

# 수신안테나결합을 활용한 다중안테나 하향채널의 양자화 성능 근사 기법

강 윤 성\*

## Quantization Cell Approximation for MIMO Broadcast Channels with Receive Antenna Combining

Yun-Seong Kang\*

### 요 약

본 논문은 제한된 피드백 기반의 다중안테나 하향 링크 채널에서 활용 가능한 양자화 성능 근사 기법(QCA: quantization cell approximation)을 제안한다. 제안하는 QCA기법은 기존의 방법과 달리 수신부의 안테나 수와 무관하게 적용이 가능하다. 이를 위해 양자화 오차의 확률분포에 추가적인 근사를 적용한다. 제안된 QCA의 정확도를 실험결과를 통해 검증하였으며, 시스템의 주요 파라미터들과 무관하게 기존의 QCA와 비슷한 수준의 근사 오차를 보임을 확인하였다.

**Key Words** : MU-MIMO, limited feedback, quantization based combining, beamforming, quantization cell approximation

### ABSTRACT

This letter proposes quantization cell approximation (QCA) for MIMO broadcast channels. In contrast to the conventional QCA, the proposed QCA is applicable regardless of the number of receive antennas. To achieve this, an additional approximation is imposed on the distribution of the quantization error. Simulation results demonstrate that the approximation error of the proposed QCA is

small if we have a sufficient number of feedback bits.

### I. 서 론

하향링크의 다중사용자 다중안테나 시스템은 복수의 유저를 통해 가상의 MIMO 채널을 형성하여 주파수 효율을 증가시킨다<sup>1-3)</sup>. 이때, 충분한 성능을 얻기 위해 송신부가 채널상태정보(CSI)필요로 한다. 특히, 기지국이 직접 CSI를 확보하기 어려운 환경에서는 수신부로부터 채널정보를 전달 받는 제한된 피드백 기법이 주로 활용 된다<sup>2,4)</sup>. 제한된 피드백은 효율적으로 CSI정보를 피드백 하지만, 피드백 과정에서 양자화 오차가 발생하기 때문에, 시스템의 성능이 떨어진다. 게다가 양자화 오차를 포함하는 성능지표의 분석이 상대적으로 난해 하다는 단점이 있다.

이러한 어려움을 해결하기 위해, 양자화 영역을 일관적인 구형 cap으로 근사하는 방법(QCA: quantization cell approximation)이 해석적인 틀로서 주요 연구에서 활용되어 왔다<sup>3)</sup>. QCA 기법을 활용하면 양자화의 영향이 확률적이지 않은 상수에 집약되어 시스템의 해석이 용이해지는 장점이 있다. 하지만 기존의 QCA는 수신안테나가 하나인 MISO 채널에서 대부분 활용되어 왔다. 본 논문에서는 양자화 성능을 최대화하기 위한 수신 안테나 결합 기법 중 하나인 quantization based combining (QBC)기법<sup>5)</sup>을 활용하여 수신안테나수와 무관하게 활용 가능한 QCA기법을 제안하고자 한다. 제안하는 QCA기법은 기존의 방법에 비해 추가적인 근사단계를 거치게 된다. 실험을 통해, 제안하는 QCA기법의 성능을 검증하며, 제안하는 기법이 기존의 QCA와 비슷한 수준의 근사오차를 가짐을 확인 할 수 있다.

### II. 시스템 모델

본 논문에서는 기지국위치가 homogeneous Poisson point process (HPPP)로 모델링되는 셀룰러 네트워크를 고려한다<sup>2)</sup>. 각 셀에서는 하나의 기지국이  $M$ 개의 송신안테나를 통해  $K$ 명의 유저와 동시에 통신하는 하향링크 시스템을 고려한다. 각 유저는  $N$ 개의 수신 안테나를 보유하고 있으며, 안테나 결합을 통해 수신 신호를 처리한다. 빔포밍(beamforming)기반

\* First and Corresponding Author : (ORCID:0000-0001-6816-5643)R&D Center, LG Display, yskang0111@gmail.com, 정희원  
논문번호 : 201909-203-A-LU, Received September 18, 2019; Revised September 20, 2019; Accepted September 25, 2019

의 적교 송신을 위해 유저 수는 송신안테나 수보다 작다고 가정한다( $K \leq M$ ). 네트워크 내의 임의의 유저  $k$ 의 수신신호는<sup>[2]</sup>

$$y_k = \mathbf{d} \parallel -\frac{\alpha}{2} \mathbf{h}_k^H \mathbf{x} + I_C + n_k \quad (1)$$

가 되고, 여기서  $\mathbf{h}_k$ 는 유저  $k$ 와 기지국 사이의 채널 행렬( $\mathbf{H}_k$ )과 수신 결합 벡터( $\mathbf{r}_k$ )의 곱결 전치를 곱한 유효채널이며, 채널 행렬의 각 원소는 독립적인 평균 0, 분산 1의 complex Gaussian 분포를 가진다.  $\mathbf{d}$ 는 유저  $k$ 와 그로부터 가장 가까운 기지국사이의 위치벡터이며,  $n_k$ 는 수신 신호처리 후에 얻어지는 complex additive Gaussian noise를 뜻한다. Gaussian noise의 평균과 분산은 각각 0과 1이다.  $\mathbf{x} = \sum_{i=1}^K \mathbf{w}_i s_i$ 는 송신 벡터이고, 여기서 빔포밍 벡터  $\mathbf{w}_i$ 는 zero-forcing 빔포밍<sup>[2]</sup>을 통해 얻어지며,  $s_i$ 는 유저  $i$ 에게 준비된 송신신호이다. 송신 파워는  $E\{\|\mathbf{x}\|^2\} = P$ 로 제한되고, 전체 파워는 각 유저에게 동일하게 분배된다. 송신부의 빔포밍을 돕기 위해 각 유저는 자신의 채널을  $2^B$  사이즈의 코드북을 통해 양자화하여 피드백한다<sup>[2],[3]</sup>. 즉, 각 유저는  $B$ 비트를 CSI 피드백에 사용한다.

추가로, (1)에서  $I_C$ 는 다른 기지국으로부터의 간섭 신호를 뜻하며, HPPP 기반 기지국으로부터의 간섭신호의 생성은 기존의 연구를 참조한다<sup>[6]</sup>(네트워크 내의 모든 기지국이  $K$ 명의 유저와 동일한 송신방식을 사용하여 통신함을 가정). 본 논문에서는 수신 안테나 결합( $\mathbf{r}_k$ )을 위해 QBC기법<sup>[5]</sup>을 활용한다. QBC는 안테나 결합을 통해 양자화 효율을 최대화 하는 기법이며, QBC를 사용하면 임의의 코드워드와 유효채널 사이의 오차의 확률분포가 다음과 같이 주어진다.

$$f_{\sin^2\theta_{k,i}}(x) = \frac{1}{B(M-N, N)} x^{M-N-1} (1-x)^N. \quad (2)$$

여기서  $\sin^2\theta_{k,i} = (1 - |\tilde{\mathbf{h}}_k^H \mathbf{c}_i|^2)$ ,  $\tilde{\mathbf{h}}_k$ 는 유효채널의 단위벡터)는 유저  $k$ 와  $i$ 번째 코드워드  $\mathbf{c}_i$  사이의 양자화 오차값이며,  $B(M-N, N)$ 는 베타 함수이다.

### III. 양자화 영역의 근사

수신 안테나의 수가 하나인 경우, 양자화 영역을 동일한 구형 cap으로 근사하는 방법인 QCA가 해석적인 틀로서 주요 연구에서 활용되어 왔다<sup>[3]</sup>. 본 논문에서는 QBC를 기반으로  $N > 1$ 인 경우에도 적용 가능한 QCA기법을 제안하고자 한다. QCA의 기본 접근법은 각 코드워드의 양자화 영역을 다음과 같이 일정한 구형 영역으로 근사함에 있다<sup>[3]</sup>.

$$T_i \approx \{\tilde{\mathbf{h}}_k : \sin^2\theta_{k,i} \leq \delta\}. \quad (3)$$

추가로, 본 논문에서는 (2)로부터 다음과 같은 근사를 고려한다.

$$f_{\sin^2\theta_{k,i}}(x) \approx \frac{1}{B(M-N, N)} x^{M-N-1}. \quad (4)$$

이 결과는 수식 (2)의  $(1-x)^N$ 항을 1로 근사함으로써 얻어진다. 따라서  $x$ , 즉,  $\sin^2\theta_{k,i}$ 의 값이 충분히 작으면 좋은 결과로 이어지지만, 그렇지 않을 경우 근사결과가 나쁠 수 있다. 제한된 피드백 시스템의 경우, 양자화과정에서  $2^B$ 개의 코드워드 중  $\sin^2\theta_{k,i}$ 의 값이 가장 작은 것을 선택하게 된다. 따라서 피드백 비트수 ( $B$ )가 증가할수록 양자화 후의 양자화 어려움( $\sin^2\theta_{k,m}$ )은 점진적으로 작아지며 0으로 수렴하게 된다; 여기서  $m$ 은  $\sin^2\theta_{k,i}$ 을 최소화하는 코드워드의 인덱스를 뜻한다. 본 논문에서 제안하는 QCA의 경우 양자화가 완료된 후의 오차에 해당하는  $\sin^2\theta_{k,m}$ 을 근사하는 것이 목적이기 때문에  $B$ 가 충분히 크다고 가정하고 (4)와 같은 근사를 추가로 고려한다.

이어서 (3)과 (4)를 통해 다음을 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned} & P(\sin^2\theta_{k,m} \leq x) \\ &= P(\sin^2\theta_{k,m} \leq x | \tilde{\mathbf{h}}_k \in T_i) \\ &= \frac{P(\sin^2\theta_{k,m} \leq x, \tilde{\mathbf{h}}_k \in T_i)}{P(\tilde{\mathbf{h}}_k \in T_i)} \\ &= \frac{P(\sin^2\theta_{k,m} \leq x, \sin^2\theta_{k,i} \leq \delta)}{P(\sin^2\theta_{k,i} \leq \delta)} \\ &= (x/\delta)^{M-N}, \quad 0 \leq x \leq \delta. \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 첫 번째 등호는  $\tilde{\mathbf{h}}_k$ 가  $T_i$ 에 속할 확률이 모든  $i$ 에 대해 동일하기 때문에 유도된다. 또한, 전체 코

드위드의 개수가  $2^B$ 이므로, 동일한 분포를 위해  $P(\tilde{\mathbf{h}}_k \in T_i) = 1/2^B$ 를 만족시키도록  $\delta$ 의 값을 정하면,  $\delta = 2^{-\frac{B}{M-N}}$ 가 된다. (5)의 결과를 통해 양자화 오차의 분포가 파라미터가  $M-N$ 과 1인 임의의 베타 확률 변수에  $\delta$ 를 곱한 것으로 근사될 수 있음을 알 수 있다. 기존의 QCA<sup>[3]</sup>와 비교해 보면, (5)의 결과는 (4)의 근사를 추가로 적용함으로써 기존의 QCA를  $N > 1$ 의 경우로 확장 시킨 결과임을 알 수 있다. 본 논문에서는 (4)의 근사가 추가로 적용되었기 때문에 결과에 대한 검증이 필요하다.

#### IV. 시뮬레이션 결과

본 절에서는 제안된 기법의 성능을 Monte Carlo 시뮬레이션을 통해 검증한다. 그림 1에서는 두 가지 시나리오에서 시뮬레이션을 하여 QCA의 성능을 검증하였다. 대조군으로는 랜덤한 코드워드를 생성하는 RVQ방식<sup>[2]</sup>을 사용하였다(RVQ는 양자화성능에 대해 높은 정확도의 성능 하계를 보여주기 때문에 대조군으로써 적절하다). (1)에서 다중 셀 간섭을 모델링하는 구체적인 방법은 기존의 결과를 참조한다<sup>[6]</sup>(경로 감쇄 지수는  $\alpha = 4$ 로 설정하였으며, HPPP의 밀도(intensity)는  $10^{-5}/\pi$ 로 가정하였다.) 그림 1을 보면, 전반적으로 제안하는 QCA가 RVQ와 가까운 근사값을 가짐을 확인할 수 있다. 오차는 기존의 QCA<sup>[6]</sup>와 비슷하거나 작은 수준이며, 기존의 결과와 같이 양자화 비트수가 증가할수록 오차가 줄어들음을 확인할 수 있다. 그림 1에서 고려한 두 가지 대표 시나리오 외에

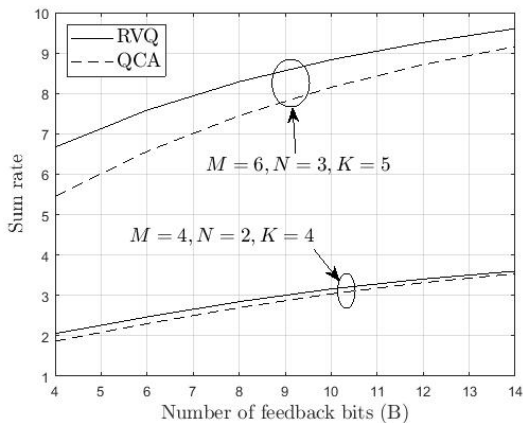


그림 1. 각 기지국의 sum rate vs 양자화 비트 수  
Fig. 1. Sum rate per base station vs the number of feedback bits

도 대체로 비슷한 정도의 오차가 발생함을 실험을 통해 알 수 있었으며,  $B$ 가 증가함에 따라 오차가 줄어드는 경향도 동일하게 발생하였다. 실험에 사용된 송신파워  $P$ 의 값은, 수신단의 잡음대비신호파워의 평균을 0 dB로 맞춘 값을 사용하였다.  $M=6$ 일 때의 오차가 상대적으로 큰 이유는 (4)의 근사과정에서 오류가 발생할 확률이 안테나 수가 많을수록 커지기 때문이다. 하지만 그림의 결과는  $K$ 명의 유저의 데이터율을 합친 sum rate를 실험한 것이기 때문에 각 유저단위로 봤을 때 근사오차의 절대 값이 크지는 않으며, 기존의 QCA<sup>[6]</sup>와 비교해 봤을 때도 유사한 수준의 근사오차를 가진다.

#### V. 결론

본 논문에서는 각 통신 링크의 송수신부에 모두 복수의 안테나를 활용하는 MIMO기지국 기반의 네트워크에서 활용 가능한 QCA기법을 새롭게 제안하였다. 제안된 QCA는 하나의 가정을 추가하여 기존의 방법을 수신안테나수와 무관하게 적용할 수 있도록 확장하였으며, 현실에 가까운 셀룰러 네트워크 내에서 시뮬레이션을 수행해 그 성능을 확인하였다. 시뮬레이션 결과를 통해 제안된 QCA가 기존의 QCA와 비슷한 수준의 정확도를 보임을 알 수 있었다. 하지만 이러한 결과는 수학적 분석을 통해서 이루어진 것이 아니기 때문에 향후 추가적인 활용을 위해선 보다 정밀한 성능 분석이 요구될 것이라 판단된다.

#### References

- [1] T. Yoo and A. Goldsmith, "On the optimality of multiantenna broadcast scheduling using zero-forcing beamforming," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 24, no. 3, pp. 528-541, Mar. 2006.
- [2] N. Jindal, "MIMO broadcast channels with finite-rate feedback," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 52, no. 11, pp. 5045-5060, Nov. 2006.
- [3] T. Yoo, N. Jindal, and A. Goldsmith, "Multi-antenna downlink channels with limited feedback and user selection," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 25, no. 7, pp. 1478-1491, Sep. 2007.
- [4] Y. J. Yoon, S. J. Kang, and M. Min,

“Adaptive two-stage feedback and user selection for MIMO downlink channels,” in *Proc. KICS Spring Conf. 2017*, pp. 61-63, Chosun Univ., Korea, Jun. 2017.

- [5] N. Jindal, “Antenna combining for the MIMO downlink channel,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 7, no. 10, pp. 3834-3844, Oct. 2008.
- [6] J. Park, N. Lee, J. G. Andrew, 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.