

국내 스타링크 LEO 위성통신 환경에서의 핸드오버가 지연시간에 미치는 영향에 대한 실증 분석

이제용[†], 정성진[†], 박유상[‡], 황현호[†], 한상민[†], 신원재[†]고려대학교 전기전자공학부[†], 보건환경융합과학부[‡]

{jaeyong712[†], jsj3020[†], ysparka[‡], hhhwang0503[†], smhan22[†], wjshin[†]}@korea.ac.kr

Empirical Analysis of Handover Impact on Latency in Starlink LEO Satellite Networks in South Korea

Jaeyong Lee[†], Seongjin Jeong[†], Yusang Park[‡], Hyunho Hwang[†], Sangmin Han[†], Wonjae Shin[†]
School of Electrical Engineering[†], School of Health and Environment[‡], Korea Univ.

요약

2025년 12월 대한민국 내 스타링크(Starlink) 서비스가 출시됨에 따라, 국내 환경에서의 저궤도 위성 통신 실증 분석의 중요성이 대두되고 있다. 기존 지상망이나 정지궤도 위성과 달리, 저궤도 위성 시스템은 위성의 빠른 공전 속도로 인해 빈번한 핸드오버(Handover)가 필연적이며, 이는 지연시간 증가라는 통신 품질 저하의 원인으로 작용한다. 본 논문에서는 국내에서 사용 가능한 스타링크 Gen3 단말기를 활용하여 핸드오버가 지연시간에 미치는 영향을 정량적으로 분석한다. 먼저, 스타링크 시스템이 15초 주기로 스케줄링을 수행하여 핸드오버 여부를 판단하는 것을 실험을 통해 확인하며, 스타링크 단말기의 장애물 지도 데이터와 Two-Line Element(TLE) 데이터를 비교하여 정확한 핸드오버 시점을 식별한다. 분석 결과, 스타링크 시스템이 스케줄링을 수행하는 시점마다 평균 1.88 ms의 지연시간이 증가하나, 실제 위성 간 핸드오버가 발생할 경우 평균 2.04 ms가 추가로 증가함을 확인한다.

I. 연구 배경 및 목적

2025년 12월, 대한민국 내 스타링크(Starlink) 서비스가 출시됨에 따라 저궤도 위성 통신에 대한 대중적 관심이 고조되고 있다 [1]. 스타링크와 같은 저궤도 위성 통신 시스템은 약 550km 상공의 낮은 고도에서 지구 주위를 빠르게 공전한다는 특징이 있다. 이로 인해 지상의 사용자 단말기 입장에서 위성은 하늘을 빠르게 스쳐 지나가는 것처럼 보이며, 단일 위성 과 통신할 수 있는 시간은 수 분 이내로 제한된다. 따라서 끊임 없는 통신 을 제공하기 위해서는 연결된 위성과의 통신이 끊기기 전에 새로운 위성 으로 연결을 갈아타는 핸드오버(Handover)가 필수적으로 발생한다. 스타 링크 사용자 입장에서 지상 통신에서는 발생하지 않는 핸드오버로 인한 지연시간 증가라는 큰 불편함을 겪고 있다.

본 연구는 국내 상용화된 스타링크 서비스에서 빈번히 일어나는 핸드오버가 지연시간에 미치는 영향을 분석하여 향후 관련 연구의 토대를 마련하고자 한다. 이러한 핸드오버가 실제 사용자 체감 품질에 미치는 영향을 분석하기 위해, 주거용 스탠다드 키트 Gen3 단말기를 활용하여 실험을 수행하였다. 분석에는 선행 연구의 방법론을 도입하여 단말기와 통신 중인 위성의 궤적을 추적하고, 이를 Two-Line Element(TLE) 데이터와 정밀 비교하여 실제 연결된 위성 번호를 식별하는 방식을 적용한다 [2]. 이를 통해 정확한 핸드오버 시점을 파악하고, google Remote Procedure Call(gRPC) 프로토콜로 측정한 지연시간 데이터와의 상관관계를 분석함으로써 핸드오버에 따른 성능 변화를 정량적으로 제시한다.

II. TLE 데이터를 이용한 위성 위치 추적 및 핸드오버 시점 파악

본 장에서는 실제 측정된 위성의 궤적과 TLE 데이터 기반의 궤적을 대조하여, 현재 통신 중인 위성 ID를 추출하고 핸드오버의 시점을 판단하여 해당 시점의 지연시간에 핸드오버가 미치는 영향을 분석한다. 먼저, 통신 중인 위성의 위치를 식별하고자 위성의 픽셀 좌표를 포함하는 gRPC 기반 123×123 행렬의 장애물 지도(Obstruction map)의 시변적 특성을 활용한다. 짧은 시간 간격 동안 고정된 장애물의 위치는 변하지 않는 반면, 빠르게 이동하는 저궤도 위성의 통신 경로는 장애물 지도에서 좌표의 변화로 나타난다. 이를 이용하여 그림 1과 같이 연속된 두 시점 ($t-1, t$)에 대해 XOR

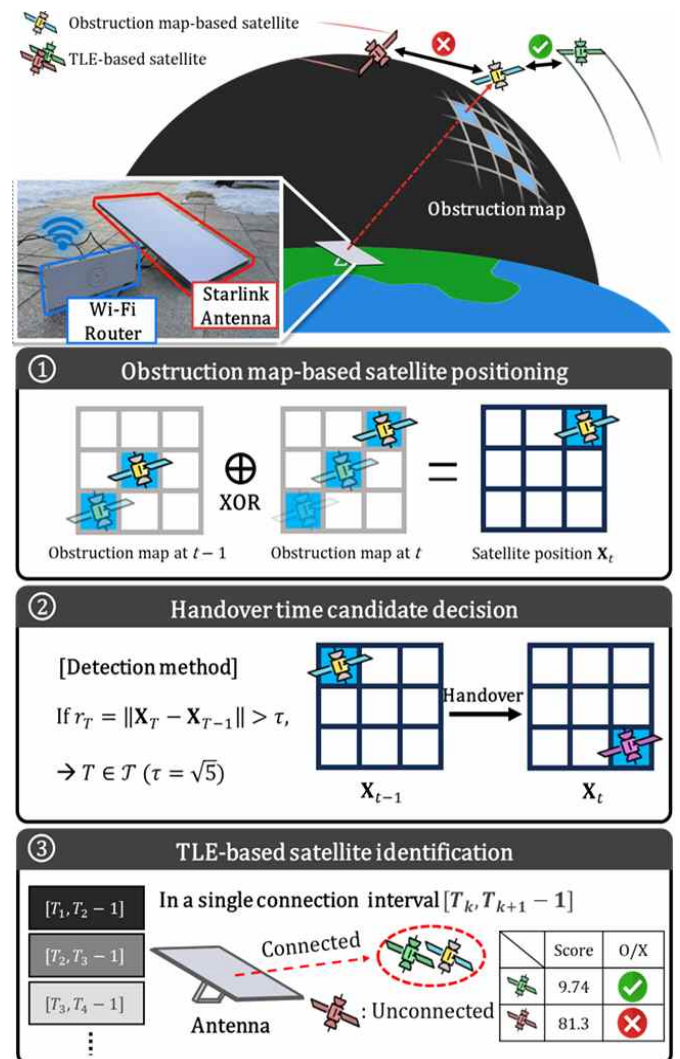


그림 1. 제안하는 위성 식별 및 핸드오버 탐지 메커니즘의 전체 구조: 장애 물 지도 기반 위성 위치 추출, 핸드오버 후보군 탐지, TLE 기반 위성 선별.

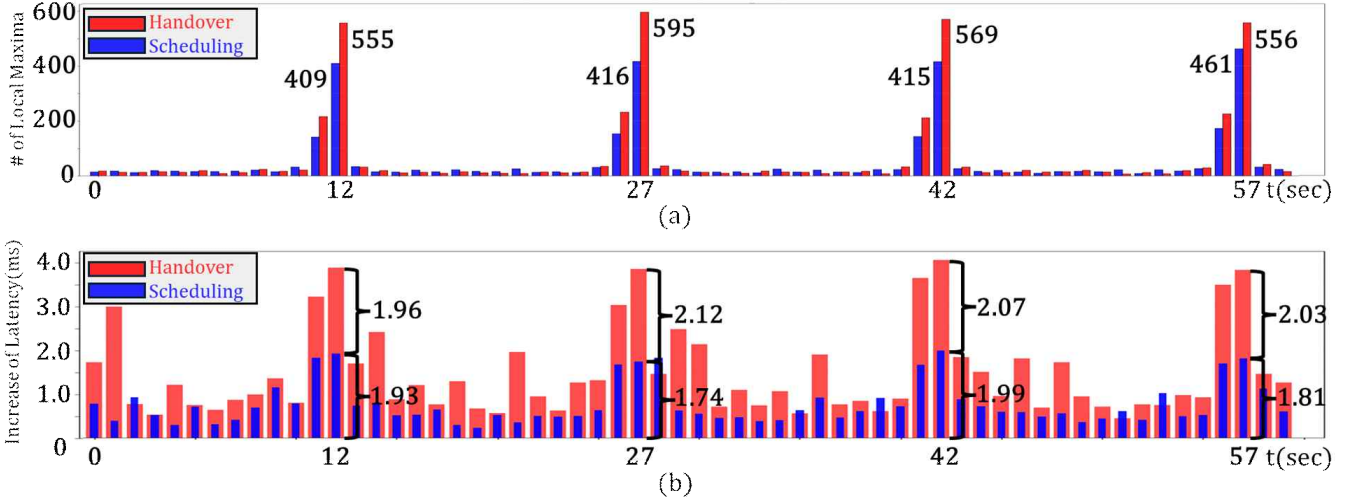


그림 2. 위성 핸드오버 및 스케줄링에 따른 분 단위 지연시간 특성 비교: (a) 극댓값 발생 빈도, (b) 평균 지연시간 증가량.

연산을 수행함으로써 상태 변화가 발생한 위성의 좌표 \mathbf{X}_i 만을 추출한다.

이와 같이 매 시점 위성을 추적하는 과정에서, 핸드오버 시점은 궤적 픽셀 좌표의 급격한 변동을 통해 확인할 수 있다. 동일 위성을 추적하는 동안 좌표 변화는 연속적이고 미세한 반면, 연결 대상이 변경되는 순간에는 좌표가 불연속적으로 급변하기 때문이다. 또한, 데이터의 분포를 바탕으로 연속된 시점의 좌표 간 거리가 $\sqrt{5}$ 를 초과한 경우를 후보로 간주하여 핸드오버 시점 후보 \mathcal{T} 의 원소로 포함한다. 선행 연구를 통해 스케줄링이 15초 주기로 매분 12, 27, 42, 57초 일어나는 것을 바탕으로 측정 데이터에서 ± 3 초 범위에 전체 \mathcal{T} 의 97.3%가 밀집함을 확인하여 ± 3 초를 핸드오버가 발생하는 구간으로 설정한다 [2]. 해당 구간에서 대표 시점을 각각 $T_1, T_2, T_3, \dots, T_n$ 으로 설정한다.

장애물 지도로 얻은 위성의 픽셀 좌표 \mathbf{X}_i 를 방위각 및 고도각으로 변환한 후, 이를 TLE 데이터로 계산한 모든 위성들의 궤적과 비교한다. 궤적 불일치 점수 수식은 (1)과 같다.

$$Score(s) = \sum_{t \in I} d_{ang}(t, s) + d_{dir}(s). \quad (1)$$

여기서 궤적 불일치 점수 $Score(s)$ 는 단일 위성 연결 구간 $[T_{k-1}, T_k - 1]$ 의 시작-중간-종료 시점 $t_{start}, t_{middle}, t_{end}$ 에 대해, 방위각과 고도각에 대한 측정값과 TLE 데이터 기반의 계산값 사이의 구면 각 거리 $d_{ang}(t, s)$ 와 궤적의 진행 방향 벡터 차이 $d_{dir}(s)$ 를 합산하여 산출된다. s 는 TLE 데이터로 시뮬레이션한 스타링크 위성이며, $I = \{t_{start}, t_{middle}, t_{end}\}$ 이다. 최종적으로 이 점수가 최소가 되는 후보 위성을 해당 구간의 연결 위성으로 확정한다. 해당 과정을 거쳐서, 실제로 위성 ID가 변화한 시점을 핸드오버 시점으로 확정한다.

III. 실험 결과 및 분석

실험 환경은 표1과 같이 진행한다. UTC기준 2026년 1월 8일 12시부터 2026년 1월 12일 3시까지 총 88시간의 데이터를 측정하며, 핸드오버 후보 시점을 분석한 결과, 1초 전 좌표와의 거리가 임계값 $\tau = \sqrt{5}$ 를 초과하는 비율은 전체의 약 4.56%로 나타난다. 이 중, 위성 ID가 바뀌지 않은 경우를 제외하고 전체의 3.57%를 최종적으로 핸드오버 시점으로 확정한다. 핸드오버가 지연시간에 미치는 영향을 분석하기 위해, 핸드오버 시점을 기준으로 ± 7 초 구간을 분석 구간으로 설정한다. 그림 2-(a)는 핸드오버 구간과 핸드오버가 일어나지 않은 구간에서 지연시간의 극댓값 발생 빈도를 비교한 결과를 나타낸다. 이를 통해 선행

표 1. 스타링크 단말기 위치 및 측정 기간.

위도	경도	고도	측정 기간(UTC)
37.58°	127.03°	40 m	26.01.08. 12 h ~ 26.01.12.03 h

연구와 같이 15초 주기로 매분 12, 27, 42, 57초에 위성 스케줄링이 일어남을 확인할 수 있다 [2]. 그림 2-(b)에서 핸드오버 여부와 무관하게 위성 스케줄링 시점에서 지연시간이 평균적으로 1.88 ms 증가하는 것을 확인한다. 이는 [3]의 실험 결과의 경향과 일치한다. 또한, 핸드오버가 일어났을 경우 평균적으로 2.04 ms 더 증가한다. 이는 단순한 스케줄링에 의한 부하보다 위성 간 핸드오버 과정이 네트워크 지연에 108.51% 더 큰 영향을 미침을 입증한다.

IV. 결론

본 논문은 대한민국에 상용화된 스타링크 Gen3 단말기를 이용하여 지연시간 측정을 진행하였다. 60초 주기로 측정 데이터를 분석한 결과, 15초 주기로 매분 12, 27, 42, 57초에 위성 스케줄링이 일어나며 핸드오버가 3.57%의 비율로 발생함을 확인하였다. 또한 핸드오버 여부와 관계 없이 스케줄링에 의해 지연시간이 증가하며 핸드오버가 일어났을 경우 스케줄링보다 지연시간이 더 크게 증가하는 것을 확인하였다. 추후에는 궤도 내/간 핸드오버에 따른 지연시간 영향 분석이 필요하다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(RS-2025-00562095)과 정보통신기획평가원(RS-2024-00436887, RS-2024-00359235, RS-2021-0-00260)의 지원을 받아 수행된 연구임.

참고 문헌

- [1] SpaceX, "Starlink", 2026, (<https://starlink.com/kr>).
- [2] A. Ahangarpour *et al.*, "Trajectory-based serving satellite identification with user terminal's field-of-view," in *Proceedings of the 2nd ACM Workshop on LEO Networking and Communication (LEO-NET '24)*, Washington D.C., USA, Nov. 2024, pp. 55 - 60.
- [3] N. Mohan *et al.*, "A Multifaceted Look at Starlink Performance," in *Proceedings of the ACM Web Conference 2024 (WWW '24)*, Singapore, May 2024, pp. 2723 - 2734.