

저해상도 ADC 장치의 하향 링크 사물 인터넷 통신을 위한 프리코더 설계

김세용, 박정훈*
경북대학교, *경북대학교

ohma0228@knu.ac.kr, *jeonghun.park@knu.ac.kr

Design precoder for Downlink Internet-of-Things communications with Low-Resolution ADCs

Kim Se Yong, Park Jeong Hun*
Kyungpook Univ., *Kyungpook Univ.

요약

이 논문은 IoT 장치의 특징을 고려하면서 동시에 하향 링크 sum rate 을 최대화 하는 통신 기법을 제안한다. 우리는 통신 성능에 영향을 주는 다음 3 가지 IoT 장치의 특징을 고려한다. 1) 배터리 제한, 2) 저지연 통신을 위한 코드 길이 제한, 3) 다수의 장치 연결을 위한 NOMA 기법. 주어진 장치의 특성을 시스템 모델에 반영하여 성능을 최대화하는 기법을 제안하기 위해, 우선 3 가지 특징을 수학적 모델로 나타내고 sum rate 에 관한 최적화 문제로 변형시킨다. 하지만 주어진 최적화 문제는 non-smooth 하고 non-convex 하기 때문에, lower bound 을 이용한 근사화가 필요하다. 변형된 최적화 문제를 Rayleigh quotient 형태로 first-order KKT condition 을 유도하여 적은 복잡도로 sub-optimal solution 을 찾을 수 있는 알고리즘을 제안한다. 마지막으로 시뮬레이션 결과를 통해 제안한 기법의 성능 우위를 확인할 수 있다.

I. 서론

IoT 기술은 우리 생활에 가장 밀접한 통신 기술이다[1]. 스마트 워치와 같은 IoT 장치의 크기는 다른 이동 통신 장치에 비해 상대적으로 크기가 작다. 따라서 배터리 용량이 적고 그에 따라 적은 전력 사용이 필연적으로 요구된다. 이를 고려하기 위해, 상대적으로 에너지 소모가 적은 저해상도 ADCs 에 주목했다[2]. 하지만 저해상도 ADCs 의 사용은 수신 신호의 크기 감쇄 뿐만 아니라 quantization distortion 을 유발하고, 이러한 왜곡은 통신 시스템 설계를 어렵게 만든다.

또 다른 IoT 통신의 특징으로, 의료용 나노 디바이스와 같이 저지연 통신을 고려했다. 저지연 통신을 위해 충분히 짧은 채널 코딩 길이를 가진 패킷 통신을 가정했다. 이렇게 코딩 길이가 짧아지면 더이상 이론적인 Shannon capacity 를 만족할 수 없게 된다. 따라서 완벽한 디코딩이 불가능하며, 이를 디코딩 실패 확률 ϵ 으로 표현할 수 있으며, 또한 rate 의 감소를 유발한다.

마지막 IoT 에 대한 특징으로 다수의 장치 연결성을 고려하기 위해 NOMA 을 사용한 통신 시스템을 고려한다. NOMA 는 중첩코딩을 기반으로 successive interference cancellation (SIC)을 사용해 특정 유저는 간섭이 제거된 통신을 가능하게 하는 joint decoding 방식이다. 하지만 상향 링크 통신과 달리 하향 링크 통신에서 NOMA 의 성능을 높이기 위해선 디코딩 순서는 굉장히 중요하며, 우리는 이에 대한 분석을 진행한다.

II. 본론

우리는 N 개의 안테나를 가진 기지국과 K 개의 IoT 장치가 저지연 하향 링크 통신 시스템 모델을 가정한다.

k 번째 IoT 장치는 b_k 의 저해상도 ADCs 을 사용해 기지국과 통신을 하고 있으며, 그에 따른 quantization distortion 을 정량화 하기 위해 additional quantization noise mode(AQNM)을 사용해 다음과 같이 나타냈다.

$$\mathbf{Q}(\mathbf{y}_i) = \tilde{\mathbf{y}}_i \approx \alpha_i \mathbf{y}_i + \mathbf{q}_i,$$

이때 $\mathbf{Q}(\cdot)$ 는 element-wise quantizer 함수이며 양자 노이즈의 파워는 $\mathbf{q}_i \sim \mathcal{CN}(0, r_i)$ 과 같은 분포를 가지며, 이때 분산 $r_{q_i} = \alpha_i \beta_i E[|y_i|^2]$ 이다. $\alpha_k = 1 - \beta_k$ 는 [3]의 Table 1 에 따라 그 값을 가진다.

저지연 통신은 더 이상 Shannon capacity 를 달성할 수 없고, 이는 rate 의 감소와 디코딩 실패를 초래한다. 코딩 길이 L 과 디코딩 실패확률 ϵ 그리고 달성 가능한 rate R 에 대한 관계를 수학적 식으로 나타내면 다음과 같다.[4]

$$R_k \approx \log_2(1 + \gamma_k) - \frac{1}{L} V(\gamma_k) Q^{-1}(\epsilon_k),$$

코딩 길이 L 이 충분히 길어지면 rate 감소 항이 0 으로 줄어들고, 높은 ϵ 으로 공격적인 통신을 설계하면 rate 이 늘어나는 trade-off 관계를 갖는다

마지막으로 NOMA 를 사용하기 위해선 적절한 rate 설정이 매우 중요하다. 위 두 가지 특징을 이용해, IoT 장치 i 가 message $k(k \leq i)$ 를 디코딩할 때 달성가능한 SINR 을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{SINR}_{k \leftarrow i} = \frac{|h_i f_k|^2 \alpha_i^2}{\bar{I}_1 + I_2 + I_3 + N_0},$$

이때 $\bar{I}_1 = \sum_{m=1}^{k-1} \epsilon_m |h_i f_m|^2 \alpha_i^2$, $I_2 = \sum_{j=k+1}^K |h_i f_j|^2 \alpha_i^2$ 그리고 $I_3 = \sum_{n=1}^K |h_i f_n|^2 \alpha_i (1 - \alpha_i)$ 이다. 이때, $h_i \in \mathbb{C}^N$ 은

기지국과 IoT 장치 i 사이의 채널이다. 최종적으로 sum rate 을 최대화하는 최적화 문제는 다음과 같다.[5].

$$\max_{f_1, \dots, f_K} \sum_{k=1}^K \min_{i \geq k} (1 - \epsilon_k) w_k R_{k \leftarrow i},$$

$$\text{subject to } \sum_{k=1}^K \|f_k\|^2 = 1.$$

하향 링크에서 NOMA 를 사용하기 위해선, 유저들은 적절한 순서에 따라 SIC 을 진행할 필요가 있다. 이를 위해선 특정 유저의 메시지는 다른 모든 유저가 디코딩 할 수 있어야 하면, 이러한 관계는 min 함수를 통해 나타낼 수 있다. 최종적으로 KKT condition 을 유도하기 위해 $SINR_{k \leftarrow i} = (f^H A_{k,i} f / f^H B_{k,i} f)$ 의 Rayleigh quotient 형태로 나타내어 다음과 같은 최적화 식을 구할 수 있다.

$$\max_{\bar{f}} \sum_{k=1}^K -\frac{1}{\beta} \log_2 \left[\frac{1}{N_k} \sum_{i=k}^K \left(\frac{\bar{f}^H A_{k,i} \bar{f}}{\bar{f}^H B_{k,i} \bar{f}} \right)^{-\mu_k} \right],$$

이때, $\bar{f} = [f_1^T, \dots, f_K^T]^T$ 이며, 유도한 KKT condition 은 다음과 같다.

$$B_{KKT}^{-1}(\bar{f}) A_{KKT}(\bar{f}) = \lambda(\bar{f}) \bar{f},$$

여기서

$$\lambda(\bar{f}) = \sum_{k=1}^K -\frac{1}{\beta} \log_2 \left[\frac{1}{N_k} \sum_{i=k}^K \left(\frac{\bar{f}^H A_{k,i} \bar{f}}{\bar{f}^H B_{k,i} \bar{f}} \right)^{-\mu_k} \right] = \frac{\lambda_{num}(\bar{f})}{\lambda_{den}(\bar{f})},$$

그리고 $A_{KKT}(\bar{f})$ 와 $B_{KKT}(\bar{f})$ 는 다음과 같다.

$$A_{KKT}(\bar{f}) = \lambda_{num}(\bar{f}) \sum_{k=1}^K \frac{\sum_{i=1}^K \mu_k \left(\frac{\bar{f}^H A_{k,i} \bar{f}}{\bar{f}^H B_{k,i} \bar{f}} \right)^{-\mu_k} \left[\frac{A_{k,i}}{\bar{f}^H A_{k,i} \bar{f}} \right]}{\sum_{i=1}^K \left(\frac{\bar{f}^H A_{k,i} \bar{f}}{\bar{f}^H B_{k,i} \bar{f}} \right)^{-\mu_k}},$$

$$B_{KKT}(\bar{f}) = \lambda_{den}(\bar{f}) \sum_{k=1}^K \frac{\sum_{i=1}^K \mu_k \left(\frac{\bar{f}^H A_{k,i} \bar{f}}{\bar{f}^H B_{k,i} \bar{f}} \right)^{-\mu_k} \left[\frac{B_{k,i}}{\bar{f}^H A_{k,i} \bar{f}} \right]}{\sum_{i=1}^K \left(\frac{\bar{f}^H A_{k,i} \bar{f}}{\bar{f}^H B_{k,i} \bar{f}} \right)^{-\mu_k}}.$$

유도된 KKT condition 을 통해, 우리는 sub-optimal 값을 낮은 복잡도로 구하기 위해 generalized power iteration (GPI) - IoT 알고리즘을 제안한다. GPI-IoT 알고리즘에서 다음 규칙으로 업데이트한다.

$$\bar{f}^{(t)} = \frac{B_{KKT}^{-1}(\bar{f}^{(t-1)}) A_{KKT}(\bar{f}^{(t-1)}) \bar{f}^{(t-1)}}{\|B_{KKT}^{-1}(\bar{f}^{(t-1)}) A_{KKT}(\bar{f}^{(t-1)}) \bar{f}^{(t-1)}\|}$$

위 알고리즘은 수렴 조건은 충분히 작은 τ 에 대해서 $\|\bar{f}^{(t)} - \bar{f}^{(t-1)}\| < \tau$ 을 만족할 때까지 동작한다. 우리는 다음과 같은 조건에서 시뮬레이션을 진행했다. 매 실험에 IoT 장치는 기지국과 100m 에서 500m 거리에 서로 다른 위치에 임의로 군집하여 배치되며, 유저가 가진 ADCs 의 해상도 bits b_k 역시 2~4bits 중 임의로 설정된다. 채널 코드 길이 $L = 500$, 디코딩 실패 확률 $\epsilon = 10^{-4}$ 이다. 기지국 안테나 수 $N = 4$, IoT 장치 수 $K = 6$ 이다. 우리는 다음과 같은 시뮬레이션 baseline 을 구현했다. 1) Proposed Method 에서 본 연구에서 제안하는 알고리즘을 다른 디코딩 순서에 따라 진행했다. 2) OMA 는 orthogonal multiple access 방식으로 각 IoT 장치는 하나의 resource 에 하나의 유저를 할당하는 방식이다. 3) Sum Rate Maximization 방식에서 제안한 GPI 알고리즘에서 IoT 의 특징인 quantization distortion 과 저지연에 따른 특성을 고려하지 않았다.

4) Sum Rate Maximization 에서 treat interference as noise 방식으로 GPI 을 동작 시켰으며, 여기서 IoT 특징을 고려하지 않았다. 5) Zero-forcing 이며, 주어진 환경이 IoT 장치가 모여있으며, 채널 correlation 이 강하기 때문에 Zero-forcing 성능이 매우 낮음을 확인할 수 있다.

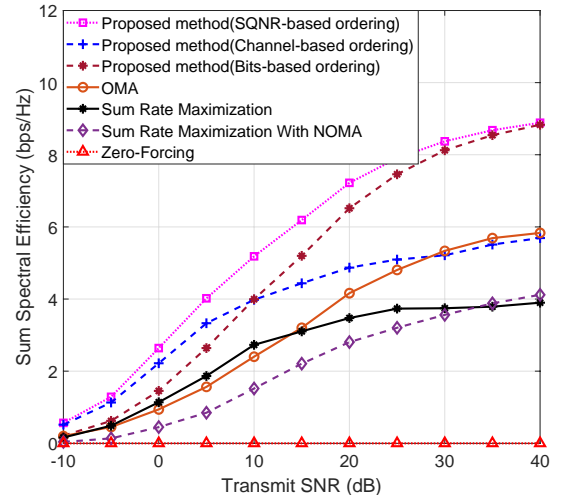


그림 1 Ergodic sum rate versus transmit SNR

III. 결론

본 논문에서 우리는 저해상도 ADCs, 저지연, 그리고 NOMA 를 고려한 IoT 장치의 통신 성능을 높이기 위한 프리코더 설계 기법을 제안했다. 5G 통신이 요구하는 조건을 고려하면서 동시에 하드웨어 설계에서 다뤄지는 전력효율 문제를 통신 디자인 문제로 해결하려는 시도로 다양한 관점으로 통신 디자인의 역할을 확장시키길 바란다.

ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MSIT) (No. 2022R1F1A1074391).

참 고 문 헌

- [1] A. Osseiran, "Scenarios for 5G mobile and wireless communications: the vision of the METIS project," IEEE Comm.Mag., vol. 52, no. 5, pp. 26-35, 2014.
- [2] J. Zhang, "On low-resolution ADC sin practical 5g millimeter-wave massive MIMO systems," IEEE Comm.Mag., vol. 56, no. 7, pp. 205-211, 2018.
- [3] L. Fan, "Uplink achievable rate for massive MIMO systems with low-resolution ADC," IEEE Commun. Lett., vol. 19, no. 12, pp. 2186-2189, 2015.
- [4] Y. Polyanskiy, "Channel coding rate in the finite blocklength regime," IEEE Trans. Info. Th., vol. 56, no. 5, pp. 2307-2359, May 2010.
- [5] J. Choi, "MIMO design for Internet-of-Things: Joint opti-mization of spectral efficiency and error probability in finite blocklengthregime," IEEE Internet of Things J., pp. 1-1, 2021