

# 셀룰러 네트워크에서 송신파워가 최적의 피드백 정보량에 미치는 영향에 관한 연구

민문식 · 나철훈\*

국립목포대학교

## Effect of transmit power on the optimal number of feedback bits in dense cellular networks

Moonsik Min · Cheol-Hun Na\*

Mokpo National University

E-mail : mnsk1min@mokpo.ac.kr / chna@mokpo.ac.kr

### 요 약

본 논문은 복수의 안테나를 보유한 기지국이 잡음제한 된(noise-limited) 셀룰러 환경에서 복수의 단일 안테나 사용자와 동시에 통신 하는 시스템을 고려한다. 각 사용자는 제한된 피드백을 통해 송신부에 자신의 채널 상태 정보를 공유하고 송신부는 공유된 채널 정보를 바탕으로 다중사용자 기반의 공간다중화를 진행한다. 채널 정보가 제한되어있기 때문에 시스템의 하향링크 데이터율은 채널 정보의 피드백 양에 비례한다. 하지만 피드백 양이 증가하면 피드백에 사용되는 상향링크의 자원소모가 동시에 증가하기 때문에, 실제의 통신시스템은 하향링크 통신량과 상향링크 제어정보량 사이의 균형을 적절히 고려할 필요가 있다. 본 논문에서는 이러한 측면을 고려하여 정의된 순(net) 주파수 효율을 사용하며 이를 최대화 하는 최적의 피드백 양을 분석한다. 특히, 단말의 수신 파워가 수신 노이즈에 비해 낮을 때의 시스템의 최적 피드백 양을 주로 연구한다.

### ABSTRACT

In this paper, a dense cellular network is considered in which each base station equipped with multiple antennas simultaneously communicates with multiple single-antenna users. Based on limited feedback, each user feeds back its quantized channel state information (CSI) to its associated transmitter, and the transmitter broadcasts multiple data streams prepared for the scheduled users using a space-division multiple access scheme. As the amount of CSI is limited at the transmitter, the downlink throughput increases with the number feedback bits. However, the increased number of feedback bits requires the correspondingly increased amount of uplink resources. Thus, an appropriate balance between the downlink throughput and the uplink resource usage should be considered in realistic systems. A net spectral efficiency defined in this context is used in this paper, and the optimal number of feedback bits that maximizes the net spectral efficiency is analyzed. This paper particularly focuses on the case when the received signal power is much smaller than the noise power.

### 키워드

Multiple-input multiple-output (MIMO), Cellular network, Inter-cell interference, Limited feedback, Spectral efficiency

---

\* speaker and corresponding author

## 1. 서 론

다중안테나 시스템은 시간 주파수 자원이 포화된 무선통신 환경에서 통신량을 증가시킬 수 있는 핵심 기법으로 꾸준히 연구되어 왔다[1]. 특히, 다중 사용자 MIMO 기법은 수신 단말이 복수의 안테나를 사용하지 않아도 송신 안테나 수에 비례하는 주파수 효율을 얻을 수 있어 주목을 받아 왔다[2]. 통신 표준이 5G로 넘어감에 따라, 통신 시스템의 품질을 결정하는 지표도, 기지국과 사용자간의 단일 링크 통신 품질보다는 셀룰러 네트워크 전체의 성능 품질을 분석하는 방법에 초점을 맞추고 있다. 따라서 MIMO 시스템의 경우도 실제의 셀룰러 환경에 적용되었을 때 이론적인 성능이 얼마나 보장되는지 예측될 수 있어야 한다.

실제 무선 통신환경에서의 MIMO 시스템의 성능을 추정하기 위해서는 셀룰러 네트워크를 시뮬레이션할 수 있는 환경이 필요하다. 최근에는 네트워크내의 기지국 위치를 확률적으로 모델링하는 기법이 다양하게 연구되고 있으며, 이를 통해 실제의 셀룰러 네트워크를 통계적으로 근사하는 연구가 진행 중이다[3],[4]. 특히, 포아송 포인트 프로세스 (PPP: Poison Point Process)를 기반으로 한 기지국 분포가 많이 활용되며, 본 논문에서도 PPP를 사용하여 셀룰러 네트워크를 구성 한다. 특히, [4]에서는 제한된 피드백을 활용하였을 때, MIMO 기지국이 밀집된 셀룰러 네트워크 내에서 얻을 수 있는 성능을 다양한 지표에 관해 분석하여 향후 연구에 활용될 수 있는 수학적 토대를 제시하였다. 하지만, [4]의 결과는 수신부에서 잡음의 효과를 무시할 수 있을 정도로 신호의 세기가 강한 간섭 제한된(interference-limited) 환경만을 고려하고 있다. 송신파워는 통신 시스템에서 가장 중요한 자원 중 하나라는 점과, 셀룰러 네트워크에서는 셀 외곽지역에서 수신 신호 대 잡음비(SNR)가 크게 떨어질 수 있다는 점을 고려해 보았을 때, 시스템이 언제나 간섭 제한되어 있다고 가정할 순 없다. 따라서 본 논문에서는 상대적으로 노이즈의 효과가 큰 잡음제한 된 환경을 고려하여 기존[4]의 연구가 동일하게 적용되는지 확인해 보고자 한다.

## II. 본 론

본 논문에서는 각 기지국이  $N$ 개의 송신안테나를 가지는 셀룰러 네트워크를 고려한다. 기지국들은 네트워크 내에 PPP로 분포하며, 기지국의 배치는 원점에서 가까운 것부터 오름차순으로 정렬된 거리의 집합  $\{d_i; i \text{는 정수}\}$ 으로 표현할 수 있다. 본 논문에서는 Slivnyak의 정리를 바탕으로 원점에 고정된 사용자의 주파수 효율을 분석하며, 이 성능은 대칭성으로부터 네트워크 전체의 사용자들의 평균 주파수 효율에 해당 된다. 각 기지국은 하향링크 전송을 위해  $K$ 명의 사용자를 무작위로 스케줄링 하였다고 가정하고, 각 사용자는 단일 안테나

를 통해 신호를 수신한다. 원점에 위치하는 사용자를 유저  $k$ 로 표기하면, 유저  $k$ 의 수신 벡터는 다음과 같다:

$$y = d_1^{-\frac{\alpha}{2}} h_{k,1}^H V_1 s_1 + \sum_{i=2}^{\infty} d_i^{-\frac{\alpha}{2}} h_{k,i}^H V_i s_i + z_k. \quad (1)$$

여기서  $h_{k,i}$ 는  $i$ 번째 기지국과 유저  $k$ 사이의 채널을 나타내는 벡터이며, 벡터의 각 원소는 평균 0, 분산 1의 가우시안 분포를 가진다.  $V_i$ 는  $i$ 번째 기지국이 공간다중화를 위해 사용하는 송신 프리코딩(precoding) 행렬,  $s_i$ 는  $i$ 번째 기지국의 송신 신호,  $z_k$ 는 각 원소가 평균 0, 분산 1인 가우시안 열잡음 벡터이다. 행렬의 첨자  $H$ 는 conjugate transpose를 뜻한다. 각 기지국은  $P$ 의 송신 파워를 각 데이터 스트림에 동일하게 분배한다. 송신 행렬은 zero-forcing beamforming을 사용하여 구해지며, 이를 위해 수신부는 채널 방향 정보를 유한한 사이즈의 코드북을 통해 양자화 한 후 피드백 한다. 사용자는 양자화 된 인덱스를 피드백하며, 피드백에는  $B$ 개의 비트가 사용 된다.

식 (1)로부터, 원점에 위치한 유저  $k$ 의 신호 대 잡음 및 간섭비는

$$SINR(B,K) = \frac{\frac{P}{K} d_1^{-\alpha} |h_{k,1}^H v_k|^2}{\frac{P}{K} \sum_{k'=1, k' \neq k}^K d_1^{-\alpha} |h_{k,1}^H v_{k'}|^2 + \frac{P}{K} \sum_{i=2}^{\infty} d_i^{-\alpha} \|h_{k,i}^H V_i\|^2 + 1} \quad (2)$$

로 주어지며, 따라서 유저  $k$ 의 주파수 효율은

$$R(B,K) = E[\log_2 SINR(B,K)] \quad (3)$$

가 된다. 본 논문에서는 하향링크 주파수 효율과 상향링크 피드백의 자원소모를 모두 반영하기 위해, 다음의 순(net) 주파수 효율을 고려한다.

$$R_N(B,K) = R(B,K) - \frac{B}{T_c} \quad (4)$$

여기서  $T_c$ 는 채널의 상관 시간(coherence time)이다. [4]에서는 각 사용자가 단일 안테나로 수신하는 시스템을 가정했을 때,  $R_N(B,K)$ 를 최대화 하는 최적의 피드백 비트 수  $B^*$ 가,  $K=1$ 일 경우

$$\lim_{T_c \rightarrow \infty} \frac{B^*}{(N-1) \log_2 T_c} = 1 \quad (5)$$

를 만족하고,  $K=N$ 인 경우

$$\lim_{T_c \rightarrow \infty} \frac{B^*}{\frac{\alpha}{2} (N-1) \log_2 T_c} = 1 \quad (6)$$

를 만족함을 보였다. 하지만 이 결과는 주파수 효율을 산출하는 식 (2)와 (3)에서 노이즈의 영향을 무시하고 얻어진 결과이다. 다시 말해, 셀 간 간섭에 비해 노이즈의 영향이 굉장히 작은 간섭제한

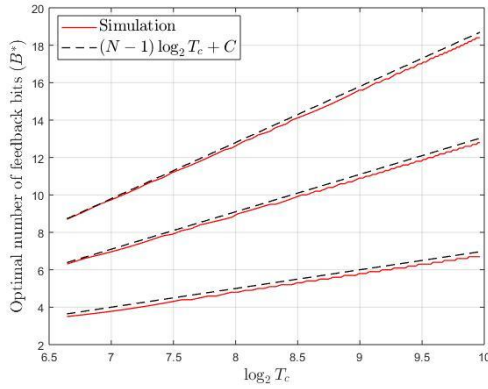


그림 1.  $B^*$  vs.  $\log_2 T_c$ .  $K=1$ .

된 환경에 국한된 결과이다. 송신 파워가 작아지거나 단말이 셀의 음영지역으로 들어가는 등, 무선 통신환경이 잡음제한 되는 상황도 많이 발생하기 때문에, 잡음제한 된 경우에도 최적의 비트 수의 증가율이 (5), (6)과 동일하게 주어지는 지 확인할 필요가 있다. 본 논문에서는 이러한 측면을 시뮬레이션을 통해 검증하고자 한다. 즉, 수신 파워가 비교적 낮을 때의 결과를 얻고자 하며, 이를 위해 다음과 같이 수신부 잡음 대 신호 비( $NSR_r$ )를 정의하여 사용 한다:

$$NSR_r \equiv E \left[ d_1^{\alpha} \frac{K}{P} \right]. \quad (7)$$

### III. 시뮬레이션 결과

본 논문의 시뮬레이션 결과는  $NSR_r = 20$  [dB]를 가정한다. 즉, 평균적으로 신호의 파워가 노이즈에 비해 20 dB 낮은 환경을 고려한다. 그림 1은  $K=1$ 의 경우를 시뮬레이션 한 결과이다. 아래부터 차례로  $N=2,3,4$ 의 경우를 시뮬레이션 하였다. 붉은 실선은 최적의 비트 수( $B^*$ )를 시뮬레이션을 통해 구해  $T_c$ (log-scale)에 대해 그린 결과이다. 검은 파선(dashed line)은 (5)의 결과를 검증하기 위해 기울기를 비교할 목적으로  $(N-1)\log_2 T_c$ 에 적절한 상수를 더해 그린 결과이다. 그림 1의 결과로부터 (5)가 잡음제한 된 환경에서도 성립함을 알 수 있다.

그림 2는  $K=N$  경우를 시뮬레이션한 결과이다. 그림 1과 마찬가지로 아래에서부터  $N=2,3,4$ 의 경우를 그리고 있고, 검은 파선은 (6)의 결과를 검증하기 위해 추가한 기울기이다.  $K=N$ 인 경우에 잡음 제한 된 환경에서도 (6)의 결과가 근사하게 성립함을 확인할 수 있다.

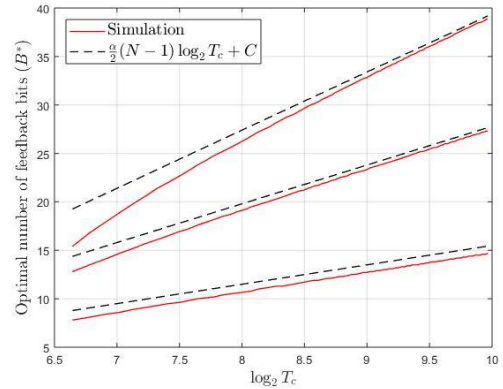


그림 2.  $B^*$  vs.  $\log_2 T_c$ .  $K=N$ .

### IV. 결 론

본 논문에서는 MIMO 기지국이 잡음제한 된 셀룰러 네트워크에서 가지는 성능을 알아보았다. 시뮬레이션 결과를 통해 간섭제한 된 환경에서 얻어진 기존의 연구결과가 노이즈가 강하게 작용하는 환경에서도 활용 가능함을 확인할 수 있었다. 하지만 이는 이론적으로 증명된 결과가 아니기 때문에 향후 수학적 해석이 필요하다. 또한, 최적의 피드백 비트수가 SNR에 따라 어떻게 변하는지도 향후의 연구방향중 하나가 될 수 있을 것이다.

### Acknowledgment

본 과제(결과물)는 산업통상자원부의 '산학융합지구 조성사업' 국고지원금으로 수행한 에너지밸리 산학융합지구조성사업의 연구결과입니다.

### References

- [1] G. Caire and S. Shamai, "On the achievable throughput of a multiantenna Gaussian broadcast channel," *IEEE Trans. Inf. Theory*, Vol. 49, No. 7, pp. 1691-1706, July 2003.
- [2] N. Jindal, "MIMO broadcast channels with finite-rate feedback," *IEEE Trans. Inf. Theory*, Vol. 52, No. 11, pp. 5045-5060, Nov. 2006.
- [3] J. G. Andrews, F. Baccelli, and R. K. Ganti, "A tractable approach to coverage and rate in cellular networks," *IEEE Trans. Commun.*, Vol. 59, No. 11, pp. 3122-3134, Nov. 2011.
- [4] J. Park, N. Lee, J. G. Andrews, and R. W. Heath Jr, "On the optimal feedback rate in interference-limited multi-antenna cellular systems," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, Vol. 15, No. 8, pp. 5748-5762, Aug. 2016.