

Event A3 기반 5G V2I 핸드오버 시뮬레이터 구현 및 성능 평가

박상윤, 민경현, 소재우*

서강대학교

gdxaad@sogang.ac.kr, ghmin@sogang.ac.kr, *jwso@sogang.ac.kr

Event A3-based 5G V2I Handover Simulator Implementation and Performance Evaluation

Sangyun Park, Gyeonghyeon Min, Jaewoo So*

Sogang Univ.

요약

고속 이동 환경에서의 안정적인 5G V2I(Vehicle-to-Infrastructure) 서비스를 위해서는 핸드오버 파라미터의 적절한 설정이 필수적이다. 본 논문은 Event A3 기반 핸드오버 시뮬레이터를 구현하고, 3GPP TR 38.901의 도심(UMa/UMi) 채널 모델을 적용하여 RSRP(Reference Signal Received Power) 기반 핸드오버 성능을 분석하였다. 구현한 핸드오버 시뮬레이터에서 Offset/Hysteresis/TTT(Time-to-Trigger) 파라미터 조합에 따른 핸드오버 횟수, 핑퐁, 무선링크실패(RLF; Radio Link Failure) 등의 성능을 평가하였다. 모의 실험 결과 파라미터 조합에 따라 핸드오버 지연과 핑퐁의 trade-off가 발생하였으며, 핑퐁을 억제할수록 핸드오버 지연이 증가하여 단절(outage) 및 RLF 가능성이 높아지는 것을 확인하였다.

I. 서론

V2I(Vehicle-to-Infrastructure) 환경에서 차량 단말(UE)은 도심 소형 셀을 연속적으로 통과하며 셀 전환이 빈번하다. 이때 핸드오버 파라미터는 불필요한 핸드오버(HO; Handover)를 줄여 시그널링/핑퐁을 억제하는 방향과 HO 지연을 줄여 품질 저하 및 단절(outage)을 방지하는 방향 사이의 trade-off를 형성한다. 또한 도심 환경에서는 LOS(Line-Of-Sight)/NLOS(Non-LOS) 전환, 건물 차폐 등으로 신호가 급격히 변동하므로, 단순 거리 기반 모델로는 HO 성능을 신뢰성 있게 평가하기 어렵다[1,2].

본 논문에서는 3GPP TR 38.901의 도심(UMa/UMi) 채널 모델을 기반으로 Event A3 핸드오버 시뮬레이터를 구현하고 Offset, Hysteresis, TTT(Time-to-Trigger) 변화에 따른 성능을 비교한다. 특히 LOS/NLOS 확률, 공간상관 계수, L3 필터링을 포함하여, HO 파라미터 변화가 핑퐁, 단절, 무선링크실패(RLF; Radio Link Failure)에 미치는 영향을 확인한다.

II. 시스템 모델

UE는 주기적으로 현재 서빙 셀과 타겟 셀의 RSRP(Reference Signal Received Power)를 측정하고, 다음의 Event A3 조건을 고려한다.

$$RSRP_{\text{target}} - RSRP_{\text{serving}} > \text{Offset} + \text{Hysteresis} \quad (1)$$

여기서 Offset은 HO 경계 위치를 이동시키는 보정 값, Hysteresis는 핑퐁 억제를 위한 추가 마진이다. 순간적인 RSRP 변동에 의한 HO를 방지하기 위해, (1)이 TTT 동안 유지되면 타겟 셀로 HO를 수행한다.

3GPP TR 38.901의 UMa/UMi 시나리오에서 LOS 확률과 LOS/NLOS 경로 손실(dB)은 각각 다음과 같다[3].

$$P_{\text{LOS,UMa}}(d) = \min(18/d, 1) \cdot (1 - e^{-d/63}) + e^{-d/63} \quad (2)$$

$$P_{\text{LOS,UMi}}(d) = \min(18/d, 1) \cdot (1 - e^{-d/36}) + e^{-d/36} \quad (3)$$

$$PL_{\text{LOS,UMa}}(d) = 28.0 + 22\log_{10}(d) + 20\log_{10}(f_c) \quad (4)$$

$$PL_{\text{LOS,UMi}}(d) = 32.4 + 21\log_{10}(d) + 20\log_{10}(f_c) \quad (5)$$

$$PL'_{\text{NLOS,UMa}}(d) = 13.54 + 39.08\log_{10}(d) + 20\log_{10}(f_c) - 0.6(h_{\text{UT}} - 1.5) \quad (6)$$

$$PL'_{\text{NLOS,UMi}}(d) = 22.4 + 35.3\log_{10}(d) + 21.3\log_{10}(f_c) - 0.3(h_{\text{UT}} - 1.5) \quad (7)$$

여기서 $d(\text{m})$ 는 거리, $f_c(\text{GHz})$ 는 반송파 주파수, $h_{\text{UT}}(\text{m})$ 는 UE 안테나 높이이다. 최종 경로 손실 $PL(\text{dB})$ 은 LOS 확률에 따라 PL_{LOS} 또는 $PL_{\text{NLOS}} = \max\{PL_{\text{LOS}}, PL'_{\text{NLOS}}\}$ 로 결정한다. 또한 Gudmundson 모델을 이용하여 차량 이동에 따른 시간 상관 계수를 반영한다.

$$S_t = \rho S_{t-1} + \sqrt{1 - \rho^2} X_t \quad (8)$$

여기서 $\rho = e^{-\Delta d/d_{\text{corr}}}$, $X_t \sim \mathcal{N}(0, \sigma_{\text{SF}}^2)$ 이고, Δd 는 이동 거리, d_{corr} 는 유효 상관 거리, σ_{SF} 는 시나리오에 따른 선폭 표준편차(dB)이다[3].

기지국 송신 전력 $P_{\text{tx}}(\text{dBm})$ 에 대해 RSRP는 다음과 같이 계산한다.

$$RSRP_t = (P_{\text{tx}} - 18) - PL + S_t \quad (9)$$

이때 측정 RSRP의 단기 변동 완화를 위해 L3 필터링을 적용한다.

$$F_t = (1 - \alpha) F_{t-1} + \alpha RSRP_t \quad (10)$$

여기서 F_t 는 시점 t 의 필터링된 RSRP, $\alpha \in (0, 1]$ 는 필터 계수이다.

III. 시뮬레이터 구현

HO 시뮬레이터는 Windows 11 환경에서 Python 3.11.4 기반으로 구현하였고, 사용자 인터페이스(GUI)는 Tkinter를 포함한 Python 표준 라이브러리를 활용한다. 주요 기능으로 UMa/UMi 시나리오와 Event A3 파라미터에 따른 기지국 및 전파 모델 설정 기능을 포함한다. 그림 1은 파라미터 입력과 시간에 따른 RSRP 및 선택한 Cell ID의 변화를 보여준다.

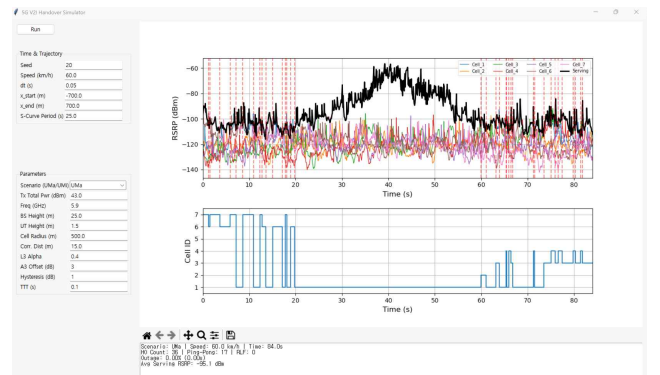


그림 1. Event A3 기반 HO 시뮬레이터

IV. 모의실험 결과

도심 V2I 환경에서 원형 셀 7개를 중첩 배치하고 속도 60 km/h, 방향 전환 간격 25.0 s로 셀을 통과하는 UE를 고려한다. Cell ID 할당은 중심 셀 1번을 기준으로 주변의 6개 인접 셀을 상단 방향의 셀부터 시계 방향으로 2번에서 7번까지 순차적으로 할당한다. 0.05 s마다 랜덤하게 채널 변동을 샘플링하고, 반송파 주파수 f_c 는 5.9 GHz, RLF 임계값은 -120 dBm, 핑퐁 여부 판단을 위한 윈도우는 2.0 s로 설정한다. UMa/UMi의 셀 반경은 각각 500 m/200 m, 송신 전력은 각각 43 dBm/33 dBm로 설정한다. 필터 계수 α 는 0.4로 설정한다.

그림 2는 UMa에서 RSRP와 cell ID 변화를 나타낸 그래프이다. 이때 HO 파라미터 설정은 Offset=0 dB, Hysteresis=0 dB, TTT=0.1 s이다. HO 시점은 빨간색 점선, UE의 serving RSRP는 검은색 실선으로 표시하였다. 실험에서 HO 횟수는 88회, 핑퐁은 57회로 관측되었다. 반면 outage는 0%로 유지되었다. 즉, 빠른 전환으로 링크 단절은 방지되지만, 민감한 파라미터 설정으로 인해 신호의 단기 변동에도 HO가 촉발되어 핑퐁이 증가함을 확인하였다.

그림 3은 UMa에서 RSRP와 cell ID 변화를 나타낸 그래프이다. 이때 HO 파라미터 설정은 Offset=10 dB, Hysteresis=5 dB, TTT=0.4 s이다. 보수적 파라미터 설정으로 인해 HO 횟수가 2회로 감소하고, 핑퐁은 0회로 억제되었다. 그러나 HO 지연으로 인해 outage가 0.77%(0.65 s) 발생하였다. 이는 불필요한 HO는 줄일 수 있으나, 셀 경계 및 신호 저하 구간에서 타겟 셀로의 전환이 늦어져 순간 단절이 증가할 수 있음을 의미한다.

그림 4는 UMi에서 RSRP와 cell ID 변화를 나타낸 그래프이다. 이때 HO 파라미터 설정은 Offset=10 dB, Hysteresis=5 dB, TTT=0.4 s이다. UMi 환경은 셀 반경이 작고 전파 환경 변화가 더 급격하여 동일 파라미터에서 성능 열화가 크게 나타났다. 실험에서 HO 횟수는 3회, 핑퐁은 0회로 관측되었으나, 무선 링크 실패가 1회 발생하였고 outage는 4.02%(1.45 s)로 증가하였다. 즉, UMi에서는 보수적 HO 설정이 HO 지연을 유발하여 무선 링크 실패/단절 위험을 크게 높일 수 있음을 확인하였다.

그림 5는 UMa에서 RSRP와 cell ID 변화를 나타낸 그래프이다. 이때 HO 파라미터 설정은 Offset=5 dB, Hysteresis=3 dB, TTT=0.3 s이다. 중간 수준의 HO 설정에서는 HO 횟수 9회, 핑퐁 0회, 무선 링크 실패 0회, outage 0%로 관측되어, 과도한 핑퐁을 억제하면서도 단절 없이 안정적인 셀 전환이 가능함을 확인하였다.

V. 결론

본 논문은 Event A3 기반 5G V2I 핸드오버 시뮬레이터를 구현하고, 3GPP TR 38.901 도심 채널 모델(LOS/NLOS 확률 및 경로 손실), 공간 상관 웨딩, 그리고 L3 필터링을 반영하여 Offset/Hysteresis/TTT의 영향을 분석하였다. 실험 결과, HO 파라미터 값이 작을수록 빠른 HO로 단절은 줄어들으나 핑퐁이 증가하였고, HO 파라미터 값이 클수록 핑퐁은 감소하나 HO 지연으로 링크 단절이 증가하였으며, 특히 UMi에서 무선 링크 실패 위험이 증가하였다. 향후에는 다중 UE, 경로 다양화, 트래픽 부하, 간섭, 빔 관리 요소를 추가하여 V2I 환경에서의 최적 HO 파라미터 설계로 확장할 계획이다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2022R1F1A1062696). 본 논문의 교신저자는 소재우 임 (이메일: jwso@sogang.ac.kr).

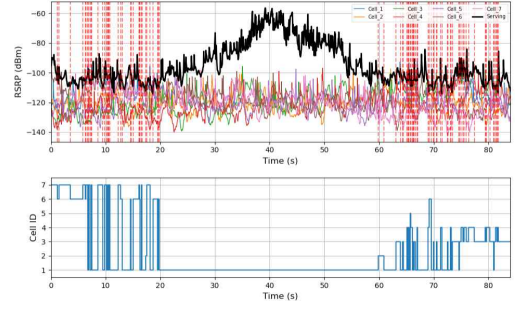


그림 2. UMa에서의 HO (Offset=0, Hysteresis=0, TTT=0.1 s)

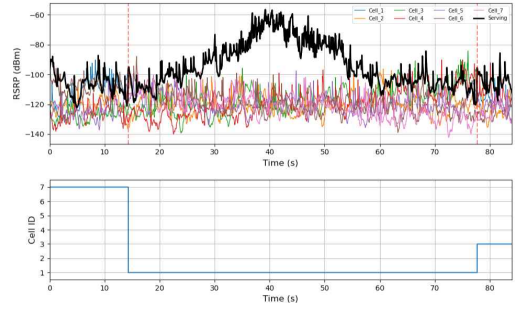


그림 3. UMa에서의 HO (Offset=10 dB, Hysteresis=5 dB, TTT=0.4 s)

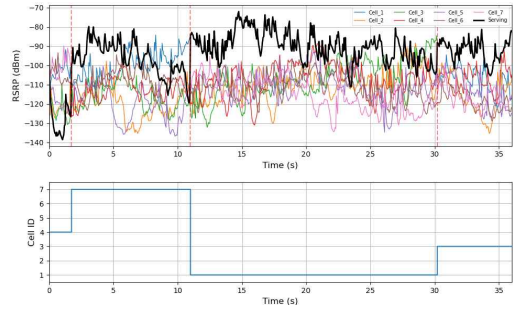


그림 4. UMi에서의 HO (Offset=10 dB, Hysteresis=5 dB, TTT=0.4 s)

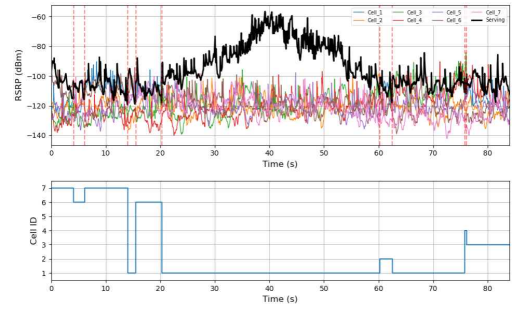


그림 5. UMa에서의 HO (Offset=5 dB, Hysteresis=3 dB, TTT=0.3 s)

참고 문헌

- [1] K. Tan, D. Bremner, J. L. Kernee, Y. Sambo, L. Zhang, and M. A. Imran, "Intelligent handover algorithm for vehicle-to-network communications with double-deep Q-learning," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 71, no. 7, pp. 7848 - 7862, Jul. 2022.
- [2] A. I. Mbulwa, H. T. Yew, A. Chekima, and J. A. Dargham, "Handover performance analysis in 5G ultra-dense networks using self-optimizing hysteresis and time-to-trigger," in *Proc. IEEE Int. Conf. Automatic Control and Intelligent Systems (I2CACIS)*, pp. 352-357, Jun. 2024.
- [3] 3GPP, *Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz*, TR 38.901, ver. 16.1.0, Nov. 2020.