

도심 환경 실도로에서의 5G NR-V2X 품질 특성 분석 및 개선 방안

왕아현, 김덕경*
인하대학교

wah01@naver.com, *kdk@inha.ac.kr

Empirical Study on 5G NR-V2X Quality Characteristics and Improvement Strategies in Urban Road Scenarios

A hyeon Wang, Duk Kyung Kim*
Inha University

요약

본 연구는 판교 제로시티 실도로에서 수행된 5G-NR V2X 통신 품질 측정 데이터를 기반으로, RCPI-속도 기반 이상치 인지 절차를 통해 거리, 속도 및 위치와 품질 관계를 도출하였다. 동일 거리에서도 최대 50-60 dB 편차가 발생했으며, 특히 터널 출입부에서 구조적 차폐로 인한 급락 현상이 반복적으로 나타났다. Streamlit 기반 대시보드와 자동 리포팅 도구를 구현해 운영 활용 가능성을 검증하였으며, 추가로 터널 음영 구간 완화를 위한 RF 중계기·증폭기 설치를 제안하였다.

I. 서론

자율주행 기술의 상용화를 위해서는 차량 간 및 차량-인프라 간 신뢰성 있는 무선 통신이 필수적이며, 이를 가능하게 하는 핵심 기술이 5G 기반 V2X(Vehicle-to-Everything) 통신이다. 특히 5G-NR V2X는 기존 LTE-V2X 대비 초저지연, 대규모 동시접속, 안정적인 커버리지를 제공하여 차세대 자율주행 인프라의 기반으로 주목받고 있다. 그러나 실제 도심 환경에서는 터널, 교차로, 고층 건물 반사 등 구조적 요인으로 인해 통신 품질이 불규칙하게 저하되며, 수집된 NR-V2X 로그에도 속도나 차폐 상황에 따른 이상치(outlier)가 다수 포함된다. 이를 적절히 처리하지 않으면 거리-RCPI 상관관계가 왜곡되어 품질 해석의 신뢰도가 떨어진다.

Rehman et al.[3]은 차량 플래투닝 시나리오에서 LTE-V2X Mode 4와 NR-V2X Mode 2 성능을 Nakagami-lognormal 복합 채널 모델 기반 분석적 접근으로 비교하고, 다양한 거리와 차량 밀도, 자원 수 변화에 따른 패킷 성공 확률을 정량적으로 제시하였다. 그러나 자율주행 및 차세대 교통 인프라를 지원하기 위해서는 시뮬레이션이나 이론적 모델링에 의존한 분석만으로는 한계가 있다. 실제 도심 환경에서는 건물 반사, 터널 차폐, 교차로에서의 다중 경로 간섭 등 다양한 예측 불가능한 요인이 통신 품질에 직접적으로 영향을 미친다. 따라서 실도로에서 측정된 데이터 기반의 분석은 이러한 복잡한 환경적 요소를 반영하고, 실제 운행 상황에서 발생하는 이상 현상과 성능 저하 원인을 규명하는 데 필수적이다. 특히, 이러한 실험적 접근은 단순히 이론적 성능을 검증하는 차원을 넘어, 향후 V2X 인프라 설계와 품질 개선 전략 수립에 있어 실질적인 근거 자료로 활용될 수 있다.

본 연구에서는 판교 제로시티 실도로에서 수행된 실증 데이터를 기반으로 분석을 진행하였다. 분석 과정은 다음과 같다. 첫째, RCPI-속도-주행 상황을 결합한 이상치 인지 절차를 통해 강건한 거리-품질 관계를 도출하였다. 둘째, 지도 기반 분석을 통해 터널·차폐·반사 구간의 영향을 확인하였다. 셋째, 터널 출입부 음영 구간에 대해 저비용 RF 중계기·증폭기 설치 방안을 제안

제안하였다. 마지막으로, Streamlit 대시보드를 구현하여 이상치 탐지, 시각화 및 리포팅의 운영적 활용 가능성을 검증하였다.

II. 본론

1) 실험 환경

실험은 경기도 성남시 판교 제로시티 도심 구간에서 진행되었다. 총 4대 차량에 28개의 OBU(On-Board Unit)를 탑재하여 약 170시간 주행 로그를 수집하였으며, 각 패킷에는 송·수신 ID, RCPI, GPS 좌표가 포함되었다. 모든 단말은 NTP(Network Time Protocol)로 동기화되었고, 수집된 로그는 전처리 과정을 거쳐 RCPI, Latency, 거리, 속도 간 상관관계 분석에 활용하였다.

2) 이상치-강건 분석 및 환경 요인 개선

실도로 로그에는 정차·반사·차폐 등 환경 요인으로 인한 이상치가 다수 존재하였다. 이를 제거하지 않으면 거리-RCPI 상관관계가 왜곡되어 품질 해석의 신뢰도가 떨어진다. 본 연구는 RCPI 범위(80-160dBm)와 속도 조건(고속·고 RCPI, 저속·저 RCPI)을 정의하여 이상치를 분류하였다.

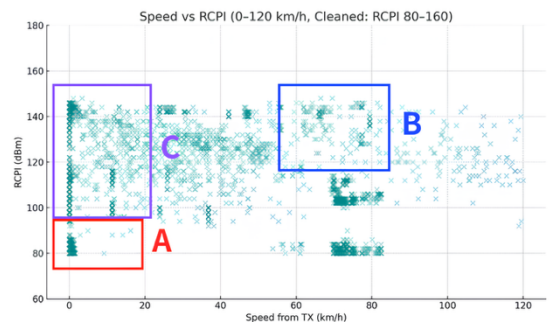


그림 1. 속도-RCPI 산점도 (80≤RCPI≤160)

그림 1은 속도-RCPI 산점도로, 분석을 위해 3구간으로 구분하였다. 다만 RCPI가 80 dBm

이하이거나 160 dBm 이상으로 나타난 값은 계측 오류 가능성이 높아 사전에 제거한 상태에서 분석을 진행하였다. 구간 A 는 저속임에도 RCPI 가 비정상적으로 낮은 구간, 구간 B 는 고속 주행임에도 RCPI 가 지나치게 높게 기록되는 사례가 집중적으로 나타났다. 이 현상을 공간적으로 대응한 것이 그림 2 이며, 구간 (가)는 터널 입·출구, 구간 (나)는 도심 반사 구간을 나타낸다. 그림 2 는 지도 기반의 시각화 결과로, 초록 점은 RCPI 가 상대적으로 높은 지점을, 빨간 점은 낮은 지점을 의미하며, 두 점을 연결한 선은 동일 거리 대비 큰 편차가 발생한 비교 쌍을 나타낸다. 이러한 표기는 단순 산점도로는 확인하기 어려운 공간적 이상치를 직관적으로 드러내도록 구성되었다.

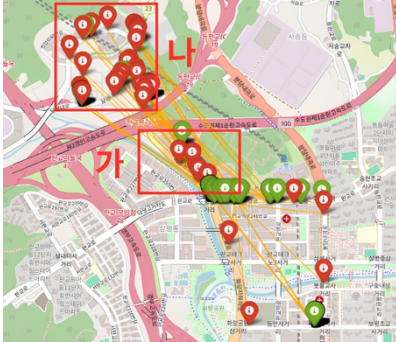


그림 2. 동일 거리 대비 RCPI 편차 시각화

터널 입·출구에서는 송수신기 중 한쪽만 내부에 있을 경우 강한 차폐로 인해 RCPI 가 급격히 하락했고, 양쪽이 모두 내부일 때는 벽·천장 반사로 인해 RCPI 가 과도하게 증폭되는 이중적 이상치가 반복 관측되었다. 또한 건물 외벽의 유리·금속 반사로 인해 도심 반사 구간에서는 고속 주행 중에도 RCPI 가 비정상적으로 높게 유지되는 현상이 확인되었다. 따라서 구간 A, B 의 데이터는 단순 노이즈가 아니라 반복적으로 재현되는 구조적 이상치로 분류하였으며, 제거 대상으로 처리하였다.

한편 그림 1 의 구간 C 는 저속 주행임에도 불구하고 RCPI 가 일정하게 높은 수준을 유지하는 영역이다. 이는 단순 거리 감쇠로 설명되지 않고, 차량 전장(세단 약 4.7m, SUV 약 4.8m, 버스 9m 이상)과 안전거리(6-12m) 조건에 따라 송수신기 간 시야가 달라지면서 RCPI 가 강화되는 상황으로 해석된다. 동일한 거리에서도 차량 배치와 반사 조건에 따라 최대 50-60 dB 까지 차이가 발생한 것도 이러한 영향의 증거라 할 수 있다.

이상치 제거 후에는 속도 증가에 따라 RCPI 가 완만히 감소하는 전형적 패턴이 부분적으로 회복되었으며, 분포의 분산도 줄어들어 통신 품질 해석의 안정성이 높아졌다.

3) 시각화 시스템 및 분석 결과

수집 데이터는 단순 통계 해석을 넘어 실제 운영 환경에서도 활용할 수 있도록 시각화 시스템으로 구현하였다. Python 기반 Streamlit 대시보드는 사용자가 RCPI-Latency-거리 조건을 선택하면 시계열 그래프와 지도 기반 시각화를 제공하며, ReportLab 을 활용한 자동 PDF 리포트 기능도 지원한다. 특히 시간

흐름에 따른 차량 간 통신 상태를 동적으로 표현하는 애니메이션 기능을 구현하여, 특정 시점에서의 급락·지연 뿐만 아니라 구간 전체에서 반복되는 품질 저하 패턴을 직관적으로 확인할 수 있도록 하였다. 지도 상에서는 차량 경로를 따라 통신 링크의 색상이 시간에 따라 변하며, 통신 상태가 실시간으로 변화하는 모습을 시각적으로 보여준다



그림 3 (좌)시각화 대시보드 일부, (우)차량 통신 애니메이션

이 시스템을 통해 이상치 제거 전후의 분포 비교, 시간대별 평균 RCPI, 특정 위치에서의 품질 저하 패턴을 신속히 확인할 수 있었다. 예를 들어, 애니메이션은 터널 입구 진입 시 RCPI 가 연속적으로 급락하고 Latency 가 순간적으로 증가하는 과정을 반복적으로 보여주었으며, 지도 기반 시각화는 동일한 구간에서 이러한 현상이 일관되게 발생함을 확인시켜 주었다. 전체 평균 지연시간은 약 5.38 ms 로 측정되어 5G 의 초저지연 요구사항을 충족하였다.

III. 결론

본 연구는 판교 제로시티 실도로 데이터를 기반으로, 터널·도심 반사 등 환경 요인에 따른 반복 이상치를 정의·제거하고 RF 중계기 설치와 같은 개선 방안을 제시하였다. 또한 Streamlit 기반 대시보드와 애니메이션을 구현하여 분석 결과의 운영 활용 가능성을 검증하였으며, 평균 지연시간이 약 5.38 ms 로 5G 초저지연 요구사항을 충족함을 확인하였다. 향후에는 도심 외 고속도로 구간과 다양한 주파수 대역으로 확장하여, 자율주행 인프라 설계와 V2X 품질 보장 전략에 기여할 수 있을 것이다.

ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by IITP grant funded by the Korea government (MSIT) (2022-0- 00521, Development of 5G-NR-V2X communication technology to support over Lv.4 autonomous driving service).

참 고 문 헌

- [1] Y. Muñoz, G. Kakasageri, M. S. Aljumaily, and A. R. Cavalli, "A Qualitative Study of 5G Simulators and Frameworks for V2X Applications," *preprint*, Jan. 2025.
- [2] P. Wang, J. Chen, X. Li, and Y. Yang, "Joint Spectrum and Power Allocation for V2X Communications with Imperfect CSI," *arXiv:2302.14704*, Feb. 2023.
- [3] A. Rehman, R. Valentini, E. Cinque, P. Di Marco, and F. Santucci, "On the Impact of Multiple Access Interference in LTE-V2X and NR-V2X Sidelink Communications," *Sensors*, vol. 23, no. 10, art. 4901, 2023, doi:10.3390/s23104901.