 사용할 경우, 모든 사용자-빔 조합을 통해서 합계 전송률을 계산하는 최적 사용자-빔 선택 기법이 가장 높은 합계 전송률을 보여준다. 또한, 탐욕적 사용자-빔 선택 기법보다 더 많은 경우를 비교하는 기존의 강화 탐욕 사용자-빔 선택 기법의 합계 전송률이 높은 것을 확인할 수 있다. 그러나 빔행렬 후보 수가 10개일 경우, 제안한 탐욕과 제안한 탐욕적 사용자-빔 선택 계열의 기법의 성능이 최적 사용자-빔 선택 기법에 근접하는 것을 볼 수 있다.

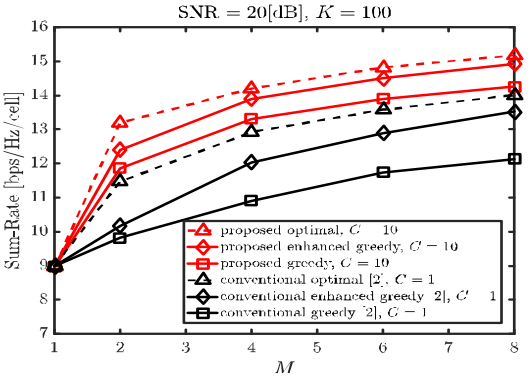

그림 3. 기지국 안테나 수의 증가에 따른 달성가능한 합계 전송률 비교

그림 3은 100개의 사용자 단말이 존재하며 송신 SNR이 20dB일 경우, 기지국 안테나의 수 증가에 따른 달성할 수 있는 합계 전송률을 사용자-빔 선택 기법별로 보여주고 있다. 기지국의 안테나의 수 M이 증가할수록, 합계 전송률이 향상된다. 빔행렬 후보를 1개 사용할 경우, 기존의 최적 사용자-빔 선택 기법이 가장 높은 합계 전송률을 달성할 수 있으나, 빔행렬 후보 수를 10개로 증가시킬 경우, 제안한 탐욕적 사용자-빔 선택 계열의 기법의 성능이 최적 사용자-빔 선택 기법의 성능에 크게 근접하는 것을 확인할 수 있다.

표 1. $K = 100$ 일 때, 빔행렬 후보 및 빔벡터 수에 따른 기지국에서의 SINR 계산량

사용자-빔 선택 기법	M=2	M=4	M=6	M=8
Optimal, C=1	400	3,200	19,200	102,400
Greedy, C=1	300	1,000	2,100	3,600
Enhanced Greedy, C=1	400	2,800	9,600	23,200
Optimal, C=10	4,000	32,000	192,000	1,024,000
Greedy, C=10	3,000	10,000	21,000	36,000
Enhanced Greedy, C=10	4,000	28,000	96,000	232,000

표 1은 사용자 단말의 수가 100개일 경우, 기지국에서 사용하는 빔행렬과 빔벡터의 수에 따른 총 SINR 계산량을 비교하고 있다. 최적 선택 기법과 비교하였을 때, 제안하는 탐욕적 선택 기법과 강화 탐욕적 선택 기법을 적용한 경우가 기지국에서의 계산량을 현저히 줄일 수 있다. 또한, 빔행렬이 10개 존재하고, 빔벡터의 개수가 6개보다 많아지면, 탐욕적 사용자-빔 선택 기법은 빔행렬이 1개 존재할 때의 최적 사용자-빔 선택 기법과 비슷하거나 더 적은 계산량을 가짐에도, 그림 3에서 더 높은 달성가능한 합계 전송률을 보이는 것을 확인할 수 있다.

Ⅴ. 결 론

본 논문에서는 다중안테나를 장착한 기지국과 다수의 단일안테나 사용자 단말들로 이루어진 하향링크 셀룰라 네트워크에서 다중 의사-무작위 빔행렬 후보들 중 달성 가능한 합계 전송률을 극대화하는 최적의 빔행렬 후보를 선택함에 있어서 최적, 탐욕적, 강화 탐욕적 사용자-빔 선택 기법의 합계 전송률과 기지국에서의 계산 복잡도를 비교분석하였다. 최적 선택 기법의 달성가능한 합계 전송률은 빔행렬 후보 및 빔벡터 수의 증가에 따라 증가하지만, 사용자-빔 선택 시 기지국의 계산 복잡도가 빔행렬 후보 및 빔벡터 수, 사용자 수에 따라 선형적으로 크게 증가한다. 반면, 제안한 강화 탐욕적 선택 기법에서는 빔행렬 및 빔벡터 수가 매우 많을 경우, 기지국의 계산 복잡도를 극적으로 감소시킬 수 있을 뿐만 아니라 최적 선택 기법과 거의 동일한 성능까지 도달할 수 있음을 확인하였다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 년도 미래창조과학부 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (NRF-2016R1A2B4014834).

참 고 문 헌

[1] M. Sharif and B. Hassibi, "On the capacity of MIMO broadcast channel with partial side information," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 51, no. 2, pp. 506-522, Feb. 2005.

[2] J. L. Vicario, R. Bosisio, C. A-Haro and U. Spagnolini, "Beam selection strategies for orthogonal random beamforming in sparse networks," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 7, no. 9, pp. 3385-3396, Sep. 2008.

[3] W. Son, B. C. Jung, W.-Y. Shin, and Y. Shin, "Multi-cell pseudo-random beamforming: Opportunistic feedback and beam selection," in *Proc. ICTC*, Oct. 2017.