

네트워크 MIMO 에서 타겟으로의 데이터 유출을 고려한 빔포밍 및 양자화기 설계

김성준, 정성아*
경북대학교, *경북대학교

ksj6989@knu.ac.kr, *seongah@knu.ac.kr

Design of Beamforming and Quantizer in network MIMO : Considering Secrecy Rate

Seongjun Kim, Seongah Jeong*
Kyungpook National Univ., * Kyungpook National Univ.

요약

본 논문에서는 단일 도청자가 존재하는 네트워크 Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) 시스템의 다운링크 상황에서 도청자를 센싱하는 것을 목적으로, 시스템 보안 정보량의 최소 요구 조건을 만족시키고자 한다. 이를 위해, rank relaxation 및 Minorize Maximization (MM) 방법을 기반으로 한 최적의 빔포밍 및 프론트홀 양자화기를 설계할 수 있는 알고리즘을 제안한다.

I. 서론

최근 통신과 센싱을 통합하여 자원을 효율적으로 활용하고 상호 이익을 얻을 수 있는 Integrated Sensing and Communication (ISAC) 기술에 대해 다양한 연구가 진행되고 있다. 위 기술을 이용할 때 정보가 타겟에 유출될 수 있는 보안 문제가 발생할 수 있다 [1]. 따라서, 이에 대응하기 위한 여러 연구들이 진행되고 있다. 특히 [5]에서는 하나의 기지국 및 여러 유저와 단일 도청자가 존재하는 상황에서 사용자의 요구 통신량 및 센싱 성능을 만족시키면서 도청자의 signal-to-noise-ratio (SNR)를 최소화하는 알고리즘을 연구하였다.

본 논문에서는 송신 신호의 빔포밍 및 송/수신 양자화기를 공동으로 최적화하여, 보안성을 고려한 사용자의 요구 통신량을 만족하면서 통신 신호를 통해 추가적인 센싱 능력을 얻는 것을 목표로 문제를 정의하고 알고리즘을 제안한다. 특히 네트워크 Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) 구조를 통해 유연성을 확보하여 채널에 더욱더 최적화된 해를 찾을 수 있을 것으로 기대된다.

II. 본론

본 논문에서는 그림 1 과 같이 다운링크 상황에서 유저를 위한 통신 및 도청자를 위한 Multi-static rader 센싱을 고려한다. 이 시스템에는 N_t 개의 송신 RRH(Remote Radio Head), N_r 개의 수신 RRH, K 명의 단일 안테나 유저 그리고 하나의 도청자가 존재한다. 송신 RRH, 수신 RRH 및 유저의 집합은 각각 $\mathcal{N}_t = \{1, \dots, N_t\}$, $\mathcal{N}_r = \{1, \dots, N_r\}$ 및 $\mathcal{K} = \{1, \dots, K\}$ 로 정의한다. 모든 RRH 들은 Central Unit (CU)과 제한된 용량의 프론트홀로 연결되어 있고, 각각 N_a 개의 안테나로 이루어진 안테나 배열을 탑재하고 있다.

m 번째 심볼 시간 (Symbol time)에서 통신 심볼을 $\mathbf{s}[m] = [s_1[m], \dots, s_K[m]]^T \in \mathcal{C}^{K \times 1}$ 으로 정의한다. CU 에서는 이 신호를 빔포밍 및 압축 후 프론트홀을 통해 해당

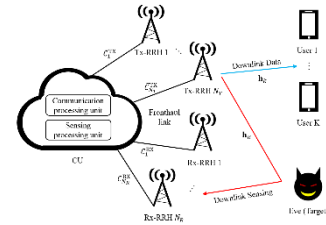


그림 1. 네트워크 MIMO 에서의 다운링크 시나리오

하는 RRH 로 전송한다. i 번째 송신 RRH 에서 채널을 통해 전송하는 신호는 $\mathbf{x}_i[m] = \tilde{\mathbf{x}}_i[m] + \mathbf{q}_i[m] = \mathbf{W}_i \mathbf{s}[m] + \mathbf{q}_i[m]$ 으로 표현할 수 있다. 여기에서 벡터 $\mathbf{q}_i[m]$ 는 양자화 잡음으로 $\mathbf{q}_i \sim \mathcal{CN}(\mathbf{0}, \mathbf{Q}_i)$ 의 분포를 가지고, 행렬 \mathbf{W}_i 는 i 번째 송신 RRH 를 위한 빔포밍 행렬이다. i 번째 송신 RRH 에서의 송신 파워는 $P_i(\mathbf{W}_i, \mathbf{Q}_i) = \text{tr}(\mathbf{W}_i \mathbf{W}_i^H + \mathbf{Q}_i)$ (5)로 나타낼 수 있다. 전송된 신호는 유저 및 도청자에서 수신되는데, 유저 k 에서 m 번째 심볼 시간에 수신한 신호는 $y_k[m] = \mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_k s_k[m] + \sum_{k' \in \mathcal{K} \setminus k} \mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_{k'} s_{k'}[m] + \mathbf{h}_k^H \mathbf{q}[m] + n_k[m]$ 로 나타낼 수 있다. 여기서 벡터 \mathbf{h}_k^H 는 모든 송신 RRH 에서 유저 k 사 이의 채널을 나타내고, n_k 는 가우시안 노이즈로 평균이 0 이고 분산은 σ_k^2 이다.

$\mathbf{q}[m]$ 는 양자화 잡음으로 $\mathbf{q}[m] = [\mathbf{q}_1^T[m], \dots, \mathbf{q}_{N_t}^T[m]]^T$ 와 같이 정의된다. 이와 비슷하게 도청자에서 수신한 신호는 $y_e[m] = \mathbf{h}_e^H \mathbf{w}_k s_k[m] + \sum_{k' \in \mathcal{K} \setminus k} \mathbf{h}_e^H \mathbf{w}_{k'} s_{k'}[m] + \mathbf{h}_e^H \mathbf{q}[m] + n_e[m]$ 로 나타낼 수 있다. \mathbf{h}_e^H 는 모든 송신 RRH 와 도청자 사 이의 채널, n_e 는 가우시안 노이즈이고 평균은 0, 분산은 σ_e^2 이다. 통신 성능에 대한 지표는 Secrecy rate 을 사용하는데 도청자에게 유출되는 정보량을 고려했을 때 유저에게 어느 정도의 통신량을 제공할 수 있는 지를 의미한다. 유저 k 에 대한 Secrecy rate 은 다음과 같이 나타낼 수 있다. $R_{\text{Sec},k}(\mathbf{W}, \mathbf{Q}) = \log(1 + \gamma_k(\mathbf{W}, \mathbf{Q})) - \log(1 + \gamma_e(\mathbf{W}, \mathbf{Q}))$ (1). 여기에서 $\gamma_k(\mathbf{W}, \mathbf{Q})$ 와 $\gamma_e(\mathbf{W}, \mathbf{Q})$ 는 수신 신호의 signal-to-interference-plus-noise-ratio (SINR)를 의미한다. 이는 각각 $|\mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_k|^2 / (\sum_{k' \in \mathcal{K} \setminus k} |\mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_{k'}|^2 + \mathbf{h}_k^H \mathbf{Q} \mathbf{h}_k + \sigma_k^2)$ 와 $|\mathbf{h}_e^H \mathbf{w}_k|^2 / (\sum_{k' \in \mathcal{K} \setminus k} |\mathbf{h}_e^H \mathbf{w}_{k'}|^2 + \mathbf{h}_e^H \mathbf{Q} \mathbf{h}_e + \sigma_e^2)$ 로 나타낼 수 있다 [2].

센싱 채널은 타겟에 의한 산란 효과 및 클러터로 나뉘진다. j 번째 수신 RRH 에서 받은 센싱 예코는 $\mathbf{r}_j[m] = \sum_{i=1}^{N_t} \mathbf{G}_{j,i}[m]\mathbf{x}_i[m] + \sum_{i=1}^{N_t} \mathbf{C}_{j,i}\mathbf{x}_i[m] + \mathbf{n}_j[m]$ 와 같이 표현할 수 있다. $\mathbf{G}_{j,i}$ 는 i 번째 송신 RRH 에서 도청자에서 반사되어 j 번째 수신 RRH 로 들어오는 타겟 산란 효과이고 $\mathbf{C}_{j,i}$ 는 도청자를 거치지 않고 들어오는 클러터이다. 수신 RRH 에서 받은 신호를 압축하여 CU 로 보내는데 이때 압축된 신호를 $\tilde{\mathbf{r}}_j[m] = \mathbf{r}_j[m] + \bar{\mathbf{q}}_j[m]$ 로 나타낼 수 있다. 여기에서 $\bar{\mathbf{q}}_j$ 는 양자화 잡음으로 $\bar{\mathbf{q}}_j \sim \mathcal{CN}(\mathbf{0}, \bar{\mathbf{Q}}_j)$ 의 분포를 가진다. \mathbf{n}_j 는 가우시안 노이즈이고 분포는 $\mathbf{n}_j[m] \sim \mathcal{CN}(0, \sigma_{r,j}^2 \mathbf{I}_{N_a})$ 를 따른다. 도청자의 유무 판별은 상관 시간 이내의 M 개의 심볼 시간동안 수신한 신호를 바탕으로 CU 에서 판단한다. 이때 CU 에서는 센싱 채널을 정확하게 알 수 있다고 가정한다. 본 논문에서 센싱에 대한 성능지표로 센싱 SINR 을 사용한다. 이는 다음과 같이 계산된다. $\gamma_s(\mathbf{W}, \mathbf{Q}, \bar{\mathbf{Q}}) = \text{tr}(\mathbf{G}(\mathbf{W}\mathbf{W}^H + \mathbf{Q})\mathbf{G}^H) / (\text{tr}(\mathbf{C}(\mathbf{W}\mathbf{W}^H + \mathbf{Q})\mathbf{C}^H) + \sum_{j=1}^{N_r} N_a \sigma_{r,j}^2 + \sum_{j=1}^{N_r} \text{tr}(\bar{\mathbf{Q}}_j))$ (2).

이 시스템에서는 제한된 용량의 프론트홀을 사용하기 때문에 이를 고려해서 압축해야한다. 송신 상황에서 요구되는 프론트홀의 통신량은 rate distortion theory 에 의해 [6] $C_i(\mathbf{W}_i, \mathbf{Q}_i) = \log \det(\mathbf{W}_i \mathbf{W}_i^H + \mathbf{Q}_i) - \log \det(\mathbf{Q}_i)$ (3)이고, 수신 상황에서 요구되는 통신량은 $C_j(\mathbf{W}, \mathbf{Q}, \bar{\mathbf{Q}}_j) = \log \det((\mathbf{G}_r + \mathbf{C}_r)(\mathbf{W}\mathbf{W}^H + \mathbf{Q})(\mathbf{G}_j + \mathbf{C}_j)^H + \sigma_{r,j}^2 \mathbf{I}_{N_a} + \bar{\mathbf{Q}}_j) - \log \det(\bar{\mathbf{Q}}_j)$ (4)이다 [3].

제안된 알고리즘의 목적은 제한된 송신 파워, 프론트홀 용량 및 일정 수준 이상의 Secrecy rate 를 만족하면서 센싱 SINR 를 최대화하는 것으로 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$P0: \max_{\mathbf{W}, \mathbf{Q}, \bar{\mathbf{Q}}} \gamma_s(\mathbf{W}, \mathbf{Q}, \bar{\mathbf{Q}}) \quad (6a)$$

$$R_{Sec,k}(\mathbf{W}, \mathbf{Q}) \geq \bar{R}_{Sec,k} \quad \forall k \in \mathcal{K} \quad (6b)$$

$$C_i(\mathbf{W}_i, \mathbf{Q}_i) \leq \bar{C}_i \quad \forall i \in \mathcal{N} \quad (6c)$$

$$C_j(\mathbf{W}, \mathbf{Q}, \bar{\mathbf{Q}}_j) \leq \bar{C}_j, \quad \forall r \in \mathcal{N} \quad (6d)$$

$$P_i(\mathbf{W}_i, \mathbf{Q}_i) \leq \bar{P}_i, \quad \forall i \in \mathcal{N} \quad (6e)$$

이 문제를 풀기 위해, 먼저 $\mathbf{V} = \mathbf{W}\mathbf{W}^H$ 를 통해 공분산 행렬을 만들고 이를 다시 선형 변환하여 새로운 변수로 표현하면 아래와 같이 문제를 재정의 할 수 있다 [4].

$$P2: \max_{\mathbf{\Gamma}, \mathbf{\Omega}, \bar{\mathbf{\Omega}}, \mathbf{z}} \gamma_s(\mathbf{\Gamma}, \mathbf{\Omega}) \quad (7a)$$

$$\bar{R}_{Sec,k}(\mathbf{\Gamma}, \mathbf{\Omega}, \mathbf{z}) \geq \bar{R}_{Sec,k} \quad \forall k \in \mathcal{K} \quad (7b)$$

$$C_i(\mathbf{\Gamma}_i, \mathbf{\Omega}_i) \leq \bar{C}_i \quad \forall i \in \mathcal{N}_t \quad (7c)$$

$$C_j(\mathbf{\Gamma}, \mathbf{\Omega}, \bar{\mathbf{\Omega}}_j, \mathbf{z}) \leq \bar{C}_j, \quad \forall r \in \mathcal{N}_r \quad (7d)$$

$$\bar{P}_i(\mathbf{\Gamma}, \mathbf{\Omega}_i, \mathbf{z}) \leq 0, \quad \forall i \in \mathcal{N}_t \quad (7e)$$

$$\mathbf{\Gamma}_k \geq 0, \text{rank}(\mathbf{\Gamma}_k) = 1, \forall k \in \mathcal{K} \quad (7f)$$

$$\Xi(\mathbf{\Gamma}, \mathbf{\Omega}, \bar{\mathbf{\Omega}}, \mathbf{z}) = 1 \quad (7g)$$

이때 제한 조건 (7g)의 함수는 $\Xi(\mathbf{\Gamma}, \mathbf{\Omega}, \bar{\mathbf{\Omega}}, \mathbf{z}) = \text{tr}(\mathbf{C}(\mathbf{\Gamma} + \mathbf{\Omega})\mathbf{C}^H) + \mathbf{z} \sum_{j=1}^{N_r} N_a \sigma_{r,j}^2 + \sum_{j=1}^{N_r} \text{tr}(\bar{\mathbf{\Omega}}_j)$ 로 정의된다. 조건

(7f)에 대해서 rank relaxation 를 적용하고 (7b), (7c), (7d)에 대해서 MM 방법을 적용하여 근사치에 대한 해를 반복적으로 얻어 최종적인 해를 구할 수 있다 [3].

III. 결론

본 논문에서는 빔포밍 및 프론트홀 양자화기를 최적화하여 시스템 보안 정보량을 만족시키면서 동시에 도청자에 대한 센싱 성능을 최대화하기 위해 문제를 제시하고, rank relaxation 기법 및 MM 방법을 이용하여 이를 풀기 위한 알고리즘을 제안하였다.

ACKNOWLEDGMENT

"이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임" (No. 2023R1A2C2005507)

참고 문헌

- [1] Z. Wei, F. Liu, C. Masouros, N. Su, and A. P. Petropulu, "Toward multifunctional 6G wireless networks: Integrating sensing, communication, and security," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 60, no. 4, pp. 65–71, Apr. 2022.
- [2] M. F. Hanif, L.-N. Tran, M. Juntti, and S. Glisic, "On linear precoding strategies for secrecy rate maximization in multiuser multiantenna wireless networks," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 62, no. 14, pp. 3536–3551, Jul. 2014.
- [3] S. Lee, J. Kang, S. Jeong, J. Kang, and S. Al-Araji, "Joint design of precoder and backhaul quantizer in cooperative cognitive radio networks," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 66, no. 2, pp. 1871–1875, Feb. 2017.
- [4] S. P. Boyd and L. Vandenberghe, *Convex optimization*. Cambridge university press, 2004.
- [5] N. Su, F. Liu, and C. Masouros, "Secure radar-communication systems with malicious targets: Integrating radar, communications, and jamming functionalities," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 20, no. 1, pp. 83–95, Jan. 2021.
- [6] T. M. Cover and J. A. Thomas, *Element of Information Theory*. New York, NY, USA: Wiley, 2006.