

이동차량용 단방향 전송 브로드 캐스팅 기반 저지연 시간 동기화 기법

이종학, 배석현, 장현빈, 김채영, 안지훈, 정수민*

금오공과대학교

jho5695@naver.com, sumin.jeong@kumoh.ac.kr

Low-Latency Time Synchronization Scheme Based on One-Way Broadcast Transmission for Vehicular Communications

Jonghak Lee, Seokhyeon Bae, Hyunbin Jang, Chaeyoung Kim, JiHoon An
and Sumin Jeong*

Kumoh National Institute of Technology.

요약

본 논문은 이동 차량을 위한 무선 통신 시스템에서 전체 처리 시간을 줄이기 위해, 단방향 전송 구조를 활용한 클럭 스큐 (Clock skew) 추정 기법을 제안한다. 전파 지연을 지수 분포로 모델링하고 수신 단말에서 시간 오차를 계산하는 방식으로, 응답 경로 없이도 안정적인 추정이 가능하다. 시뮬레이션 결과를 통해 제안하는 시간 동기화 방법이 잡음 환경에서 우수한 평균 제곱 오차(MSE) 성능을 가짐을 증명한다.

I. 서론

산업 및 통신 네트워크에서의 시간 동기화는 분산된 센서와 제어 장치 간 협업을 위해 필수적이며, 시스템의 안정성과 처리 효율에 직결된다 [1,2]. 지금까지는 주로 양방향 통신 기반의 동기화 구조가 제안되었다 [3]. 이 전파 지연의 모델링 기반 시간 동기화 구조는 응답 경로가 필요 없어 처리 시간이 짧고, 지연 변화에 더 견고하게 대응할 수 있다. 그러나 이동 환경에서는 통신 지연이 비대칭적이고 빠르게 변화하여 양방향 통신 프로토콜으로는 안정적인 시간 동기화가 어렵다. 이를 보완하기 위해 본 논문에서는 송신 단말기에서 단방향으로 송신된 시간 정보를 수신 단말기가 수신하여 클럭 스큐를 추정하는 방식을 제안한다. 단방향 구조를 이동 차량 환경에 적용 지연을 지수 분포로 모델링한 후 계산량이 낮은 방법으로 클럭 스큐를 추정한다. 다양한 잡음 조건에서 제안하는 시간 동기화 기법의 성능을 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

II. 제안하는 논문

II-1. 시스템 모델

그림 1 은 본 논문에서 제안한 단방향 클럭 스큐 추정 구조를 나타낸다. 타임스탬프 t_i 를 포함한 메시지가 슬레이브로 방송되며, 슬레이브는 수신 시점을 자체 시계 기준으로 τ_i 로 기록한다. 송신 시각과 수신 시각의 쌍 (t_i, τ_i) 은 관측값 y_i 로 변환된다. 본 모델에서는 오프셋 향이 상수로 존재해도, 관측 기반 차분 처리를 통해 추정

과정에서 제거가 가능하며, 전체 처리 시간은 단방향 지연만을 포함하므로 양방향 방식보다 짧다.

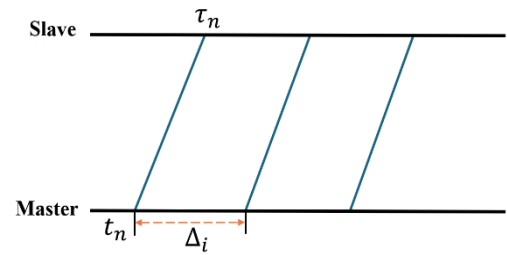


그림 1. 제안하는 시스템의 구조

II-2. 시간 모델링 및 선형화

단방향 구조에서 슬레이브 기준 수신 시각 τ_i 가 다음과 같이 표현된다.

$$\tau_i = (t_i + d_{sm} + w_i)\varphi + \delta \quad (1)$$

여기서 t_i 는 i 번째 송신 시각, d_{sm} 은 고정지연, w_i 는 평균이 λ^{-1} 인 지수 분포를 따르는 확률 지연이다. φ 는 클럭 스큐, δ 는 초기 오프셋을 의미한다. 각 관측 쌍 (t_i, τ_i) 간의 차분을 통해 오프셋 δ 는 제거하면 다음과 같은 선형 모델이 유도된다.

$$y_i = \varphi \Delta_i + z_i \quad (2)$$

여기서 y_i 는 관측값, Δ_i 는 상대 시간 간격이며, z_i 는 독립적인 확률 변수들의 합이다. 이에 따라, 각 y_i 들에 대해 다음과 같은 확률 밀도 함수가 정의된다.

II-3. 확률 모델 기반 추정기

클럭 스큐의 역수인 $\theta_1 = \frac{1}{\varphi}$ 를 추정하기 위해, 관측값 $\{y_i\}_{i=2}^N$ 이 독립임을 가정하면 전체 우도 함수는 다음과 같다.

$$f(z_i) = \prod_{i=2}^N f(y_i - \theta_1 \Delta_i) \quad (3)$$

최종 추정기는 조건부 기댓값 형태로 표현되며, 이는 평균 제곱 오차(MSE)를 최소화하는 조건부 불변 추정기이다.

$$\hat{\theta} = \frac{\int \theta_1 \prod_{i=2}^N f(y_i - \theta_1 \Delta_i) d\theta_1}{\int \prod_{i=2}^N f(y_i - \theta_1 \Delta_i) d\theta_1} \quad (4)$$

추정기는 지수 분포 외에 감마, 가우시안 등 다양한 분포에 확장 가능하며, 본 실험에서는 수치 적분을 위한 Riemann summation 을 사용하였다.

III. 시뮬레이션 성능 분석

시뮬레이션은 다양한 관측 수 N 과 지연 강도 λ 조건에서 수행되었으며, 각 조건에 대해 clock skew 추정의 평균 제곱 오차(MSE)를 계산하였다. 비교 대상은 기존의 응답 기반(RR) 구조이며, 제안된 단방향 방식과의 성능을 비교하였다 [4].

그림 2 는 λ 를 변화시킨 결과로, λ 작아질수록 오차가 증가하는 경향을 보였지만 이러한 조건에서도 브로드캐스트 방식은 RR(Response Request) 방식[4] 보다 낮은 MSE 를 기록하였으며, 특히 $\lambda = 0.5$ 와 같이 고잡음 환경에서도 그 차이가 명확하게 나타난다.

그림 3 은 $\lambda = 0.5$ 로 고정한 상태에서 관측 수 N 을 변화시킨 결과로, N 증가에 따라 MSE 가 감소하는 전형적인 추세를 확인할 수 있다. 관측 수가 적은 경우에도 브로드캐스트 방식은 안정적인 성능을 유지하였다. 이는 응답 지연이 없어 오차 누적이 줄어든 단방향 구조의 특성에 기인한다.

이러한 결과는 제안 방식이 실제 잡음 조건과 관측 환경에서도 효과적으로 동작함을 보여주며, 지연 특성이 빠르게 변하는 이동 통신 환경에서도 안정적인 스큐 추정이 가능함을 의미한다.

IV. 결론

본 연구에서는 단방향 브로드캐스트 기반의 클럭 스큐 추정 기법을 제안하고, 지수 지연 환경에서 기존 양방향 방식과 성능을 비교하였다. 제안한 MLE 기반 추정기는 추가 통신 없이 구현 가능하며, 고잡음 조건 ($\lambda < 1$) 과 관측 수가 제한된 조건 모두에서 양방향 방식보다 우수한 추정 오차를 보였다. 이는 단방향 구조가 처리 시간과 정확도 측면에서 효율적이며, 복잡한 메시지 교환 없이도 안정적인 시간 동기화를 구현할 수 있음을 보여준다.

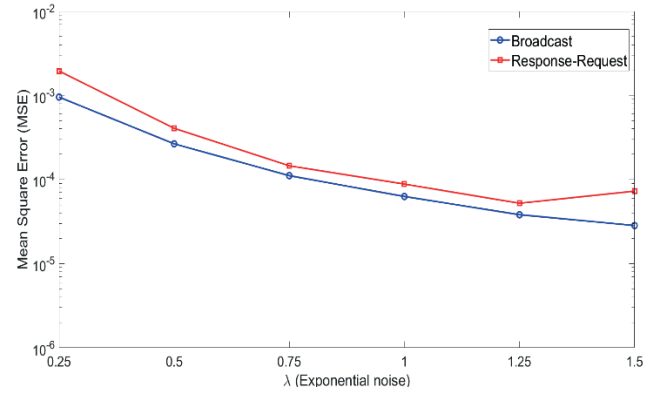


그림 2. 지연 강도 λ 에 따른 단방향 및 양방향 시간 동기화 기법의 성능 비교

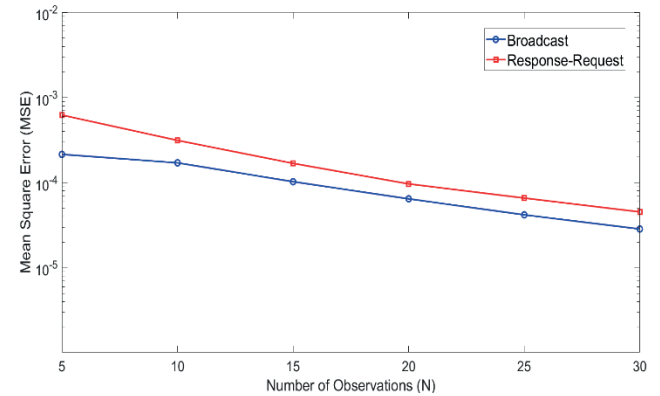


그림 3. 관측 수 N 에 따른 단방향 및 양방향 시간 동기화 기법의 성능 비교 $\lambda = 0.5$

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원-지역지능화혁신인재양성사업의 지원을 받아 수행된 연구임 (IITP-2025-RS-2020-II201612).

참 고 문 헌

- [1] N. Kero, A. Puhm, T. Kernen, and A. Mroczkowski, "Performance and reliability aspects of clock synchronization techniques for industrial automation," Proc. IEEE, vol. 107, no. 6, pp. 1011-1026, Jun. 2019.
- [2] K. Zhou, X. Wang and S. Cui, "Time synchronization in industrial internet of things: A survey", 2024 IEEE 7th Information Technology Networking Electronic and Automation Control Conference (ITNEC), vol. 7, pp. 506-510, 2024.
- [3] D. R. Brown and A. G. Klein, "Precise timestamp-free network synchronization", Proc. 47th Annu. Conf. Inf. Sci. Syst. (CISS), pp. 1-6, Mar. 2013.
- [4] X. Liu and H. Wang, "Embedded clock skew estimation in industrial networks", IEEE Commun. Lett., vol. 26, no. 8, pp. 1873-1877, Aug. 2022.