

다중 경로 환경에서 직교 위상 도달 기반 위치 추정의 정밀도 향상을 위한 채널 정보 전처리 기법

김소희, 신혜진, 김주엽*

숙명여자대학교

kimsoshee@sookmyung.ac.kr ,shj312@sookmyung.ac.kr, *jykim@sookmyung.ac.kr

Channel Pre-processing for Improving Estimation Accuracy of Orthogonal Phase-of-Arrival Positioning Scheme in Multipath Environments

Sohee Kim ,Hyejin Shin, Juyeop Kim*

Sookmyung Women's Univ.

요 약

본 논문은 다중경로 환경에서 TOA 추정 정확도의 열화를 극복하기 위해 세 가지 채널 정보 전처리 기법을 제안하고 각 기법의 성능을 분산 관점에서 분석하였다. 제안 기법 중 ZP except LOS 기법과 ZP except main impulse 기법에서 유의미한 성능 개선을 확인하였고 이를 통해 해당 기법이 다양한 시나리오에서 정밀한 TOA 추정을 가능하게 하여 TDOA 기반 측위 기법의 정확도를 높이는 데 기여할 것으로 기대된다.

I. 서 론

최근 Internet of Things (IoT), 자율주행 기술의 발전과 함께 위치 기반 서비스에 대한 수요가 증가함에 따라, 고정밀 위치 추정을 위한 다양한 측위 기법들이 연구되고 있다[1]. 이 가운데 Downlink Time Difference of Arrival(DL-TDOA) 기법은 단말이 여러 기지국으로부터 수신한 신호 도달 시간(Time of Arrival, TOA)의 차이를 측정하여 위치를 계산하는 방식으로, 단말과 기지국 간의 시간 동기화를 요구하지 않는다는 점에서 실제 시나리오에 대한 적용 가능성이 높아 활발히 연구되고 있다[2-3]. 그러나 TDOA 기반의 측위 정확도를 확보하기 위해서는 TOA의 정밀한 추정이 선행되어야 한다[4].

한편 더 정밀한 TOA 추정을 위해 직교 위상 도달 기반 위치 추정 기법(Orthogonal Phase-of-Arrival Positioning Scheme, OPoAPS)이 제안되었다[5]. OPoAPS는 수신 신호와 참조 신호 간의 자기상관(auto correlation)을 통해 정수 단위의 TOA 인 Integer TOA(ITOA)를 우선 추정하고, 이를 기반으로 채널 주파수 응답(Channel Frequency Response, CFR)의 위상 변화량을 통해 한 샘플 이내의 TOA 추정 오차인 Residual TOA(RTOA)를 추정한다. 최종적으로 ITOA와 RTOA를 합하여 소수점 단위의 정밀한 TOA를 추정할 수 있으며, 이를 통해 샘플링 속도로 인한 TOA 추정 정확도 한계를 극복할 수 있다. 그러나 본 기법은 CFR 위상이 주파수에 대해 선형적으로 변화한다는 가정을 기반으로 RTOA를 추정하므로, 다중 경로 성분이 지배적인 환경에서는 CFR 위상의 선형성이 보장되지 않아 RTOA 추정 정확도에 한계가 발생할 수 있다.

본 논문에서는 다중경로 환경에서 OPoAPS 기반 RTOA 추정 정확도를 향상하기 위한 세 가지 채널 정보 전처리 기법을 제안한다. 그리고 제안된 각 기법에 대해, 상용 기지국의 Physical Broadcast Channel(PBCH) DeModulation Reference Signal(DMRS)을 활용하여 RTOA 추정 성능을 분산 관점에서 비교·분석하였다.

II. 본론

제안하는 채널 정보 전처리 기법은 채널 임펄스 응답(Channel Impulse Response, CIR)의 다중경로 성분을 Zero - Padding(ZP) 처리하는 영역에

따라 세 가지 기법으로 분류된다. 첫째, ZP NLOS 기법은 Non-Line-of-Sight(NLOS) 성분만을 ZP 처리한다. 둘째, ZP except LOS 기법은 Line-of-Sight(LOS) 성분을 제외한 모든 구간을 ZP 처리한다. 일반적으로 채널 환경에 따라 LOS 성분은 가장 큰 amplitude를 가지는 main impulse와 이를 중심으로 발생하는 side impulse들로 구성된다. 이에 따라 ZP 처리에서 제외되는 side impulse의 개수를 조절하는 파라미터를 설정한다. 본 논문은 main impulse를 중심으로 양쪽에 각각 하나의 side impulse를 남기고 나머지 구간을 ZP 처리한다. 셋째, ZP except main impulse 기법은 main impulse만을 유지하고, 이를 제외한 모든 구간을 ZP 처리한다.

그림 1은 채널 정보 전처리 이전과 각 기법 적용 후의 CIR에 대한 Power Delay Profile(PDP)이다. 그림 1의 좌측 상단은 채널 정보 전처리 전 CIR의 PDP로, LOS 경로와 NLOS 경로가 모두 확인되는 원형 데이터를 보여준다. 우측 상단의 PDP는 ZP NLOS 기법을 적용한 결과로, NLOS 성분이 ZP 처리된 것을 확인할 수 있다. 좌측 하단의 PDP는 ZP except LOS 기법을 적용한 결과로, main impulse를 중심으로 양쪽에 각각 하나의 side impulse가 유지된 상태를 보여준다. 우측 하단의 PDP는 ZP except main impulse 기법이 적용된 결과로, main impulse 단일 성분만이 확인된다.

제안한 세 가지 기법의 RTOA 추정 정확도 성능을 검증하기 위해, 상용 기지국의 PBCH DMRS를 활용하였다[6]. 수신 단말은 USRP B210 장비를 통해 7개의 SSB(Synchronization Signal Block)를 포함하는 SS Burst set을 수신하여 서로 다른 지향성을 갖는 7개의 DMRS를 탐지한다. 그림 2와 같이, 약 10m 간격으로 배치된 A,B,C 세 위치에서 각각 10회씩 신호를 수신하였으며, 이를 바탕으로 MATLAB LLS(Link-Level Simulator)를 이용해 각 기법 간의 RTOA 추정 성능을 분산 관점에서 평가하였다.

그림 3은 A 위치에서 각 기법별로 빈 범호에 따른 RTOA 추정값의 분산을 나타낸다. 채널 정보 전처리 이전(이하 CIR 처리 이전)과 세 가지 제안 기법을 적용한 후의 결과를 비교하였다. CIR 처리 이전과 ZP NLOS 기법

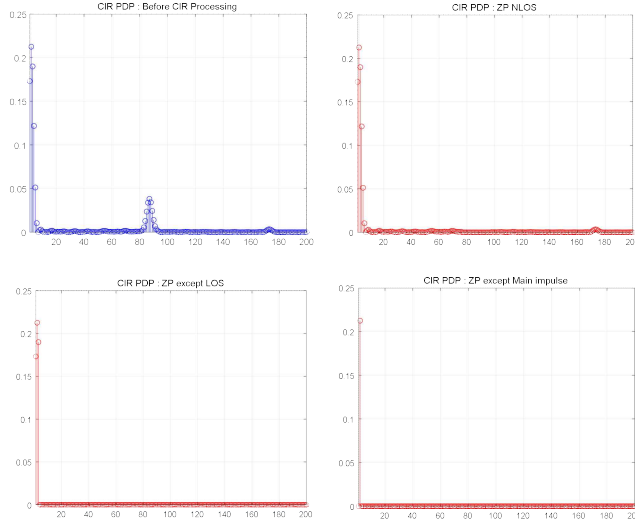


그림 1 처리 전의 CIR 및 각 기법별로 처리한 CIR의 PDP



그림 2 : 실험 환경

의 분산은 모든 빔에서 유사한 수준으로 나타났다. 이러한 결과는 다수의 CFR을 평균하여 대표 CFR을 생성하고, 이를 기반으로 CFR의 위상 변화율을 추정하는 OPoAPS의 구조적인 특성에서 기인한다[5]. 즉 NLOS 요소에 의한 추정 오차가 OPoAPS의 CFR 평균 연산 단계에서 이미 제거되기 때문에, ZP NLOS 기법의 성능 개선 효과가 뚜렷하게 나타나지 않는다. 그러나 이러한 경향은 본 실험 환경에 국한된 결과일 수 있으므로, 다양한 채널 조건에서의 추가적인 검증이 필요하다. 한편, beam 1을 제외한 나머지 빔들에 대해서 ZP except LOS와 ZP except main impulse 기법이 다른 기법들보다 분산이 평균적으로 0.4 감소했고, 두 기법 간의 분산은 유사한 수준으로 관찰된다. 해당 기법들이 RTOA 추정의 안정성을 향상함을 확인할 수 있다. 그러나 beam 1의 경우, 두 기법에서 분산이 급격히 증가하는 예외적인 현상이 관찰되었다. 분석 결과, 해당 빔의 특정 수신 시도에서 RTOA 값의 이상치가 발생함을 확인했다. 이 이상치는 RTOA가 2 샘플 이상일 때 발생한 경우로 이는 ITOA와 CIR 상에서 추정된 main impulse 간의 오차가 2 샘플 이상임을 의미한다. 이러한 현상은 간헐적으로 발생하며, 그 근본적인 원인에 대해서는 향후 추가적인 고찰이 필요하다.

그림 4는 B와 C 위치에서 각 기법에 따른 빔별 RTOA 추정값의 분산을 나타낸 것으로 앞서 그림 3에서 분석한 결과와 유사한 경향을 보인다. 위치에 따라 이상치가 발생하는 빔이 다르게 나타나는데(A의 경우 beam 1, C의 경우 beam 2,3), 이러한 결과가 위치 고유의 특성을 반영하는 정보로 활용 가능한지에 대해서는 추가적인 분석이 필요하다.

III. 결론

본 논문에서는 CFR 위상의 선형성이 보장되지 않는 다중경로 환경에서 OPoAPS 기반 RTOA 추정 정확도를 향상하기 위한 세 가지 채널 정보 전처리 기법인 ZP NLOS, ZP except LOS 그리고 ZP except main impulse 기법을 제안했다. 또한, 상용 기지국의 PBCH DMRS를 활용하여 각 기법 적용 시의 RTOA 추정 성능을 분산 관점에서 비교·분석하였다. 그 결과 실험 환경의 특수성에 의해 ZP NLOS 기법은 분산 개선 효과를 보이지 않았으나, ZP except LOS와 ZP except main impulse 기법은

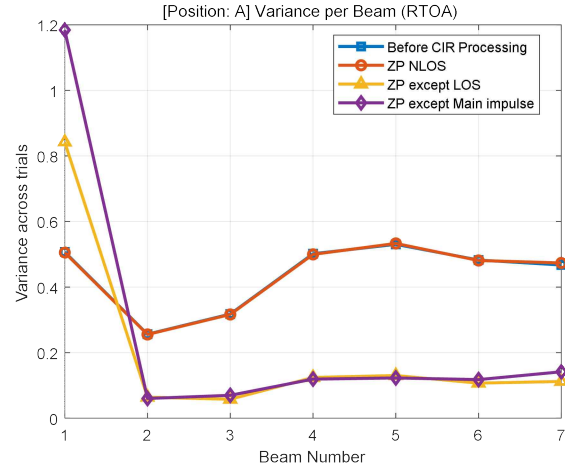


그림 3. A 위치에서 각 기법에 따른 빔별 RTOA 추정값 분산

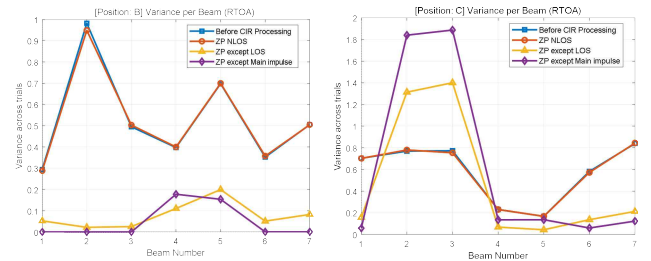


그림 4. B, C 위치에서 각 기법에 따른 빔별 RTOA 추정값 분산 RTOA 이상치가 발생한 빔을 제외했을 때, 모든 위치에 대해서 분산을 평균적으로 0.4 감소시키는 성능 향상을 보였다. 이를 통해 두 기법이 다중 경로 환경에서의 OPoAPS의 TOA 추정 정밀도를 향상할 수 있으며, TDOA 기반 측위 정확도를 높이는 데 기여할 것으로 기대된다. 그러나 특정 beam에서 두 기법의 성능이 열화되는 현상을 보이는데 그 원인에 대해서는 추가적으로 고찰할 예정이다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2024 년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2021-0-00165, 5G+ 지능형 기지국 소프트웨어 모델 개발)

참고 문헌

- [1] J. Li and S. -H. Hwang, "Comparison of TDOA Positioning Solutions in 5G Network: Indoor and Outdoor Performance," 2023 14th International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC), Jeju Island, Korea, Republic of, 2023, pp. 589-591
- [2] Sven Fischer, "observed time difference of arrival (otdoa) positioning in 3gpp", Qualcomm Technologies, INC, 2014
- [3] P. Revisnyei, F. Mogyorosi, Z. Papp, I. Törös and A. Pašić, "Performance of a TDOA indoor positioning solution in real-world 5G network," NOMS 2023-2023 IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium, Miami, FL, USA, 2023, pp. 1-6.
- [4] Y. He, J. Li and X. Zhang, "Adaptive cascaded high-resolution source localization based on collaboration of multi-UAVs," in China Communications, vol. 17, no. 4, pp. 165-179, April 2020.
- [5] 신혜진, 김소희, 김주엽. "5G PRS 기반 직교 위상 도달 기반 측위 기법 설계 및 성능 분석" 한국통신학회논문지 50, no.1 (2025) : 170-184.
- [6] 3GPP, "5G NR: Physical channels and modulation", TS 38.211 V16.10.0, Jul. 2022