

다중사용자 하향링크 환경에서 유한한 블록길이의 저지연 고신뢰 통신을 위한 에너지 효율 빔포밍 기술

박석환, 이훈*
전북대학교, *부경대학교

seokhwan@jbnu.ac.kr, *hlee@pknu.ac.kr

Energy-Efficient Beamforming Scheme for Finite-Blocklength URLLC in Multi-User Downlink

Seok-Hwan Park and Hoon Lee*
Jeonbuk National University, *Pukyong National University

요 약

저지연 고신뢰 통신 시스템에서는 채널코딩이 유한한 블록길이 내에서 동작하고 따라서 데이터 전송율이 디코딩 오류율 및 블록길이에 의존하는 함수로 표현된다. 본 논문은 다중사용자 하향링크 빔포밍 시스템에서 유한한 블록길이 및 디코딩 오류율 조건을 반영한 데이터 전송율을 가정하여, 에너지 효율을 최대화하기 위한 빔포밍 최적화 알고리즘을 제시 및 그 성능을 관찰한다.

I. 서 론

저지연 고신뢰 통신은 5 세대 이동통신 목표 중 하나로서 자율주행, 의료로봇 등 그 응용이 다양하다. 이러한 시스템 분석 및 설계에 있어, 무한한 채널코딩 블록길이를 가정한 기존의 Shannon 프레임워크 기반의 데이터 전송율 표현식을 그대로 사용할 수 없다. 유한한 블록길이를 가정할 경우, 0 에 한없이 가까운 디코딩 확률을 보장할 수 없다. 이에 블록길이 및 허용가능한 디코딩 오류율이 주어졌을 때 획득 가능한 데이터 전송율에 대한 근사식이 많은 문헌에서 유도 및 응용된 바 있다 [1].

본 논문은 다중사용자 하향링크 시스템에서 유한한 블록길이 및 디코딩 오류율을 가정하여 시스템의 에너지 효율을 최대화하기 위한 빔포밍 설계 알고리즘을 제안한다. 해당 문제는 non-convex 최적화 문제로 정의되지만, 적절한 epigraph 형태와 fractional programming (FP) 기법을 활용함으로써, 반복에 따라 부 최적해로 수렴하는 반복 알고리즘을 제시한다. 모의실험 결과를 통해 유한한 블록길이를 고려한 설계의 중요성을 확인한다.

II. 시스템 모델

M 개의 안테나를 사용하는 기지국이 K 개의 단일 안테나 모바일 사용자와 통신하는 다중사용자 하향링크 시스템을 고려한다. 저지연 고신뢰 통신을 위해 채널 코딩 블록길이 N 은 유한하다고 가정하고, 각 사용자 k 의 복호화 오류 확률은 $\varepsilon_k > 0$ 을 초과하지 않도록 제한한다. 표기의 편의를 위해 사용자 인덱스 집합 $\mathcal{K} = \{1, 2, \dots, K\}$ 을 정의한다.

사용자 k 의 하향링크 수신신호 y_k 는 $y_k = \mathbf{h}_k^H \mathbf{x} + z_k$ 와 같이 쓸 수 있다. $\mathbf{h}_k \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ 는

기지국과 사용자 k 사이의 채널 벡터, $\mathbf{x} \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ 는 기지국의 송신신호 벡터, $z_k \sim \mathcal{CN}(0, \sigma_z^2)$ 는 잡음신호를 나타낸다.

사용자 k 를 위한 데이터 신호를 $s_k \sim \mathcal{CN}(0, 1)$ 로 표기한다. 기지국은 간섭신호 제어를 위해 선형 빔포밍을 수행하여 송신신호 벡터 $\mathbf{x} = \sum_{k \in \mathcal{K}} \mathbf{v}_k s_k$ 을 생성한다. $\mathbf{v}_k \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ 는 신호 s_k 을 위한 빔포밍 벡터이며, 이들은 전력제한 조건 $\sum_{k \in \mathcal{K}} \|\mathbf{v}_k\|^2 \leq P$ 을 만족해야 한다.

사용자 k 의 신호대간섭잡음비(SINR)은 아래와 같다.

$$\gamma_k(\mathbf{v}) = \left| \mathbf{h}_k^H \mathbf{v}_k \right|^2 / \left(\sigma_z^2 + \sum_{l \in \mathcal{K} \setminus \{k\}} \left| \mathbf{h}_k^H \mathbf{v}_l \right|^2 \right).$$

주어진 상기 SINR 과 블록길이 N , 오류율 ε_k 에 대해 사용자 k 의 데이터 전송율은 아래와 같이 주어진다 [1].

$$R_k \approx f_{R,k}(\mathbf{v}) = \log_2(1 + \gamma_k(\mathbf{v})) - \frac{Q^{-1}(\varepsilon_k)}{\ln 2} \sqrt{\frac{V(\gamma_k(\mathbf{v}))}{N}}.$$

$Q^{-1}(\cdot)$ 는 가우시안 Q 함수의 역함수, $V(\gamma) = 1 - (1 + \gamma)^{-2}$ 는 채널 dispersion 을 의미한다.

상기 기술한 시스템의 에너지 효율 (EE)을 아래와 같이 정의한다 [2]–[4].

$$f_E(\mathbf{v}) = \min_{k \in \mathcal{K}} f_{R,k}(\mathbf{v}) / \left(P_C + \sum_{k \in \mathcal{K}} \|\mathbf{v}_k\|^2 \right).$$

P_C 는 RF 전송과 무관하게 상시 소비되는 전력을 나타낸다 [2].

III. 에너지 효율 URLLC 빔포밍 최적화

에너지 효율 $f_E(\mathbf{v})$ 을 최대화하기 위한 빔포밍 벡터들의 통합 최적화 문제를 아래와 같이 정의할 수 있다.

$$\underset{\mathbf{v}}{\text{maximize}} \quad f_E(\mathbf{v}) \quad \text{s.t.} \quad \sum_{k \in \mathcal{K}} \|\mathbf{v}_k\|^2 \leq P.$$

상기 최적화 문제는 목적함수 $f_E(\mathbf{v})$ 의 non-convexity 로 인해 최적해를 찾기 매우 어렵다. 그러나 epigraph 형태와 fractional programming (FP) 기법들[5]을 적용함으로써, 동일한 최적 해를 갖는 아래와 문제로 재정의할 수 있다.

$$\begin{aligned} & \underset{\mathbf{v}, R_{\min}, p_t, \lambda, \mathbf{c}, \alpha, \beta, \mathbf{d}, \mathbf{t}, \mathbf{u}}{\text{maximize}} \quad 2\lambda\sqrt{R_{\min}} - \lambda^2 p_t \\ & \text{s.t.} \quad R_{\min} \leq \log_2(1 + \alpha_k) - \frac{Q^{-1}(\epsilon_k)}{\ln 2} c_k, \quad k \in \mathcal{K}, \\ & \quad 2d_k c_k - d_k^2 \beta_k \geq 1/N, \quad k \in \mathcal{K}, \\ & \quad \beta_k \geq 1 - 2t_k + t_k^2(1 + \alpha_k)^2, \quad k \in \mathcal{K}, \\ & \quad \alpha_k \leq 2u_k \Re\{\mathbf{h}_k^H \mathbf{v}_k\} - u_k^2 g_{I,k}(\mathbf{v}), \quad k \in \mathcal{K}, \\ & \quad p_t \geq P_C + \sum_{k \in \mathcal{K}} \|\mathbf{v}_k\|^2, \\ & \quad \sum_{k \in \mathcal{K}} \|\mathbf{v}_k\|^2 \leq P, \\ & \quad c_k \geq 0, \quad k \in \mathcal{K}. \end{aligned}$$

$g_{I,k}(\mathbf{v}) = \sigma_z^2 + \sum_{l \in \mathcal{K} \setminus \{k\}} |\mathbf{h}_k^H \mathbf{v}_l|^2$ 는 사용자 k 에서의 간섭 및 잡음신호 총 전력을 나타낸다.

상기 재정의된 문제는 여전히 non-convex 문제이지만, 부가변수들 $\{\lambda, \mathbf{d}, \mathbf{t}, \mathbf{u}\}$ 을 고정할 경우 convex 문제가 된다. 또한 최적의 부가변수들은 아래 수식과 같이 closed-form 형태로 표현된다.

$$\begin{aligned} \lambda &= \sqrt{R_{\min}} / p_t, \quad d_k = c_k / \beta_k, \\ t_k &= 1 / (1 + \alpha_k)^2, \quad u_k = \Re\{\mathbf{h}_k^H \mathbf{v}_k\} / g_{I,k}(\mathbf{v}). \end{aligned}$$

따라서 반복횟수에 대해 목적함수가 단조적으로 증가하는 반복적 알고리즘을 쉽게 유도할 수 있다. 본 문제의 최대 에너지 효율은 유한한 값이므로, 해당 반복 알고리즘의 수렴성을 보장할 수 있다.

IV. 모의실험 결과

그림 1 은 $M = K = 4$, $\sigma_z^2 = 1$, $P = 10$, $P_C = 0.1$ 의 환경에서 블록길이 N 의 증가에 따른 에너지 효율 성능을 보여준다. 유한한 블록길이의 효과를 고려한 최적화는 그 과정이 복잡하지만, 그 효과를 고려하지 않은 기법 대비 현저한 성능 이득을 획득하는

것을 관찰할 수 있다. 그러나 N 이 증가할 수록, 그 효과는 감소한다.

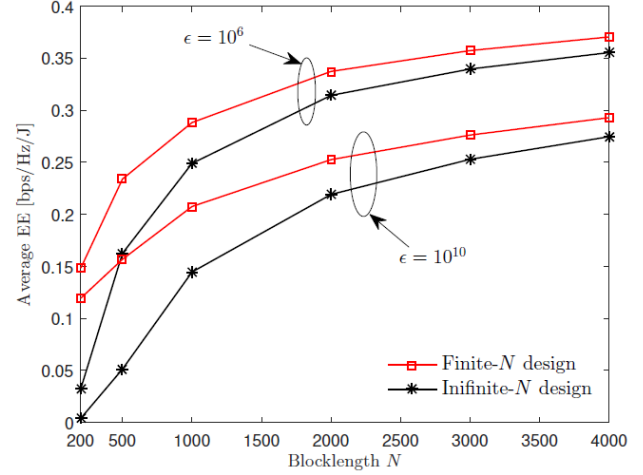


그림 1. 블록길이 증가에 따른 에너지 효율 성능

V. 결론

저지연 고신뢰 통신 시스템 응용을 위해, 다중사용자 하향링크 환경에서 유한한 코딩블록길이 및 허용가능한 디코딩 오류율을 고려한 에너지 효율 빔포밍 최적화 알고리즘을 제안하였다. 모의실험 결과를 통해 유한한 블록길이를 고려한 설계의 중요성을 관찰하였다.

ACKNOWLEDGMENT

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2021R1C1C1006557, 2019R1F1A1060648).

참고 문헌

- [1] X. Sun, S. Yan, N. Yang, Z. Ding, C. Shen, and Z. Zhong, "Short-packet downlink transmission with non-orthogonal multiple access," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 17, no. 7, pp. 4550-4564, Jul. 2018.
- [2] S.-H. Park, "Energy-efficient design of MIMO processing for two-tier wireless sensor networks," *IEEE Wireless Commun. Lett.*, vol. 6, no. 4, pp. 462-465, Aug. 2017.
- [3] J. Kim, D. Yu, S.-E. Hong and S.-H. Park, "Energy-efficient joint design of fronthaul and edge links for cache-aided C-RAN systems with wireless fronthaul," *Entropy*, vol. 21, no. 9, pp. 1-23, Sep. 2019.
- [4] H. Lee, H. S. Jang, and B. C. Jung, "Improving Energy Efficiency Fairness of Wireless Networks: A Deep Learning Approach," *Energies*, Vol. 12, No. 22, 4300, Nov. 2019.
- [5] K. Shen, W. Yu, L. Zhao and D. P. Palomar, "Optimization of MIMO device-to-device networks via matrix fractional programming: A minorization-maximization approach," *IEEE/ACM Trans. Netw.*, vol. 27, no. 5, pp. 2164- 2177, Oct. 2019.