

# 셀프리 ISAC 네트워크에서의 이동형 도청자 센싱 기반 보안 통신에 관한 연구

홍종혁, 이시현\*

한국과학기술원 전기및전자공학부

jonghyukm41@kaist.ac.kr, \*sihyeon@kaist.ac.kr

## Sensing-Aided Secure Communications Against a Mobile Eavesdropper in Cell-Free ISAC Networks.

Hong Jong-Hyuk, Lee Si-Hyeon\*

School of Electrical Engineering, KAIST

### 요약

본 논문은 셀프리 ISAC 환경에서 이동형 도청자를 고려한 통합 센싱·보안 통신 프레임워크를 제안하고, 확장 칼만 필터 기반 도청자 추적 하에서 센싱 범과 통신 범을 공동 최적화한다. 도청자 위치 추정 오차로 인한 채널 불확실성을 테일러 선형 근사로 모델링하고, 센싱 공분산 제약 하에서 보안 합 전송률을 최대화 문제를 수립한다. 비볼록 문제는 준정부호 완화,  $S$ -절차, 슈어 보수 기법을 통해 해결하며, 시뮬레이션 결과 센싱 제약에 따른 도청자 추적 정확도와 보안 전송률 간 트레이드오프를 확인한다.

### I. 서 론

차세대 무선 네트워크에서 통합 센싱 및 통신(ISAC) 기술은 동일한 주파수 차원과 하드웨어를 공유하여 통신과 센싱을 동시에 수행하는 핵심 기술로 주목받고 있다[1]. 이러한 통합 시스템에서 신뢰성 있는 센싱을 달성하기 위해 칼만 필터 기반 추적 기법이 널리 활용된다. 그러나 기존의 선형 칼만 필터는 실제 무선 환경에서 나타나는 비선형 동적 특성을 충분히 반영하지 못하는 한계가 있다. 이에 따라 비선형 시스템을 국소적으로 선형화하여 추적을 수행하는 확장 칼만 필터가 효과적인 대안으로 활용되고 있다[2]. 한편, ISAC 환경에서는 센싱 대상이 잠재적인 도청자로 작용할 수 있어 물리계층 보안 문제가 발생한다. 특히 다수의 분산된 접속점이 협력하는 셀프리 구조에서는 넓은 커버리지와 높은 공간 분해능을 확보할 수 있으나, 이동형 도청자로 인한 보안 취약성이 동시에 증폭될 수 있다[3]. 본 논문에서는 셀프리 환경에서 확장 칼만 필터를 이용해 이동형 도청자를 추적하고, 위치 추정 오차를 고려하여 보안 합 전송률을 최대화하는 통합 센싱·보안 통신 프레임워크를 제안한다.

### II. 본 론

그림 1 과 같이, 본 논문에서는 자기간섭 소거가 가능한 접속점  $M_t$  개와 센싱 수신기  $M_r$  개, 단일 안테나 사용자  $K$  명, 그리고 센싱 대상(잠재적 도청자)로 구성된 셀프리 ISAC 통신 환경을 고려한다. 모든 접속점과 센싱 수신기는 이상적인 백홀을 통해 중앙처리장치와 연결되어 공동 처리가 가능하다고 가정한다[2-3]. 짧은 시간 슬롯  $l$  동안 채널은 준정적이라고 가정하며[2], 각 슬롯에서는 상태 예측, 사전 추정치 기반 도청자 채널 구성, 추정 채널을 이용한 신호 송신, 센싱 관측값을 이용한 보정 수행의 네 단계가 반복된다. 이와 같은

폐루프 설계를 통해 도청자 이동을 지속적으로 따라가며, 센싱 성능 제약  $\Gamma_{th}$ 를 조절하여 센싱 - 보안 통신 성능 간 트레이드오프를 조절할 수 있다. 또한 각 접속점과 센싱 수신기는  $N$  개의 소자를 갖는 균일 선형 배열을 탑재하며, 배열과 사용자는 모두  $xy$  평면에 위치함을 가정한다.

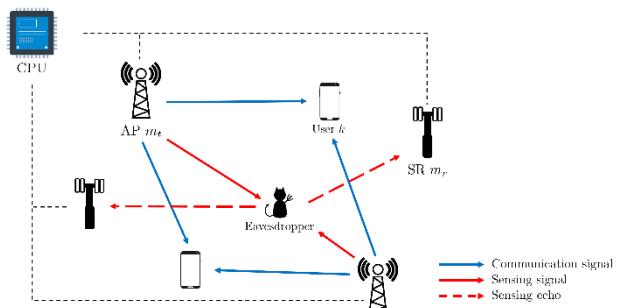


그림 1. 시스템 모델

본 논문에서는 사용자 채널로 가시선 및 비가시선이 혼재된 라이시안 페이딩 모델을 적용하여, 도청자 채널은 도청자가 더 유리한 링크를 선택하려는 최악의 보안 시나리오를 고려하여 가시선 기반 모델을 사용한다. 접속점  $m_t$ 에서 사용자  $k$ 로의 채널은 다음과 같이 정의된다.

$$\mathbf{h}_{m_t,k} = \sqrt{\frac{\beta_0}{d_{m_t,k}^2}} \left( \sqrt{\frac{\kappa}{\kappa+1}} \mathbf{h}_{m_t,k}^{LoS} + \sqrt{\frac{1}{\kappa+1}} \mathbf{h}_{m_t,k}^{NLoS} \right)$$

여기서  $\beta_0$ ,  $d_{m_t,k}$ ,  $\kappa$ ,  $\mathbf{h}_{m_t,k}^{LoS}$ ,  $\mathbf{h}_{m_t,k}^{NLoS}$ 는 각각 기준 거리에서의 경로 감쇄 이득, 접속점과 사용자 간의 거리, 라이시안  $K$ -계수, 조향 벡터, 비가시선 성분을 의미한다.

사용자는 위치가 고정되어 완벽한 채널 추정이 가능하다고 가정한다. 반면, 도청자는 위치가 지속적으로 변동하므로 확장 칼만 필터를 통해 위치를 추적해야 한다. 시간 슬롯  $t$ 에서의 접속점  $m_t$ 에서 도청자로의 채널은 다음과 같이 정의된다. 편의상 시간 슬롯 첨자는 제거하여 서술한다.

$$\mathbf{h}_{m_t,e}(\mathbf{q}_e) = \sqrt{\frac{\beta_0}{d_{m_t,e}^2}} \mathbf{h}_{m_t,e}^{LoS}$$

여기서  $\mathbf{q}_e$ ,  $d_{m_t,e}$ ,  $\mathbf{h}_{m_t,e}^{LoS}$ 는 각각 도청자의 위치 벡터, 접속점과 도청자 간의 거리, 조향 벡터를 의미한다. 이때 추정된 위치와 실제 위치 사이의 오차로 인해 채널 불확실성이 발생한다. 이를 테일러 급수 전개를 통해 선형 근사하면, 채널 오차는 위치 오차에 대한 함수로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\Delta \mathbf{h}_{m_t,e} = \mathbf{h}_{m_t,e}(\mathbf{q}_e) - \mathbf{h}_{m_t,e}(\hat{\mathbf{q}}_e) \approx \nabla \mathbf{h}_{m_t,e}^T(\hat{\mathbf{q}}_e) \Delta \mathbf{q}_e$$

확장 칼만 필터의 예측 과정에서 도출된 공분산 행렬은 도청자의 위치 추정 오차 범위를 나타내므로, 이를 감지 성능의 평가 지표로 활용함과 동시에 채널 오차의 경계값 설정에 사용한다. 지면 관계상 상세한 유도 과정은 생략한다.

위 모델을 바탕으로, 센싱 빔과 통신 빔을 동시에 설계하여 보안 합 전송률을 최대화하는 문제를 다음과 같이 수립할 수 있다.

$$\begin{aligned} & \max_{\mathbf{w}} \sum_{k=1}^K R_{sec,k} \\ \text{s.t. } & \|\mathbf{w}_{m_t,0}\|^2 + \sum_{k=1}^K \|\mathbf{w}_{m_t,k}\|^2 \leq P_{\max}, \forall m_t \\ & \text{trace}(\Sigma) \leq \Gamma_{\text{th}} \end{aligned}$$

여기서  $\mathbf{w}$ 는 모든 빔포밍 벡터들의 집합,  $R_{sec,k}$ 는 사용자  $k$ 의 보안 전송률,  $\mathbf{w}_{m_t,0}$ 은 접속점  $m_t$ 에서의 센싱 빔포밍 벡터,  $\mathbf{w}_{m_t,k}$ 는 접속점  $m_t$ 에서 사용자  $k$ 로의 통신 빔포밍 벡터,  $P_{\max}$ 는 각 접속점의 최대 송신 전력,  $\Sigma$ 는 확장 칼만 필터의 공분산을 의미한다. 해당 문제는 비볼록성으로 인해 직접적인 해 도출이 어렵다. 따라서 본 연구에서는 준정부호 완화,  $S$ -절차, 슈어 보수 기법을 적용하여 문제를 처리 가능 형태로 바꾸어 효율적인 알고리즘을 설계한다.

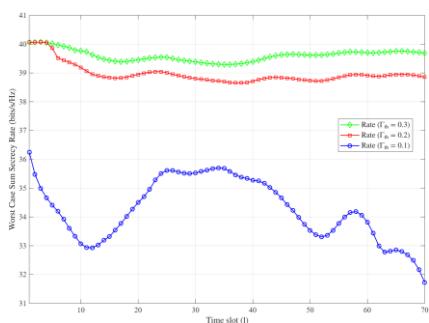


그림 2. 센싱 제약에 따른 보안 합 전송률

현실적인 시스템 파라미터를 바탕으로 제안 기법의 성능을 시뮬레이션 하였다. 그림 2는 센싱 성능 제약 값에 따른 보안 합 전송률의 시간 슬롯별 변화를

나타낸다. 센싱 제약이 강화될수록 통신 전력 여유가 감소해 보안 합 전송률이 저하되며, 완화 시 그 반대의 경향을 보인다.

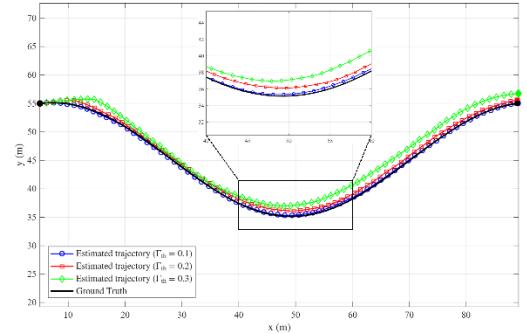


그림 3. 센싱 제약에 따른 도청자 추적 궤적 변화

그림 3은 센싱 성능 제약 값에 따른 도청자 추적 궤적의 변화를 나타낸다. 센싱 제약을 강화할수록 위치 추정 오차가 감소하여 실제 궤적에 근접하게 되는 것을 확인할 수 있다. 그림 2와 3의 결과로부터 센싱 제약 강화 시 센싱 정확도는 향상되나 보안 합 전송률은 감소하고, 제약 완화 시 그 반대 경향이 나타나 센싱 성능과 보안 통신 성능 간의 트레이드오프가 확인된다.

### III. 결 론

본 논문에서는 셀프리 ISAC 환경에서 이동형 도청자를 고려한 통합 센싱·보안 통신 프레임워크를 제안하였다. 센싱 신호를 이용해 확장 칼만 필터 기반으로 도청자를 추적하고, 추정 공분산을 위치 불확실성 지표로 활용하여 채널 오차를 모델링하였다. 이를 바탕으로 센싱 및 통신 빔을 공동 설계하여 보안 합 전송률을 최대화하는 문제를 수립하고, 준정부호 완화와  $S$ -절차, 슈어 보수 기법을 통해 효율적으로 해결하였다. 시뮬레이션 결과, 센싱 제약에 따라 센싱 - 보안 통신 성능 간 트레이드오프가 존재함을 확인하였다.

### ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원(No. RS-2024-00360387, 기여율 50%), 6G·클라우드 리더십구축을 위한 교육 연구 오픈 허브(IITP-2026-RS-2024-00428780, 기여율 50%)의 지원을 받아 수행된 연구임.

### 참 고 문 헌

- [1] He, Zhenyao, et al. "Full-duplex communication for ISAC: Joint beamforming and power optimization." *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* 41.9 (2023): 2920-2936.
- [2] Zhong, Jincheng, et al. "Joint Beamforming Design and Trajectory Optimization for UAV-Enabled Cell-Free ISAC MIMO Systems." *IEEE Communications Letters* (2025).
- [3] Ren, Zixiang, et al. "Secure cell-free integrated sensing and communication in the presence of information and sensing eavesdroppers." *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* (2024).