

# 저해상도 데이터변환 기반 다중 안테나 시스템을 위한 전송률 분할 기반 다중접속 프리코딩 최적화 기법

박석준, 최진석, \*박정훈, †신원재

울산과학기술원 전기전자공학과, \*경북대학교 IT 대학, †아주대학교 전자공학과

{seokjunpark, jinseokchoi}@unist.ac.kr, jeonghun.park@knu.ac.kr, wjshin@ajou.ac.kr

## Rate-Splitting Multiple Access Precoding Optimization for Low-Resolution Data Converter-based MIMO Communications

Seokjun Park, Jinseok Choi, \*Jeonghun Park, and †Wonjae Shin

Dept. of Electrical Engineering, UNIST

\*College of IT Engineering, Kyungpook National University

†Dept. of Electrical and Computer Engineering, Ajou University

### 요 약

본 논문은 저해상도 DAC(Digital to Analog Converter) 다중 안테나 통신 시스템에서 전송 효율을 증진 시키기 위해 양자화로부터 발생하는 손실을 관리하고, 사용자들간의 간섭을 감소시켜 스펙트럼 효율(spectral efficiency, SE)을 극대화하는 전송률분할(Rate-Splitting Multiple Access, RSMA) 프리코딩 알고리즘을 제안한다. 해당 제안된 연구 알고리즘 성능 측정을 통하여 5G 무선통신 기술을 넘어 6G 무선통신 기술 발전에 도움이 될 수 있는 양자화된 전송률분할 통신을 동시에 고려하여, 높은 효율을 보여주는 고성능, 낮은 소비전력을 보여주는 저전력 알고리즘이라는 점에 높은 의의가 존재한다.

### I. 서 론

6G 무선통신 기술은 5G 통신 영역을 넘어 중요한 화두로 나타나고있다. 6G 무선 통신의 요구사항들을 충족시키기 위해 낮은 소비전력과 빠른 속도의 무선통신 기술은 필수적이다. 저해상도 DAC 를 사용함으로써 디바이스들의 소비전력을 급격하게 감소시킬 수 있다[1]. 6G 무선통신의 구현을 위한 다른 중요한 문제점으로서 높은 사용자간 간섭 (Inter-user Interference)이 존재한다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 전송률분할 방법(RSMA)은 무선통신 다중사용자-다중안테나(MU-MIMO) 시스템에서 높은 공간적 자유도와 스펙트럼 효율에 대해 높은 성능 향상으로 유망한 물리계층 전송방법으로 대두되었다 [2]. 따라서 6G 무선통신 분야 구현을 위해 소비전력을 낮추면서 스마트 디바이스의 증가로 인한 사용자간 간섭을 해결책은 필수적이며, 추후 우리가 해결해야하는 과제이다. 전형적인 프리코딩 기법 즉 Regularized zero-forcing (RZF) 등에 국한되어 있는 이전 연구들과는 다르게, 본 논문에서는 전송률분할 방법을 통해 sum SE 를 극대화하며 DAC 의 양자화 과정을 고려하여 저전력 및 고효율 프리코딩 알고리즘을 새롭게 제안한다.

### II. 본 론

본 논문에서는 하향링크 MU-MIMO 통신 시스템을 고려하며, 전체  $N$  개의 Access Point (AP) 안테나와  $K$  명의 사용자들로 이루어진다. AP 의 안테나들은 각 안테나에서  $n$  번째 안테나의 DAC 비트( $b_{DAC,n}$ )로 구성되어 있다.

프리코딩된 전송 신호벡터  $\mathbf{x} = \sqrt{P}\mathbf{f}_0s_c + \sqrt{P}\sum_{k=1}^K \mathbf{f}_k s_k$  이며, 여기서  $\mathbf{f}_0 \in \mathbb{C}^N$  와  $\mathbf{f}_k \in \mathbb{C}^N$  는 각각 공통 부분과 개인 부분에 해당하는 프리코더를 의미하고,  $P$  는 최대 전송 파워를 의미한다. 송신단 DAC 에서 양자화된 신호는  $Q(\mathbf{x}) \approx \mathbf{x}_q = \sqrt{P}\mathbf{\Phi}_{\alpha_{DAC}}\mathbf{f}_0s_c + \sqrt{P}\mathbf{\Phi}_{\alpha_{DAC}}\sum_{k=1}^K \mathbf{f}_k s_k + \mathbf{q}_{DAC}$  이며, 여기서  $Q(\cdot)$  는 스칼라 양자화기이며  $\mathbf{\Phi}_{\alpha_{DAC}} = \text{diag}(\alpha_{DAC,1}, \dots, \alpha_{DAC,N}) \in \mathbb{C}^{N \times N}$  와  $\mathbf{q}_{DAC} \in \mathbb{C}^N$  는 각각 양자화 손실 행렬과 양자화 잡음 벡터를 의미한다. 공통 스트림

은 모든 사용자들에게 해독가능하기 때문에 전체  $K$  명 사용자가 해독가능하게 설정되며, 모든 유저는 공통 스트림을 해독한 후 각 유저의 개인 스트림을 해독한다. AP 와 사용자들간 채널 매트릭스를  $\mathbf{H}^H \in \mathbb{C}^{K \times N}$  라 정의하며 송수신단자에서 완벽한 채널 정보를 가지고 있다고 가정한다 (perfect Channel State Information, perfect CSI).  $k$  번째 사용자가 가지는 채널을  $\mathbf{h}_k$  할 때,  $k$  번째 유저가 받는 baseband 신호는 다음과 같다:

$$y_{q,k} = \sqrt{P}\mathbf{h}_k^H \mathbf{\Phi}_{\alpha_{DAC}} \mathbf{f}_0 s_c + \sqrt{P}\mathbf{h}_k^H \mathbf{\Phi}_{\alpha_{DAC}} \mathbf{f}_k s_k + \sqrt{P} \sum_{i=1, i \neq k}^K \mathbf{h}_k^H \mathbf{\Phi}_{\alpha_{DAC}} \mathbf{f}_i s_i + \mathbf{h}_k^H \mathbf{q}_{DAC} + n_k.$$

여기서  $n_k \sim \mathcal{CN}(0, \sigma^2)$  는 AWGN 이다.

RSMA 의 해독 원리에 기반하여 [2], 각 모든 유저는 공통 스트림  $s_c$  을 Successive Interference Cancellation (SIC)로 해독 후 제거할 수 있다. 공통 스트림  $s_c$  는 모든 RSMA 유저들로부터 해독 가능해야 하기에  $s_c$  의 rate 는 모든 유저들의 공통 스트림 rate 의 최솟값이 되어야한다. 따라서, 받은 신호  $y_{q,k}$  을 기반으로 공통 스트림 spectral efficiency 는 다음과 같이 정의된다.

$$R_c = \min_{k \in \mathcal{K}} \left\{ \log_2 \left( 1 + \frac{P |\mathbf{h}_k^H \mathbf{\Phi}_{\alpha_{DAC}} \mathbf{f}_0|^2}{P \sum_{k=1}^K |\mathbf{h}_k^H \mathbf{\Phi}_{\alpha_{DAC}} \mathbf{f}_k|^2 + \mathbf{h}_k^H \mathbf{R}_{q_{DAC} q_{DAC}} \mathbf{h}_k + \sigma^2} \right) \right\} = \min_{k \in \mathcal{K}} \{R_{c,k}\}.$$

여기서  $\mathbf{R}_{q_{DAC} q_{DAC}} = \mathbf{\Phi}_{\alpha_{DAC}} \mathbf{\Phi}_{\beta_{DAC}} \text{diag}(\mathbb{E}[\mathbf{x}\mathbf{x}^H])$  이다.

공통 스트림을 해독 후 제거한 후,  $k$  번째 유저에 대한 spectral efficiency 는

$$R_k = \log_2 \left( 1 + \frac{P |\mathbf{h}_k^H \mathbf{\Phi}_{\alpha_{DAC}} \mathbf{f}_k|^2}{\sum_{i=1, i \neq k}^K |\mathbf{h}_k^H \mathbf{\Phi}_{\alpha_{DAC}} \mathbf{f}_i|^2 + \mathbf{h}_k^H \mathbf{R}_{q_{DAC} q_{DAC}} \mathbf{h}_k + \sigma^2} \right).$$

최종적으로, 정의된 spectral efficiency 와 전송 파워 제약조건을 기반으로 최적화 문제를 다음과 같이 구성된다.

$$\begin{aligned} & \underset{\mathbf{f}_0, \mathbf{f}_1, \dots, \mathbf{f}_K}{\text{maximize}} \quad R_c + \sum_{k=1}^K R_k = R_{\Sigma} \\ & \text{subject to} \quad \text{tr}(\mathbb{E}[\mathbf{x}_q \mathbf{x}_q^H]) \leq P. \end{aligned}$$

**알고리즘 1: Proposed Quantized Generalized Power Iteration for Rate-Splitting (Q-GPI-RS)**

1. **initialize:**  $\bar{\mathbf{w}}_0$
2. Set the iteration count  $t = 0$
3. **while**  $\|\bar{\mathbf{w}}_{t+1} - \bar{\mathbf{w}}_t\| > \epsilon$  &  $t \leq t_{\max}$  **do**
4.   Build  $\mathbf{A}_{\text{KKT}}(\bar{\mathbf{w}}_t)$  and  $\mathbf{B}_{\text{KKT}}(\bar{\mathbf{w}}_t)$
5.   Compute  $\bar{\mathbf{w}}_{t+1} = \mathbf{B}_{\text{KKT}}^{-1}(\bar{\mathbf{w}}_t) \mathbf{A}_{\text{KKT}}(\bar{\mathbf{w}}_t) \bar{\mathbf{w}}_t$
6.   Normalize  $\bar{\mathbf{w}}_{t+1} = \frac{\mathbf{B}_{\text{KKT}}^{-1}(\bar{\mathbf{w}}_t) \mathbf{A}_{\text{KKT}}(\bar{\mathbf{w}}_t) \bar{\mathbf{w}}_t}{\|\mathbf{B}_{\text{KKT}}^{-1}(\bar{\mathbf{w}}_t) \mathbf{A}_{\text{KKT}}(\bar{\mathbf{w}}_t) \bar{\mathbf{w}}_t\|}$
7.    $t \leftarrow t + 1$
8. **return**  $\bar{\mathbf{w}}_t$

해당 최적화 문제를 풀 수 있는 형태로 변형시켜 우리는 generalized power iteration (GPI) 방법을 적용한다 [2]. 우선,  $k$  번째 유저에 대한 가중치 된 프리코딩 벡터를  $\mathbf{w}_k = \Phi_{\text{DAC}}^{1/2} \mathbf{f}_k$  가정한다. 다음으로, 가중치 된 프리코딩 벡터들을 쌓아 가중치 된 프리코딩 행렬  $\mathbf{W} = [\mathbf{w}_0, \dots, \mathbf{w}_K]$  을 다음과 같이 만든 후 벡터화 시켜  $\bar{\mathbf{w}} = \text{vec}(\mathbf{W})$  로 구성한다. 우선,  $\mathbf{G}_k = (\Phi_{\text{DAC}}^{1/2})^H \mathbf{h}_k \mathbf{h}_k^H \Phi_{\text{DAC}}^{1/2} + \Phi_{\text{DAC}}^{1/2} \text{diag}(\mathbf{h}_k \mathbf{h}_k^H)$  로 가정을 한다. 해당 벡터를 응용하여 앞에서 정의한 각 전송률을 Rayleigh quotient form 으로 형성시킬 수 있다. 따라서,  $R_{c,k}$  와  $R_k$  는 각각  $\log_2 \left( \frac{\bar{\mathbf{w}}^H \mathbf{A}_{c,k} \bar{\mathbf{w}}}{\bar{\mathbf{w}}^H \mathbf{B}_{c,k} \bar{\mathbf{w}}} \right)$  와  $\log_2 \left( \frac{\bar{\mathbf{w}}^H \mathbf{A}_k \bar{\mathbf{w}}}{\bar{\mathbf{w}}^H \mathbf{B}_k \bar{\mathbf{w}}} \right)$  로 재구성된다. 여기서  $\mathbf{A}_{c,k} = \text{blkdiag}(\mathbf{G}_k, \dots, \mathbf{G}_k) + \mathbf{I}_{N(K+1)} \frac{\sigma^2}{P}$ ,  $\mathbf{B}_{c,k} = \mathbf{A}_{c,k} - \text{blkdiag} \left( (\Phi_{\text{DAC}}^{1/2})^H \mathbf{h}_k \mathbf{h}_k^H \Phi_{\text{DAC}}^{1/2} \mathbf{0}_N, \dots, \mathbf{0}_N \right)$ ,  $\mathbf{A}_k = \text{blkdiag} \left( \mathbf{G}_k - (\Phi_{\text{DAC}}^{1/2})^H \mathbf{h}_k \mathbf{h}_k^H \Phi_{\text{DAC}}^{1/2}, \mathbf{G}_k, \dots, \mathbf{G}_k \right) + \mathbf{I}_{N(K+1)} \frac{\sigma^2}{P}$ , 그리고  $\mathbf{B}_k = \mathbf{A}_k - \text{blkdiag} \left( \mathbf{0}_N, \dots, (\Phi_{\text{DAC}}^{1/2})^H \mathbf{h}_k \mathbf{h}_k^H \Phi_{\text{DAC}}^{1/2} \mathbf{0}_N, \dots, \mathbf{0}_N \right)$ . 게다가, min function 의 non-smooth 성질로 인한 어려움을 해결하기 위해 LogSumExp 방식[3]을 적용하여  $R_{c,k}$  의 근사값은

$$\min_{k \in \mathcal{K}} \{R_{c,k}\} \approx -\tau \ln \left( \sum_{k=1}^K \exp \left( -\frac{1}{\tau} R_{c,k} \right) \right).$$

여기서,  $\tau$ 가 0 으로 갈수록 근사의 정도가 점점 타이트해진다. 결론적으로, 최적화 문제가 다음과 같이 재구성 된다.

$$\begin{aligned} & \underset{\bar{\mathbf{w}}}{\text{maximize}} \ln \left( \sum_{k=1}^K \left( \frac{\bar{\mathbf{w}}^H \mathbf{A}_{c,k} \bar{\mathbf{w}}}{\bar{\mathbf{w}}^H \mathbf{B}_{c,k} \bar{\mathbf{w}}} \right)^{-\frac{1}{\tau \ln 2}} \right) + \frac{1}{\ln 2} \sum_{k=1}^K \ln \left( \frac{\bar{\mathbf{w}}^H \mathbf{A}_k \bar{\mathbf{w}}}{\bar{\mathbf{w}}^H \mathbf{B}_k \bar{\mathbf{w}}} \right) \\ & \text{subject to } \|\bar{\mathbf{w}}\| = 1. \end{aligned}$$

재구성된 목적함수를  $\mathcal{L} = \ln \lambda(\bar{\mathbf{w}})$ 라 새롭게 정의하고, 해당 목적함수는 비볼록(non-convex)한 성질로 인하여 기존 프리코딩 방식으로는 가장 높은 최적해(best local optimal solution)를 찾을 수 없다. 그러기에, 우리는 GPI 기법을 응용하여 가장 높은 최적해를 찾는 것을 목적으로 한다. 목적함수를  $\bar{\mathbf{w}}$ 에 대해 일계 편미분하여 최적화 조건을 구하면

$$\mathbf{B}_{\text{KKT}}^{-1} \mathbf{A}_{\text{KKT}}(\bar{\mathbf{w}}) \bar{\mathbf{w}} = \lambda(\bar{\mathbf{w}}) \bar{\mathbf{w}}.$$

다음 수식을 만족하는 고유벡터  $\bar{\mathbf{w}}$ 와 고유값  $\lambda(\bar{\mathbf{w}})$ 에 대하여  $\mathbf{B}_{\text{KKT}}^{-1} \mathbf{A}_{\text{KKT}}$  행렬의 비선형적인 고유값 문제로 고려된다. 따라서, 우리는 목적 함수를 만족시키는 최고의 고유 벡터(leading eigenvector)를 구하는 것은 목적 함수의 가장 높은 최적값을 찾을 수 있다.

따라서 우리가 제안한 GPI 기반 알고리즘을 통해서  $\lambda(\bar{\mathbf{w}})$ 를 최대화하는  $\bar{\mathbf{w}}$ 를 반복적으로 찾는다.  $t$  번째 iteration  $\bar{\mathbf{w}}_t$ 을 가중치 된 프리코딩이라고 가정을 한다. 해당 알고리즘은  $t$  번째 iteration 에서  $\mathbf{A}_{\text{KKT}}(\bar{\mathbf{w}}_t)$ 와  $\mathbf{B}_{\text{KKT}}(\bar{\mathbf{w}}_t)$ 을 만든다.  $\bar{\mathbf{w}}_{t+1}$ 와  $\bar{\mathbf{w}}_t$ 의 차가  $\epsilon$ 보다 크거나, 사전에 할당된 iteration 횟수보다 작을 때까지 계속 반복한다. 이 논문의 저널 버전[4]을 통하여 자세한 수식과

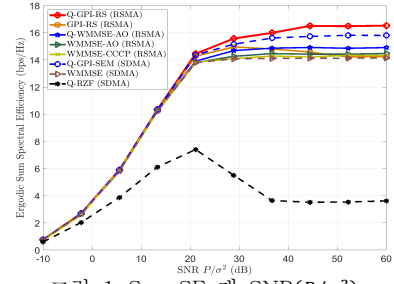


그림 1. Sum SE 대 SNR( $P/\sigma^2$ )

정이 작성되어 있다.

$\mathbf{h}_k$ 는  $k$ 유저의 공간 공분산 행렬  $\mathbf{R}_k = \mathbb{E}[\mathbf{h}_k \mathbf{h}_k^H]$ 에 의해 계산되고, 시뮬레이션에서  $\mathbf{R}_k$ 를 생성하기 위해 one-ring channel model 을 채택한다. AP는 6 개의 안테나를 가지고 DAC 비트( $b_{\text{DAC},n}$ )는 4 bits 으로 동일하며 유저 4 명에게 양자화된 프리코딩 신호를 보내며  $\sigma^2 = 1$ ,  $\epsilon = 0.01$ 으로 세팅하였다. 제안된 알고리즘의 성능 평가를 위해 다음의 제안된 알고리즘들과 함께 시뮬레이션 한다: (1) 제안된 알고리즘(RSMA), (2) 기존 GPI 알고리즘(RSMA), (3) 재구성 된 WMMSE-AO 알고리즘 (RSMA)[4], (4) 기존 WMMSE-AO 알고리즘 (RSMA), (5) 기존 WMMSE-CCCP 알고리즘 (RSMA) (6) 기존 GPI-SEM 알고리즘(SDMA) (7) 기존 WMMSE 알고리즘 (SDMA) (8) 전형적인 RZF.

그림 1 은 파워 제약  $P$ 가 변함에 따라 변화하는 Sum spectral efficiency 에 대한 성능을 보여주며, 기존에 제안된 기존방식보다 본 논문에서 제안된 알고리즘(Q-GPI-RS)이 모든 구간에서 가장 우수한 성능을 지니고 있음을 실험 결과로 입증한다.

### III. 결론

본 논문에서는 양자화된 하향링크 통신 시스템에서 스펙트럼 효율을 극대화하는 고효율, 저전력 프리코딩 기법 알고리즘을 제안하였다. 최적화 문제를 풀기 위하여 LogSumExp 을 통해 근사화 하였으며 GPI 방식을 응용하여 non-convex 한 문제를 해결하여 최적의 해를 구하였다. 제안된 RSMA 알고리즘은 높은 데이터 속도와 낮은 소비전력으로 미래의 무선통신 시스템에서 통신 효율을 높일 수 있는 유망한 해결책으로 적용될 수 있다.

### ACKNOWLEDGMENT

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단(No. 2021R1C1C1004438)의 지원을 받아 수행된 연구임.

### 참고 문헌

- [1] J. Zhang, L. Dai, X. Li, Y. Liu, and L. Hanzo, "On Low-Resolution ADCs in Practical 5G Millimeter-Wave Massive MIMO Systems," IEEE Trans. Commun., vol. 56, no. 7, pp. 205–211, Apr. 2018.
- [2] H. Joudeh and B. Clerckx, "Robust Transmission in Downlink Multiuser MISO Systems: A Rate-Splitting Approach," IEEE Trans. Signal Process., vol. 64, no. 23, pp. 6227–6242, Dec. 2016.
- [3] C. Shen and H. Li, "On the Dual Formulation of Boosting Algorithms," IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., vol. 32, no. 12, pp. 2216–2231, Mar. 2010.
- [4] S. Park, J. Choi, J. Park, W. Shin, and B. Clerckx, "Rate-Splitting Multiple Access for Quantized Multiuser MIMO Communications," <https://arxiv.org/abs/2208.00643>, 2022.