

사용자 측에서의 센싱-통신 결합을 위한 공동 파일럿 설계에 관한 연구

한준택, 박정훈*

연세대학교

jthan1218@yonsei.ac.kr, *jhpark@yonsei.ac.kr

A Study on the Coordinated Pilot Design for Joint Channel Estimation and Sensing: Towards User-side Integrated Sensing and Communication systems

Jun Taek Han, Jeong Hun Park*

Yonsei Univ.

요약

본 논문은 사용자 단말이 센싱을 수행하는 분산형 구조에서 통신과 센싱을 동시에 고려하기 위한 공동 파일럿 설계 기법을 제안한다. 기존에는 기지국에서만 타겟 센싱을 수행하는 방식을 주로 연구하였으나, 기지국과 타겟 간의 직접적인 LoS(Line-of-Sight) 채널이 확보되지 못할 경우 센싱 성능이 저하되는 문제가 발생한다. 이를 극복하기 위해, 본 논문은 상향링크 SRS(Sounding Reference Signal) 신호를 센싱에도 활용함으로써 사용자 측에서 센싱 기능을 수행하는 방안을 제시한다. 이를 통해 다중셀 환경에서 발생하는 파일럿 오염 공격 문제에 대응하면서도, 부엽 억제를 통해 센싱 성능을 높일 수 있다. 제안된 통합 성능 지표는 통신 환경에서는 채널 추정을 위한 평균 제곱 오차, 센싱 측면에서는 가중치가 적용된 부엽 레벨로 구성된다. 해당 지표를 동시에 최적화하기 위해 분수형 최적화와 역행렬 연산 제거를 통한 가속화 알고리즘을 제시하며, 실험 결과를 통해 유연한 가중치 조절로 통신 및 센싱 성능을 개선할 수 있음을 확인하였다.

I. 서론

최근 무선 통신 시스템에서 통합 센싱 및 통신(ISAC, Integrated Sensing and Communication) 기술이 중요한 학문으로 떠오르고 있다. [1]-[4] 대부분의 연구는 기지국 중심으로 센싱과 통신을 통합하는 구성을 제안해왔다. 그러나, 기지국과 타겟 간에 직접적인 LoS 채널이 형성되지 않는 경우 센싱 성능 저하가 불가피하다는 문제가 제기되었다.

이에 본 논문은 사용자 단말이 능동적으로 센싱에 참여하여 기지국이 놓치는 타겟 정보를 보완하는 접근 방안을 제시한다. 구체적으로, 상향링크 SRS 파일럿 신호를 센싱 목적으로도 활용하는 기법을 연구한다. 이를 통해 다중셀 환경에서 발생하는 파일럿 오염 공격 문제를 완화하고, 동시에 부엽 억제를 통한 센싱 성능 개선 효과를 얻고자 한다.

II. 본론

본 절에서는 사용자 측 센싱-통신 결합을 위한 공동 파일럿 신호 설계와, 이를 통해 통합 성능을 최적화할 수 있는 기법을 다룬다.

1. 시스템 모델

다중셀 시나리오를 고려하며, 각 셀은 대규모 다중 안테나 기지국을 보유한다고 가정한다. [5] 상향링크 다중셀 환경에서 통신 채널 추정을 위해 사용자 단말이 전송하는 파일럿 신호는 주변 셀에 간섭을 일으키고, 파일럿 오염 공격으로 인해 수신 신호에 노이즈 및 간섭 성분이 혼합된다. 이를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\mathbf{Y}_l = \sum_{(i,j)} \mathbf{h}_{lij} \phi_{ij}^T + \mathbf{Z}_l$$

2. 통합 성능 정의

통신 성능은 채널 추정을 위한 평균 제곱 오차(MSE)를 사용한다. 간소

화된 형태의 평균 제곱 오차는 다음과 같이 표현된다.

$$\text{MSE}_{lk} = M\beta_{lk} - M\beta_{lk}^2(\phi_{lk}^H D_l^{-1} \phi_{lk})$$

한편, 센싱 환경에서는 주엽 외 부엽을 줄이는 것이 센싱의 성능을 올리는 중요한 역할을 한다. 이를 위해 가중치가 적용된 WISL은 다음과 같이 정의한다.

$$\text{WISL} = \sum_{k=1}^{\tau-1} w_k |r_k|^2, \text{ where } r_k = \sum_{n=1}^{\tau-k} x_n^* x_{n+k}$$

3. 파일럿 신호 설계 및 최적화 문제

본 논문에서는 채널 추정을 위한 통신 성능과 부엽 억제를 위한 센싱 성능을 통합적으로 고려하여 다음과 같은 목적 함수를 최대화하는 문제를 구성한다.

$$\text{Maximize}_{(l,k)} \sum \alpha_{lk} \beta_{lk}^2 (\phi_{lk}^H D_l^{-1} \phi_{lk}) - \sum_{(l,k)} \text{WISL}_{lk}$$

해당 성능을 최대화하기 위한 여러 최적화 기법이 존재하지만, [6]-[9] 여기서는 분수형 최적화를 고려한다. 분수형 최적화를 적용하려면 먼저 이차 변환(Quadratic Transform)이 선행된다. [10], [11] 이차 변환이라, 여러 분수꼴이 합쳐진 형태에서도 분모-분자 구조를 분리하고, 반복적인 최적화가 가능한 형태로 문제를 재구성하게 된다. 이 때, 각 분모-분자 항에 보조변수가 도입되며, 이는 행렬 형태에서도 적용 가능하다. 따라서 이차 변환을 통해 전체 문제를 다음과 같이 재구성할 수 있다.

$$\text{Maximize}_{(l,k)} \sum \alpha_{lk} (2\beta_{lk}^2 \text{Re}\{\lambda_{lk}^H \phi_{lk}\} - \lambda_{lk}^H D_l \lambda_{lk}) - \sum_{(l,k)} \text{WISL}_{lk}$$

센싱 성능을 담당하는 부엽 성능은 이차 형식으로 정리한 후, 분수형 최적화와 2차 테일러 전개를 활용하여 역행렬 연산을 없앰으로써 알고리즘의 속도를 가속한다. 구체적으로, 2차 테일러 전개를 통해 부가적인 대리

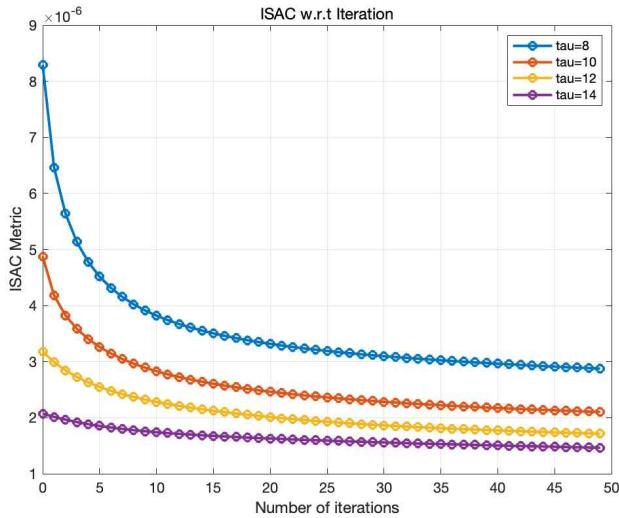
함수를 정의하고, 분수형 최적화의 특성상 한 변수만을 업데이트하고 나머지 변수를 고정하는 방식을 번갈아 적용한다. 두 에르미트 행렬에 대해 다음과 같은 부등식이 성립한다.

$$\mathbf{x}^H \mathbf{L} \mathbf{x} \leq \mathbf{x}^H \mathbf{K} \mathbf{x} + 2\operatorname{Re} \{ \mathbf{x}^H (\mathbf{L} - \mathbf{K}) \mathbf{z} \} + \mathbf{z}^H (\mathbf{K} - \mathbf{L}) \mathbf{z}$$

따라서, 이 부등식을 이용하여 해당 행렬의 가장 큰 고유값을 얻어 단순한 행렬을 생성하면 역행렬 없이 알고리즘을 반복하게 된다. 이를 반복하면 궁극적으로 통신과 센싱 성능이 모두 개선되는 최적의 파일럿 신호를 얻게 된다.

4. 성능 평가

통신에서의 최소 제곱 오차와 센싱에서의 가중치가 적용된 부엽 성능 사이의 가중치를 적절하게 조절함으로써 부엽 억제 수준과 채널 추정 정확도의 관계를 확인할 수 있다. 다중셀 환경에서의 제안 기법을 사용하면, 다른 셀에서 유발되는 파일럿 오염 공격을 줄이면서도 부엽 역시 동시에 억제가 가능하므로 통신과 센싱 성능이 모두 개선되는 것을 확인하였다.



위 실험에서 안테나 수는 100개, 셀 수는 7개, 각 셀당 사용자 수는 6명으로 설정하였다. 이후, 파일럿 신호의 길이를 변화시키며, 센싱-통신 결합 성능을 분수형 최적화 과정의 각 이터레이션마다 측정하고 이를 플롯하였다. 반복이 진행됨에 따라 성능이 점진적으로 개선되는 양상을 확인할 수 있었다. 참고로, 본 문제는 목적함수를 최대화하는 형태로 형성되었으나, 실제로는 평균 제곱 오차와 부엽 수준이 작을수록 바람직하므로, 수치가 감소할수록 더 우수한 결과임을 의미한다. 또한 주목할 만한 점은, 파일럿 신호의 길이가 길어질수록 설계의 정밀도가 향상되어 통신 및 센싱 성능이 함께 개선된다는 것이다.

III. 결론

본 논문에서는 기존에 기지국 관점으로만 다루어지던 센싱-통신 결합 문제를 사용자 측으로 확장하여, 상향링크 SRS 파일럿을 센싱에 활용할 수 있는 기법을 제시하였다. 이를 통해 기지국과 타겟 간에 LoS 채널이 확보되지 않는 상황에서도 효율적으로 타겟을 센싱할 수 있다는 장점을 확인하였다. 더 나아가, 분수형 최적화와 2차 테일러 전개를 통한 역행렬 연산 제거로 알고리즘의 연산량을 줄이고, 다중셀 파일럿 오염 공격 문제에도 대응 가능함을 보였다. 실험 결과, 평균 제곱 오차와 부엽 수준을 통합적으로 고려함으로써 사용자 단말이 참여하는 분산 센싱-통신 결합 구조가 향후 무선 환경에서 유망한 방법이 될 것으로 기대한다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2025년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. RS-2024-00397216, (총괄1-세부1) Upper-mid Band Extreme massive MIMO(E-MIMO) 시스템 기술 개발)

참고 문헌

- [1] J. Choi, J. Park, N. Lee and A. Alkhateeb, "Joint and Robust Beamforming Framework for Integrated Sensing and Communication Systems," in *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 23, no. 11, pp. 17602–17618, Nov. 2024.
- [2] J. Park *et al.*, "Rate-Splitting Multiple Access for 6G Networks: Ten Promising Scenarios and Applications," in *IEEE Network*, vol. 38, no. 3, pp. 128–136, May 2024.
- [3] N. Kim, J. Han and J. Park, "Integrated Sensing and Communications in FDD MIMO Without CSI Feedback: Towards FDD MIMO ISAC," *2024 22nd International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc, and Wireless Networks (WiOpt)*, Seoul, Korea, Republic of, 2024.
- [4] E. Choi, S. Park, J. Choi, J. Park and N. Lee, "Beamforming Optimization for Integrated Sensing and Communication Systems with SCNR Consideration," *2024 22nd International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc, and Wireless Networks (WiOpt)*, Seoul, Korea, Republic of, 2024.
- [5] J. Park, N. Lee and R. W. Heath, "Cooperative Base Station Coloring for Pair-Wise Multi-Cell Coordination," in *IEEE Transactions on Communications*, vol. 64, no. 1, pp. 402–415, Jan. 2016.
- [6] J. Choi and J. Park, "Sum Secrecy Spectral Efficiency Maximization in Downlink MU-MIMO: Colluding Eavesdroppers," in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 70, no. 1, pp. 1051–1056, Jan. 2021.
- [7] J. Park and R. W. Heath, "Multiple-Antenna Transmission With Limited Feedback in Device-to-Device Networks," in *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 5, no. 2, pp. 200–203, April 2016.
- [8] D. Kim, J. Choi, J. Park and D. K. Kim, "Max-Min Fairness Beamforming With Rate-Splitting Multiple Access: Optimization Without a Toolbox," in *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 12, no. 2, pp. 232–236, Feb. 2023.
- [9] J. Choi and J. Park, "MIMO Design for Internet of Things: Joint Optimization of Spectral Efficiency and Error Probability in Finite Blocklength Regime," in *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 8, no. 20, pp. 15512–15521, 15 Oct. 2021.
- [10] K. Shen, H. V. Cheng, X. Chen, Y. C. Eldar and W. Yu, "Enhanced Channel Estimation in Massive MIMO via Coordinated Pilot Design," in *IEEE Transactions on Communications*, vol. 68, no. 11, pp. 6872–6885, Nov. 2020.
- [11] H. Yun, J. Han, K. Shen, and J. Park, "Uplink Coordinated Pilot Design for 1-bit Massive MIMO in Correlated Channel", arXiv preprint, arXiv:2502.13429, 2025. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2502.13429>.