

단일 샘플 가시선 경로 검출 알고리즘

박한영, 최지웅

대구경북과학기술원 전기전자컴퓨터공학과

{prkhnyng, jwchoi}@dgist.ac.kr

Single-Sample Line-of-Sight Path Detection Algorithm

Hanyoung Park and Ji-Woong Choi

Department of Electrical Engineering & Computer Science,
Daegu Gyeongbuk Institute of Science and Technology (DGIST)

요약

무선 통신에서는 여러 유저들에게 동시에 원활하고 효율적인 서비스를 지원하기 위해 주파수, 시간, 전력 등의 자원 할당을 필요로 한다. 한편, 밀리미터파와 환경에서는 무선 전파 경로의 가시선 경로의 존재여부가 통신 품질에 매우 큰 영향을 미치며, 이를 고려하면 전력이나 지능형 반사표면 등의 자원을 더 효율적으로 할당할 수 있다. 그러나 밀리미터파 전파 환경 특성 상 채널이 매우 빠르게 바뀌어 여러 샘플을 고려하여 분석을 하면 제약이 생길 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 실시간으로 가시선 경로 존재여부를 판별 가능한 단일 샘플 기반 알고리즘을 제안하였다.

I. 서론

무선 통신 기반 어플리케이션들은 원활한 통신을 요구하며, 이를 위해 여러 유저들이 한정된 주파수, 시간, 전력 등의 자원을 효율적으로 사용해야 하며, 이를 위해 다양한 자원 할당 및 스케줄링 기법들이 제시되었다 [1]. 한편, 부족한 주파수 자원을 극복하기 위해 밀리미터파 대역의 주파수 사용이 고려되고 있는데, 이는 강한 경로 손실을 가져 가시선 경로가 존재하지 않으면 신호 품질이 심각하게 저하되는 특성이 있어 가시선 (Line-of-Sight, LoS) 경로 존재 여부에 따른 전력 할당이나 재구성 가능한 지능형 반사표면 (Reconfigurable Intelligent Surface, RIS)의 활용 등이 고려되고 있다 [2] [3]. 이러한 관점에서 가시선 경로 존재 여부 밀리미터파 시스템에서 중요한 요소라고 볼 수 있으며, 이를 위한 다양한 기법이 존재한다 [4]. 그러나 대부분 시간 도메인에서의 여러 샘플을 필요로 하거나 파일럿 신호를 필요로 하며, 이는 빠르게 변하는 밀리미터파 전파 환경에서 실시간으로 검출이 불가능함을 암시한다. 따라서 본 논문에서는 신호의 공간적 정보의 첨도 (kurtosis)와 11/12 ratio를 활용해 단일 샘플만으로 가시선 경로의 존재여부를 검출하는 알고리즘을 제안하였다.

II. 본론

본 논문에서는 1개의 송신기와 M개의 안테나를 가진 uniform linear array (ULA) 기반 수신기를 고려한다. 여기서 수신 신호는 다음과 같다.

$$\mathbf{y} = \mathbf{h}\mathbf{s} + \mathbf{n}, \quad (1)$$

여기서 \mathbf{h} 는 채널 벡터, \mathbf{s} 는 송신 신호, \mathbf{n} 은 i.i.d. 가우시안 노이즈이다. 이때, 밀리미터파 채널은 다중경로가 적기 때문에 범스페이스에서 희소성을 가진다. 범스페이스로 변환된 수신 신호는

$$\mathbf{y}_b = \mathbf{F}\mathbf{y} = \mathbf{F}\mathbf{h}\mathbf{s} + \mathbf{F}\mathbf{n} = \mathbf{h}_b\mathbf{s} + \mathbf{n}_b, \quad (2)$$

이며, \mathbf{F} 는 정규화된 이산푸리에변환 행렬이고, 노이즈는 범공간에서도 가우시안 분포를 따른다. 이렇게 변환한 신호의 가시선 경로가 존재하는 경우와 그렇지 않은 경우는 그림 1과 같다. 범공간에서의 신호 세기는 특정 방향에서 들어오는 신호의 세기와 연관이 있는데, LoS 경로가 존재하는

경우 특정 방향에서 들어오는 신호가 다른 성분들에 비해 매우 크고, LoS 경로가 존재하지 않는 경우에는 세기가 비교적 고르다는 점을 알 수 있다.

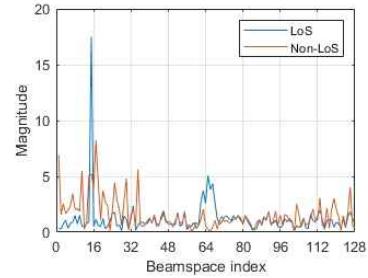


그림 1. LoS/Non-LoS 범공간 신호 비교

제안 기법은 범공간에서의 신호 샘플의 특성을 기반으로 LoS 경로 존재 여부를 판별한다. 사용하는 검정통계량은 11/12 ratio와 첨도가 있다. 여기서 사용되는 11/12 ratio는 다음과 같이 정의된다.

$$\rho = \|\mathbf{y}_b\|_1 / \|\mathbf{y}_b\|_2. \quad (3)$$

11/12 ratio와 첨도를 기반으로 클러스터링한 결과는 그림 2와 같으며, 이를 기반으로 선형 구분선을 만들어 판별한 정확도는 그림 3과 같다. 한 가지의 검정통계량만 사용하면 오탐률이 비교적 더 높지만, 두 검정통계량을 전부 확인하면 비교적 더 높은 정확도를 보임을 알 수 있다.

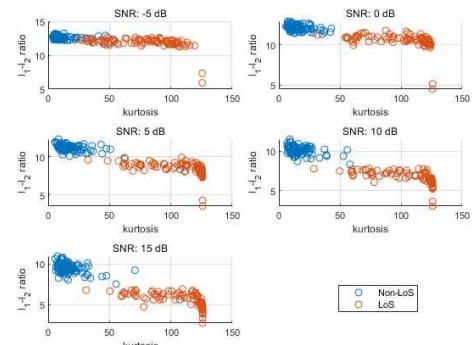


그림 2. SNR에 따른 LoS/Non-LoS 클러스터

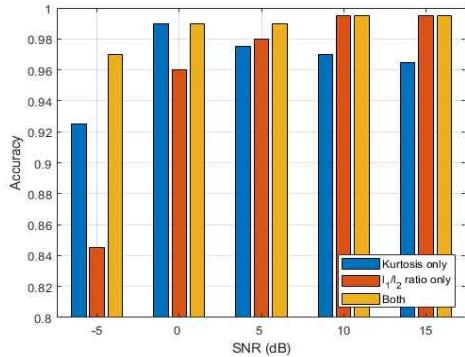


그림 3. SNR에 따른 검출 기준 별 정확도

제안 기법은 노이즈가 있는 상태의 수신 신호와 첨도와 11/12 ratio만을 사용하기 때문에 파일럿이 필요하지 않다. 또한, 수신 신호의 단일 샘플만으로 작동한다. 따라서 제안 기법은 빠르게 변하는 밀리미터파 채널에 맞는 실시간 LoS 경로 존재여부 판별이 가능하다.

III. 결론

본 논문에서는 빠르게 변하는 밀리미터파 환경에서의 LoS 경로 존재여부 판별 알고리즘을 첨도와 11/12 ratio를 활용해 제안하였다. 제안 기법은 빔공간에서 가시선 경로가 갖는 희소성 차이를 활용하여 판별하며, 사전에 약속된 파일럿 신호나 여러 신호 샘플, 채널 추정치 등을 활용하지 않고 오직 단일 수신 신호 샘플만으로 판별이 가능하며, 이는 매우 빠르게 변화하는 밀리미터파 채널에서의 실시간 적용이 가능함을 의미한다. 또한, 한 가지의 검정통계량이 아닌 두 가지의 검정통계량을 활용해 정확도를 더 높였으며, 추후 연구에서는 해당 기법 기반의 검출 결과를 다른 응용기술에 적용했을 때의 실용성에 대한 분석을 제안할 계획이다.

ACKNOWLEDGMENT

본 논문은 2025년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. RS-2024-00442085, 자율주행 차량 서비스 보호를 위한 V2X 무선통신 인프라 보안 핵심기술 개발, No. RS-2024-00398157, AI-Native 응용서비스 지원 6G 시스템 기술개발).

참 고 문 헌

- [1] H. Park and J.-W. Choi, "Queue-Aware Optimization-Based Scheduling for mmWave Multi-User MIMO Indoor Small Cell," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 29, no. 10, pp. 2303–2307, 2025.
- [2] G. Kwon, H. K. Choi, T. Kim, J. Park, and S. H. Chae, "Joint Node Association and Beamforming for Millimeter Wave Networks With Multiple Reconfigurable Intelligent Surfaces," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 72, no. 8, pp. 11012–11017, 2023.
- [3] H. Park and J.-W. Choi, "Binary Hypothesis Testing-Based Low-Complexity Beamspace Channel Estimation for mmWave Massive MIMO Systems," *arXiv preprint arXiv:2508.01007*, 2025.
- [4] J.-S. Choi, W.-H. Lee, J.-H. Lee, J.-H. Lee, and S.-C. Kim, "Deep Learning Based NLOS Identification With Commodity WLAN Devices," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 67, no. 4, pp. 3295–3303, 2018.