

Physical-Layer Security Performance of MIMO Cellular Downlink Networks with Potential Eavesdroppers

Min Kyu Oh, Woong Son, Bang Chul Jung

Dept. of Electronics Engineering, Chungnam National University

요약

본 논문에서는 다중 안테나를 탑재한 기지국과 이로부터 메시지를 수신할 수 있는 다수의 공인 사용자들(legitimate users)과 자신의 스케줄에 따라 도청여부를 결정하는 다수의 잠재 도청자들로 이루어진 다중 사용자 하향링크 네트워크에서의 물리계층 보안 아웃티지 확률 (secrecy outage probability, SOP)을 분석하였다. 기지국으로부터 방출된 참조신호를 이용하여 각 사용자들은 채널상태정보를 파악하고, 자신의 무선 채널이득이 피드백 임계치 이상일 경우에만 기지국으로 피드백한다. 기지국은 채널상태정보를 피드백한 사용자들 중 각 사용자에게 대응하는 최대비전송 (maximum ratio transmission, MRT) 빔포밍을 수행한다는 가정하에 무선 채널이득을 극대화할 수 있는 사용자를 선택하여 메시지를 송신한다. 모의실험을 통해, 기지국에서 최대비전송 빔포밍을 수행하는 경우가 단일 안테나 기지국일 경우보다 보안 아웃티지 성능이 우수하고, 피드백 임계치가 큰 값임에도 불구하고 사용자 수가 충분히 존재할 경우에는 모든 사용자가 피드백하는 경우와 거의 유사한 보안 아웃티지 성능을 달성하는 것을 확인하였다.

I. 서론

사물인터넷 기술의 발전에 따라 개인 정보 유출 우려에 대한 보안 문제들이 대두되고 있다. 특히, 도청 문제를 해결을 위해서 비용효율적인 물리계층보안 기술들이 현재 부상중이며, 관련 연구들이 활발히 진행중이다 [1]. 최근에는 도청자의 스케줄에 따라 도청여부를 결정하는 잠재 도청자를 수학적으로 정의하고 물리계층보안 성능을 분석한 연구가 발표되었다 [2]. 본 논문에서는 잠재 도청자가 존재할 경우에 기지국의 다중 안테나를 이용한 최대비전송 빔포밍 기술을 수행할 때, 기존 단일 안테나를 고려할 경우 [2]대비 보안 아웃티지 성능 향상을 확인하였다.

II. 최대비전송 빔포밍을 고려한 하향링크 네트워크

시스템 모델 및 보안 아웃티지 성능 분석

N_t 개의 안테나를 탑재한 하향링크 기지국과 단일 안테나를 탑재한 N_{MS} 개의 사용자와 N_E 개의 도청자가 존재하는 하향링크 네트워크를 고려한다. 기지국으로부터 $i \in \{1, 2, \dots, N_{MS}\}$ 번째 사용자까지의 무선 채널 벡터는 $\mathbf{h}_{MS,i} \in \mathbb{C}^{1 \times N_t}$ 이고, 각 성분은 $CN(0, \sigma_{MS}^2)$ 을 따른다. 유사하게 $j \in \{1, 2, \dots, N_E\}$ 번째 도청자까지의 무선 채널 벡터는 $\mathbf{h}_{E,j} \in \mathbb{C}^{1 \times N_t}$ 이고, 각 성분은 $CN(0, \sigma_E^2)$ 을 따른다. 모든 무선 채널 벡터 성분들은 독립항등분포이고, 통신 중 변하지 않는 준정적 상태를 가정한다. 기지국이 i 번째 사용자에게 메시지를 송신한다고 가정할 때, 기지국에서 $\mathbb{E}[\|\mathbf{s}_{MS,i}\|^2] = P$ 의 전력 제한을 만족하는 최대비전송 빔포밍으로 전처리된 송신 메시지 벡터는 $\mathbf{s}_{MS,i} = (\sqrt{P} \mathbf{h}_{MS,i}^H / \|\mathbf{h}_{MS,i}\|) \mathbf{s} \in \mathbb{C}^{N_t \times 1}$ 이다. i 번째 사용자와 j 번째 도청자에서의 수신 신호는 각각 다음과 같다.

$$\begin{aligned} r_{MS,i} &= \mathbf{h}_{MS,i} \mathbf{s}_{MS,i} + w_{MS,i} = \sqrt{P} \|\mathbf{h}_{MS,i}\| \mathbf{s} + w_{MS,i}, \\ r_{E,j} &= \mathbf{h}_{E,j} \mathbf{s}_{MS,i} + w_{E,j} = \left(\sqrt{P} \mathbf{h}_{E,j}^H \mathbf{h}_{MS,i} / \|\mathbf{h}_{MS,i}\| \right) \mathbf{s} + w_{E,j}. \end{aligned}$$

이때, $w_{MS,i}$ 와 $w_{E,j}$ 는 각각 i 번째 사용자와 j 번째 도청자에서의 열잡음으로 모두 $CN(0, N_0)$ 분포를 따른다. 기지국으로부터 참조신호를 수신한 사용자들은 유효 무선 채널이득이 $\|\mathbf{h}_{MS,i}\|^2 \geq \zeta_{MS}$ 를 만족하는 경우에만 메시지 수신을 위해 채널상태정보를 기지국으로 피드백한다. 이때, ζ_{MS} 는 피드백 임계치이며, $\zeta_{MS} = 0$ 일 경우에는 사용자들이 항상 피드백 (full feedback, FF)하고, $\zeta_{MS} > 0$ 일 경우에는 조건을 만족하는 일부 사용자만 피드백(opportunistic feedback, OF)한다. N_{MS} 개의 사용자들 중에서 피드백한 사용자들로 이루어진 집합을 $\mathcal{M}_{MS}$ 로 정의한다. 도청자들은 도청확률 $P_E \in [0, 1]$ 을 기반으로 도청을 수행하며, $P_E = 1$ 일 경우에는 모든 도청자들이 도청을 수행(full eavesdropping, FE)하고, $0 < P_E < 1$ 일 경우에는 일부 도청자들이 도청을 수행(random eavesdropping, RE)한다. N_E 개의 도청자들 중에서 도청을 수행하는 도청자들로 이루어진 집합을 $\mathcal{M}_E$ 로 정의한다. 위 시스템 모델에서 달성할 수 있는 보안 전송률과 보안 아웃티지 확률은 각각 다음과 같다.

$$\begin{aligned} R_s(\mathcal{M}_{MS}, \mathcal{M}_E) &= \max_{j \in \mathcal{M}_E} \left(\log_2 \left(\max_{i \in \mathcal{M}_{MS}} \left(\frac{1 + \Gamma_{MS,i}}{1 + \Gamma_{E,j}^{[i]}} \right) \right) \right), \\ P_{out} &= \Pr(R_s(\mathcal{M}_{MS}, \mathcal{M}_E) < R_0). \end{aligned}$$

이때, i 번째 사용자에서의 유효 수신대잡음비(signal to noise ratio)는 $\Gamma_{MS,i} = \rho \|\mathbf{h}_{MS,i}\|^2$, 기지국으로부터 선택된 i 번째 사용자에게 대응하는 최대비전송 빔포밍으로 전처리된 메시지가 송신된다는 가정하에 j 번째

도청자에서의 유효 수신대잡음비(signal to noise ratio, SNR)는 $\Gamma_{E,j}^{[i]} = \rho (\mathbf{h}_{E,j}^H \mathbf{h}_{MS,i} / \|\mathbf{h}_{MS,i}\|)^2$ 이며, $\rho = P/N_0$ 이다. 또한, 목표 보안 전송률은 R_0 [bps/Hz], $|\cdot|$ 는 집합의 성분 수를 의미한다. 최종적으로 기지국은 채널상태정보를 피드백한 사용자들 중에서 각 사용자에게 대응하는 최대비전송 빔포밍으로 전처리할 경우, 하향링크 전송률을 극대화할 수 있는 사용자를 선택하여 데이터 신호를 송신하며, 도청을 수행하는 도청자들에 의해 하향링크 송신 메시지가 도청된다.

III. 모의실험 결과 및 결론

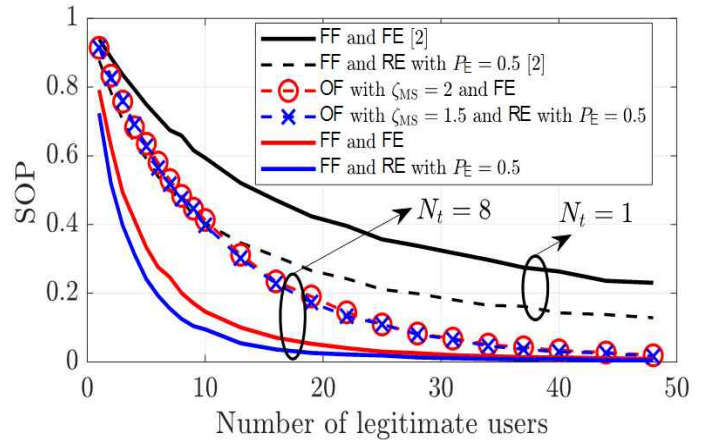


그림 1. 보안 아웃티지 확률 비교 결과

앞에서 고려한 시스템 모델에서 $\rho = 0$ [dB], $N_E = 5$, $\sigma_{MS}^2 = 1$, $\sigma_E^2 = 0.5$, $R_0 = 1$ [bps/Hz]일 경우, 사용자 수에 따른 보안 아웃티지 확률을 분석하였다. 기지국 안테나 수가 최대비전송 빔포밍을 수행하는 $N_t = 8$ 개일 경우 $N_t = 1$ 개일 경우 [2]보다 보안 아웃티지 확률이 우수하다. 또한 $\zeta_{MS} > 0$ 일 경우(OFF), 충분한 수의 사용자가 존재한다면 다중 사용자 다중화 이득으로 $\zeta_{MS} = 0$ 의 경우(FF)와 거의 유사한 보안 아웃티지 확률을 달성한다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 미래창조과학부 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No. NRF-2019R1A2B5B01070697).

참고 문헌

- [1] J. M. Hamamreh, H. M. Furqan, and H. Arslan, "Classifications and applications of physical layer security techniques for confidentiality: A comprehensive survey," *IEEE Commun. Survey & Tuts.*, vol. 21, no. 2, pp. 1773–1828, 2nd Quart. 2019.
- [2] W. Son, H. Nam, W.-Y. Shin and B. C. Jung, "Secrecy outage analysis of multi-user downlink wiretap networks with potential eavesdroppers," *IEEE Systems Journal*, early access, Jul. 2020.