

멀티-홉 V2X 네트워크에서 이기종 노변 기지국에 의한 타이밍 오차 영향 분석

진유진, 이승주, 김태형*

국민대학교

dbwlswl2@kookmin.ac.kr, gjxor17a@kookmin.ac.kr, th.kim@kookmin.ac.kr

Timing Mismatch Effects in Multi-Hop V2X Networks with Heterogeneous Roadside Units

Yujin Jin, Seung-Ju Lee, Taehyoung Kim*

Kookmin University

요약

GNSS(Global Navigation Satellite System) 혹은 기지국 기반 동기화가 불가능한 지역에서는 사이드링크 전용 동기 신호인 SLSS(Sidelink Synchronization Signal)를 송신하는 다수의 노변 기지국을 배치한 멀티-홉 V2X(Vehicle-to-Everything) 네트워크를 구축할 수 있다. 이러한 환경에서는 동기 기준을 제공하는 단말과 데이터 채널을 전송하는 단말이 서로 상이할 수 있으며, 그 결과 SLSS와 PSSCH(Physical Sidelink Shared Channel) 간 도착 시간 불일치가 발생할 수 있다. 이러한 영향을 분석하기 위해 타이밍 불일치를 CP(Cyclic Prefix) 길이로 정규화한 지표인 TMR(Timing Mismatch Ratio)을 정의하고, TMR에 따른 BLER(Block Error Rate) 성능을 시뮬레이션을 통해 평가하였다. 시뮬레이션 결과, PSSCH가 SLSS보다 늦게 도착하는 경우와 일찍 도착하는 경우 모두에서 타이밍 오차가 CP 길이를 초과하면 BLER이 열화됨을 확인하였다.

I. 서론

V2X(Vehicle-to-Everything)는 자율주행 및 C-ITS(Cooperative Intelligent Transport System) 구현을 위한 핵심 통신 기술로, 국내에서는 2023년 12월 C-ITS의 통신 방식으로 C-V2X(Cellular-V2X)가 채택되었다. C-V2X는 OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 기반 전송 방식을 사용하며, OFDM 시스템에서는 부반송파 간 직교성 유지를 위해 정확한 시간 및 주파수 동기화가 필수적이다. 만약 수신 타이밍 오차가 CP(Cyclic Prefix) 구간을 초과한다면, ISI(Inter-Symbol Interference)가 발생하여 데이터 복호 성능이 저하될 수 있다. 일반적으로 GNSS(Global Navigation Satellite System) 또는 기지국이 동기화 기준으로 활용되지만[1], 커머셜 외 환경에서는 3GPP TS 38.211에 정의된 SLSS(Sidelink Synchronization Signal)를 이용한 동기화가 가능하다[2]. 또한 SLSS를 이용한 동기화 수행이 필요한 영역이 광범위한 경우, SLSS를 전송하는 다수의 RSU(Road Side Unit)를 배치하여 멀티-홉 동기화 구조를 형성할 필요가 있다[3]. 이 과정에서 동기 기준을 제공하는 노드와 실제 데이터 전송을 수행하는 노드가 서로 다를 수 있으며, 그 결과 수신단에서는 SLSS로 형성한 동기화 타이밍 대비 데이터 채널의 도착 타이밍이 불일치할 수 있다.

본 연구에서는 이러한 동기 기준 대비 데이터 채널의 도착 타이밍 불일치가 BLER(Block Error Rate)에 미치는 영향을 분석한다. 이를 위해 타이밍 오차를 CP 길이로 정규화한 지표인 TMR(Timing Mismatch Ratio)을 정의하고, 오차의 크기 및 방향에 따른 성능 변화를 평가한다. 또한 차량 이동에 따른 경로 손실 환경을 함께 고려함으로써, 신뢰성 있는 데이터 전송을 보장하기 위한 타이밍 정렬 조건을 정량적으로 도출한다.

II. 시스템 모델

본 연구에서는 GNSS 또는 기지국 기반 동기화가 불가능한 광범위한 지역의 V2X 네트워크 환경을 고려한다. 이러한 환경에서는 다수의 RSU(Road Side Unit)가 사이드링크 동기 기준 신호인 SLSS(Sidelink

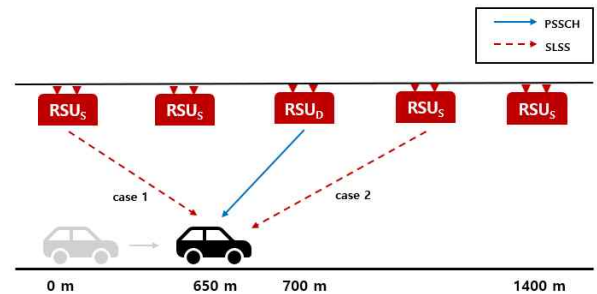


그림 1. 시뮬레이션 환경

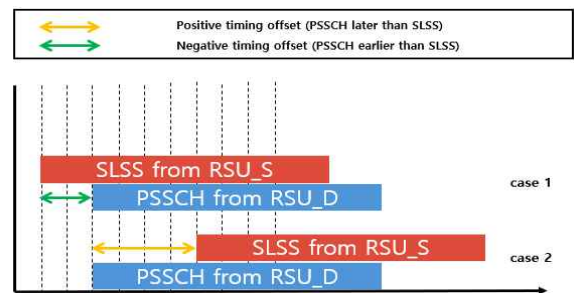


그림 2. SLSS와 PSSCH 간 타이밍 오프셋

Synchronization Signal)를 송신하며, 차량에 장착된 OBU(On-Board Unit)는 해당 신호를 기반으로 동기화를 수행한다. 그림 1과 같이 총 1,400 m 구간에서 5개의 RSU를 350m 간격으로 배치된 구조를 가정하며, OBU는 주변 RSU로부터 수신한 SLSS를 디코딩하여 송수신 타이밍을 정렬한다. 이후 정렬된 타이밍을 기준으로 데이터 채널인 PSSCH(Physical Sidelink Shared Channel)를 디코딩하는 상황을 고려한다. 이때 그림 1과 같이 특정 차량에서는 동기 기준을 제공하는 RSU와 실제 데이터를 전송하는 RSU가 서로 상이한 상황이 발생할 수 있다.

이러한 경우 동기 RSU와 데이터 RSU, 그리고 차량 간의 상대적인 위치 차이와 각 신호가 거치는 전파 경로의 차이로 인해, 두 신호 간 도착 시점 불일치가 발생한다.

표1. 시뮬레이션 파라미터

Parameter	Value
Data RSU location (RSU_D)	700m(fixed)
OBU movement range	0 - 1,400m
OBU velocity	100km/h
Cyclic Prefix length	72 samples
Timing offset range(Δn)	-288 ~ 288 samples
Timing offset step	12 samples

본 연구에서는 이러한 도착 시점 차이를 수신단 관점의 상대적 샘플 오프셋(Δn)으로 모델링하고, SLSS 기준 대비 PSSCH의 도착 시점을 인위적으로 가변하여 성능을 분석한다. 이때 수신 타이밍 불일치(Timing Mismatch로 정의하고, 이를 CP의 길이(N_{CP})로 정규화된 TMR(Timing Mismatch Ratio)로 표현하며, 다음과 같이 정의한다.

$$TMR = \frac{|\Delta n|}{N_{CP}}$$

TMR은 그림 2의 case 1과 같이 데이터 신호가 동기 기준보다 늦게 도착하는 경우($\Delta n > 0$)와 그림 2의 case 2과 같이 일찍 도착하는 경우($\Delta n < 0$)로 구분하여 분석한다. TMR이 증가함에 따라 데이터 심벌의 유효 FFT 구간에 인접 심벌 성분이 유입될 가능성이 커지며, 이는 OFDM 시스템의 직교성을 저해하여 데이터 복호 성능에 영향을 미칠 수 있다. 추가적으로, 데이터 전송 노드를 기준으로 OBU의 상대적 위치가 변화하는 상황을 고려한다. 이를 통해 경로 손실 변동을 배제한 경우와 이동에 따른 경로 손실이 함께 작용하는 경우를 구분하여 분석함으로써, 타이밍 불일치가 데이터 채널 성능에 미치는 영향을 평가한다.

III. 실험 결과

본 연구는 OBU 위치를 650m로 고정한 Fixed Path Loss 환경과 OBU 이동을 추가한 Mobility Path Loss 환경을 고려하였다. 추가적인 파라미터는 표1에 정리하였다.

그림 3은 타이밍 불일치를 CP 길이로 정규화한 TMR 변화에 따른 BLER 성능을 나타낸다. Fixed Path Loss 환경에서는 OBU를 특정 위치에 고정하여 경로 손실 변동을 배제하였으며, 이 경우 BLER 성능은 타이밍 오차의 크기에 의해 지배됨을 확인하였다. TMR이 1 이하인 구간에서는 전반적으로 낮은 BLER를 유지하지만, TMR이 1을 초과하면 BLER가 급격히 증가한다. 또한 PSSCH가 SLSS보다 일찍 도착하는 경우가 늦게 도착하는 경우보다 BLER 성능 열화가 더 이른 TMR 구간에서 발생함을 확인하였다. PSSCH가 SLSS보다 늦게 도착하는 경우 TMR 약 1.2 지점까지도 10% 미만의 낮은 BLER를 유지하는 반면, PSSCH가 먼저 도착하는 경우 TMR 약 0.6 부근부터 BLER가 상승하기 시작하여 TMR 1 지점에서 약 40% 이상의 BLER를 기록하였다. 이는 데이터 심벌이 FFT 처리 구간의 전반부에 침투하면서 이전 심벌 성분에 의한 간섭이 더욱 지배적으로 작용하기 때문으로 해석된다.

Mobility Path Loss 환경에서는 OBU의 이동에 따른 거리 변화와 경로 손실이 추가로 반영되었다. 분석 결과, Fixed Path Loss 환경과 비교하여 동일한 TMR 조건에서도 BLER가 전반적으로 더 높게 측정되었으며, 특히 PSSCH가 SLSS보다 먼저 도착하는 경우 TMR 약 0.8 지점에서 이미 약 30%의 BLER에 도달하였다.

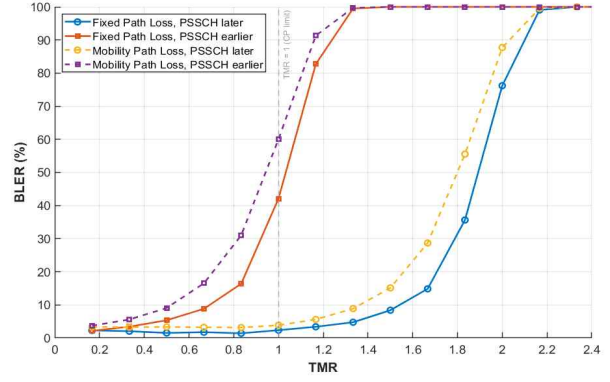


그림3. TMR에 따른 BLER 성능

종합적으로 두 시나리오 모두에서 TMR이 1 부근을 기준으로 BLER이 상승하는 현상이 공통적으로 관찰되었으며, 이는 CP 길이가 타이밍 오차에 대한 시스템 내성을 결정하는 핵심 기준임을 시사한다. 또한 실제 주행 환경을 반영한 Mobility Path Loss 환경에서 타이밍 오차에 대한 성능 열화가 더욱 민감하게 나타남을 확인하였다.

III. 결론

본 논문에서는 서로 다른 RSU로부터 수신된 동기 기준 대비 데이터 채널의 도착 타이밍 불일치가 BLER 성능에 미치는 영향을 분석하였다. 실험 결과, 타이밍 오차가 CP 길이에 근접하거나 이를 초과할 경우 BLER가 급격히 증가하였으며, 특히 데이터 채널이 동기 기준보다 먼저 도착한 경우에는 CP 보호 구간 내에서도 성능 열화가 조기에 발생함을 확인하였다. 이는 데이터 심벌이 FFT 처리 구간의 전반부에 침투하면서 이전 심벌 성분에 의한 간섭이 더욱 지배적으로 작용하기 때문으로 해석된다. 또한 이동 환경을 고려한 경우, 경로 손실에 따른 수신 전력 감소가 타이밍 오차와 결합되어 동일한 TMR 조건에서도 BLER 성능 열화가 더욱 두드러지게 나타났다. 이러한 결과는 분산된 RSU 환경에서 동기 기준과 데이터 전송원이 상이할 경우, 데이터 채널의 상대적 도착 타이밍 관리가 V2X 데이터 신뢰성을 좌우하는 핵심 요소임을 확인하였다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (No.RS-2024-00397789).

참고 문헌

- [1] 3GPP RAN1, "Agreement of 5G V2X," R1-1913601, 3GPP TSG RAN WG1 Meeting, Dec. 2019.
- [2] 3GPP TS 36.211 V14.0.0, "Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical channels and modulation (Release 14)," March 2017.
- [3] M. Boban, A. Kousaridas, K. Manolakis, J. Eichinger, and W. Xu, "Connected Roads of the Future: Use Cases, Requirements, and Design Considerations for Vehicle-to-Everything Communications," IEEE Vehicular Technology Magazine, vol. 13, no. 3, pp. 110–123, Sept. 2018.