

NTN에서 조건부 핸드오버 실패율 감소를 위한 최적의 저궤도 위성 선정 알고리즘

서 경 희*, 권 진 솔*, 백 호 기°

Optimal Low Earth Orbit Satellite Selection Algorithm to Reduce Handover Failure Rate in NTN

Kyunghee Seo*, Jinsol Kwon*, Hoki Baek°

요 약

저궤도 위성은 NTN(Non-terrestrial Networks)에서 낮은 지연 시간과 높은 데이터 전송 속도를 제공하여 넓은 지역에서도 안정적으로 UE(User-Equipment)를 커버한다. 그러나, 초속 7-8km로 빠르게 이동하는 저궤도 위성은 통신 링크가 자주 변하기 때문에 잦은 핸드오버가 요구된다. 전통적으로 연구된 핸드오버 (Baseline Handover, BHO)는 불필요한 핸드오버와 에너지 소비 증가로 인해 위성과의 통신에는 적합하지 않다. 3GPP Release 16에 명시된 조건부 핸드오버는 다양한 트리거 조건을 활용해 저궤도 위성의 빠른 이동성과 불규칙한 셀 커버리지에도 불구하고 안정적인 네트워크 연결을 유지할 수 있도록 한다. 본 논문에서는 핸드오버 실패 확률을 최소화하고, UE에게 끊임 없는 서비스를 제공하기 위해 최적의 타겟 위성을 선택하는 알고리즘을 제안한다. 제안된 알고리즘은 기존 연구에 위성의 가용 자원량을 추가로 고려해 자원 부족으로 인한 핸드오버 실패를 최소화한다. 제안한 최적화 알고리즘과 보상 함수를 통해 기존에 연구된 알고리즘에 비해 좋은 성능을 보임을 검증하였다.

키워드 : 비지상 네트워크, 핸드오버, 조건부 핸드오버, 최적화

Key Words : Non-terrestrial Networks, Baseline handover, Conditional handover, Optimization

ABSTRACT

LEO satellites provide low latency and high data transmission speeds in NTN, ensuring reliable coverage for UE over wide areas. However, due to their high speed of 7-8 km/s, frequent handovers are required as the communication links with LEO satellites change often. BHO is not suitable for satellite communications due to unnecessary handovers and increased energy consumption. Conditional handover, specified in 3GPP Release 16, uses various trigger conditions to maintain stable network connections despite the rapid movement and irregular cell coverage of LEO satellites. This paper proposes an algorithm for selecting the optimal target satellite to minimize handover failure probability and provide uninterrupted service to UE. The proposed algorithm considers the available resources of the satellites in addition to existing research, reducing handover failures due to resource shortages. The proposed optimization algorithm and reward function demonstrate superior performance compared to existing algorithms.

* 본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 지역지능화혁신인재양성사업의 연구결과로 수행되었음. (IITP-2024-RS-2022-00156389)

♦ First Author : Kyungpook National University, School of Computer Science and Engineering, k0_h2_218@knu.ac.kr, 학생회원

° Corresponding Author : Kyungpook National University, School of Computer Science and Engineering, neloyou@knu.ac.kr, 종신회원

* Kyungpook National University, School of Computer Science and Engineering, ginsoly@knu.ac.kr, 학생회원

논문번호 : 202407-143-C-RU, Received July 12, 2024; Revised July 29, 2024; Accepted July 31, 2024

I. 서 론

NTN은 지상 인프라 구축이 어려운 지역뿐만 아니라, 원격으로 안정적인 통신 서비스를 제공하는 것에 대한 수요 증가로 인해 그 중요성이 더욱 강조되고 있다^[1]. 이로 인해 NTN은 다양한 비지상 통신 수단을 통합해 모바일 장치, IoT 센서와 같은 UE에게 네트워크를 제공한다. 특히 위성은 넓은 지역을 안정적으로 커버하는 데 중요한 역할을 하며, 재난 지역과 같은 극한 상황에서도 UE가 서비스 중단 현상 없이 네트워크에 접근할 수 있도록 지원한다. 저궤도 위성은 지구 표면에서 주로 300-1,500km 고도에 위치한 위성으로^[2], 정지궤도 위성과 중궤도 위성에 비해 UE와의 거리가 가까워 낮은 지연 시간, 높은 데이터 전송 속도를 제공할 수 있다. 그러나 초속 7-8km로 빠르게 이동하기 때문에 위성과 UE 사이의 네트워크는 자주 변화한다. 이러한 환경에서 안정적인 통신 서비스를 제공하기 위한 핸드오버 연구가 필수적이다^[3].

BHO는 UE가 연결된 기지국으로부터 수신하는 신호 세기가 임계값 이하로 떨어질 때 수행된다^[4]. UE와 연결되어있던 기지국이 네트워크 상태 변화를 감지하면 다른 기지국과의 상호작용을 통해 UE가 핸드오버할 수 있도록 지원한다. BHO는 서비스 셀의 신호가 매우 약해진 후에야 핸드오버가 수행되기 때문에 핸드오버 과정에서 기존에 연결된 기지국과의 연결이 불안정해질 수 있고^[5], 이는 높은 핸드오버 실패 비율을 초래한다. 또한 저궤도 위성은 지상 기지국보다 UE와의 거리가 멀기 때문에 UE가 기존에 연결된 위성(Source satellite, SSAT)으로부터 수신한 신호 세기와 주변 위성으로부터 수신한 신호 세기 간에 큰 차이가 없다^[6]. 이는 UE가 다시 SSAT로 핸드오버되는 평풍 현상을 초래하며 불필요한 핸드오버 및 에너지 소모를 증가시킨다. 이에 따라 BHO를 저궤도 위성과 UE 간의 핸드오버에 바로 적용할 수 없다.

3GPP Release 16에 명시된 조건부 핸드오버(Conditional handover, CHO)를 이용하면^[7] 신호 세기 차이 외의 다양한 정보를 고려한 추가 트리거 조건을 활용해 저궤도 위성의 빠른 이동성과 불규칙한 셀 커버리지에도 불구하고 UE는 안정적으로 네트워크에 연결될 수 있다. Release 17에서는 조건부 핸드오버 절차를 구체적으로 다루고 있다^[8]. CHO는 핸드오버 성공 및 실패 사례를 각각 보고함으로써 다음 핸드오버 시 연결될 가능성이 있는 후보 위성 (Candidate satellite, CSAT) 리스트를 업데이트하여 핸드오버 절차를 효율적으로 관리할 수 있다. CHO는 BHO와는 달리 SSAT

와 UE간의 링크가 안정적인 때 미리 핸드오버 준비를 수행하므로, 신호 세기가 빠르게 감소하는 환경에서 핸드오버 실패 문제를 완화하기 위한 개선 방안으로 제안되었다^[9]. 핸드오버를 준비하는 과정에서 SSAT 외에 UE와 연결될 가능성이 있는 위성을 CSAT로 선정하고 그 중에서도 최적의 위성을 선택해 실제로 연결될 위성(Target satellite, TSAT)과 UE 간의 신호가 충분히 강해질 때까지 핸드오버 시도를 지연시킨다. 이는 핸드오버 과정이 안정적으로 이루어지도록 보장하고, 핸드오버 실패 확률을 감소시킨다. CHO에서 발생할 수 있는 불필요한 핸드오버와 그로 인한 네트워크 리소스 낭비, 지연 시간 증가 문제 등을 극복하기 위한 다양한 방법^[5,9-13]이 연구되고 있다. 그러나 핸드오버 실패 자체를 줄이기 위해서는 최적의 TSAT을 선택하는 기술 연구 등의 추가적인 연구가 필요하다.

본 논문에서는 NTN에서 조건부 핸드오버 실패 확률을 줄임으로써 UE에게 끊김 없는 서비스를 제공하기 위해 최적의 저궤도 위성을 선정하는 알고리즘을 제안한다. TSAT 선정 과정에서 위성으로부터의 신호 세기, 통신 링크의 안정성, 서비스 제공 시간 외에 운용 가능한 자원량을 고려해 TSAT의 리소스 부족으로 인한 핸드오버 실패 문제를 완화한다. 2장에서는 기존에 연구된 사례를 소개하며, 3장에서는 기존 연구의 한계를 제시하고, 추가적인 제약 조건과 조건부 핸드오버를 위한 최적의 TSAT 선택 알고리즘을 제안한다. 4장에서 시뮬레이션 결과를 통해 제안한 기법의 성능을 검증한다.

II. 관련 연구

불필요한 핸드오버와 그로 인한 리소스 낭비 문제를 완화하기 위한 CHO 연구가 진행되고 있다. 저궤도 위성 기반 NTN에서 5G NR CHO의 핸드오버 성능을 평가한 연구^[5]는 CHO가 BHO에 비해 핸드오버 실패 확률을 감소시킨다는 것을 보여주었다. 공통 사용자들이 이동할 때 발생하는 핸드오버 성능을 분석해 핸드오버 실패와 불필요한 핸드오버를 줄이기 위한 전략을 제시한 연구와^[9], NTN에서의 자원 스케줄링과 제어를 위해 QoS 기반 핸드오버 선택 방식을 제안해 모든 사용자의 평균 QoS를 극대화하는 연구^[11]도 진행되었다. 또한, 사용자의 방향에 따라 안테나의 방향을 재정렬해야 하는 상황에서 조건부 핸드오버를 활용해 핸드오버 실패와 연결 중단 시간을 최소화하는 방법이 연구되었다^[12]. 최적의 타겟 셀 및 위성을 선택하는 것은 CHO에서 중요한 문제로 여겨진다. AI/ML을 통해 예측된 값을 바탕으로 최적의 타겟 셀을 인식한 연구^[10]는 최적의

타겟이 아닌 셀로 핸드오버 되는 문제와 평풍 현상을 방지하기 위한 최적화 연구를 진행했다. 또한 조건부 핸드오버 과정에서 선정되었던 후보 셀들을 재사용하는 것을 기반으로, 신호 오버헤드와 자원 예약 시간을 줄임으로써 타겟 셀로의 빠른 조건부 핸드오버를 시도하는 연구^[13], 서비스 연속성을 유지할 수 있는 핸드오버 매커니즘을 개발하여 저궤도 위성 기반 NTN에서의 핸드오버 문제를 최적화하는 연구^[14]가 진행되었다.

[6]에서 제안한 최적의 타겟 위성 선정 알고리즘은 현재 타임 슬롯에서 TSAT와 UE 간의 서비스 능력, SSAT와 UE 간의 서비스 능력을 계산해 TSAT의 서비스 능력이 더 좋을 경우 해당 위성으로의 핸드오버를 수행한다. 타임 슬롯 d 에서의 서비스 능력 $C_{L,E}^d(t)$ 는 저궤도 위성 집합 $\{s_1, s_2, \dots, s_L\} \in S$ 에 속하는 위성 s_L 과 UE 집합 $\{u_1, u_2, \dots, u_E\} \in U$ 에 속하는 UE u_E 사이 링크의 경로 손실 보정 계수 $\gamma_{L,E}^d$ 와 데이터 전송 속도 $TR_{L,E}^d$, 위성이 UE에게 서비스를 제공할 수 있는 잔여 시간의 곱으로 표현된다. 잔여 시간은 위성 s_L 이 UE u_E 에게 서비스를 제공할 수 있는 총 시간 $t_{L,E}^{total}$ 에서 지금까지의 시간 t 를 뺀 값으로 계산된다. 이는 수식 (1)과 같이 표현된다.

$$C_{L,E}^d(t) = \gamma_{L,E}^d \cdot TR_{L,E}^d \cdot (t_{L,E}^{total} - t), \quad \forall s_L \in S, u_E \in U, \quad (1)$$

핸드오버는 각 CSAT 중 최적의 TSAT을 선정해 해당 위성으로 수행되어야 하는데, 식 (1)을 사용할 경우, CSAT의 $TR_{L,E}^d$ 값이 작더라도 TSAT으로 선택될 수 있기 때문에 보상 매커니즘을 도입해 안정적으로 UE의 QoS를 보장해야 한다.

$$R_{L,E}^d(\lambda_{L,E}^d) = \begin{cases} +1 \cdot \rho \cdot (t_{L,E}^{total} - t_{d-1}) \cdot \lambda_{L,E}^d & \text{Case 1} \\ -1 \cdot \rho \cdot |TR_{L,E}^d - TR_{L,E}^{d-1}| \cdot (t_{L,E}^{total} - t_{d-1}) \cdot \lambda_{L,E}^d & \text{Case 2,} \end{cases} \quad (2)$$

보상 함수 $R_{L,E}^d(\lambda_{L,E}^d)$ 는 d 에서 s_L 과 u_E 사이에 링크가 존재할 경우, 링크 데이터 전송 속도와 잔여 서비스 시간의 곱에 가중치 ρ 를 부여해 결정된다. $\lambda_{L,E}^d$ 는 s_L 과 u_E 사이의 링크 존재 여부를 나타내는 변수로, 1은 링크가 존재함을, 0을 존재하지 않음을 의미한다. 식 (2)의 Case 1은 CSAT가 u_E 에게 제공하는 서비스 능력이 SSAT보다 더 좋을 경우, CSAT의 잔여 서비스 시간을 기준으로 보상값이 결정됨을 의미한다. Case 2는 반대

의 상황으로, 잔여 서비스 시간에 서비스 능력의 크기만큼의 음수를 곱해 보상값이 음수로 도출되게 한다. 이렇게 하면 낮은 서비스 능력을 제공하는 CSAT이 UE에게 제공할 수 있는 서비스 시간이 크다는 이유로 TSAT으로 선택되는 상황을 방지할 수 있다.

$$R_{total}^d(\lambda_{L,E}^d) = \sum_{s_L \in S} \sum_{u_E \in U} R_{L,E}^d(\lambda_{L,E}^d) \quad (3)$$

NTN에서 핸드오버의 최대 성능을 달성하기 위해서는 최대한 많은 UE가 최적의 TSAT을 선정하는 것이 중요하다. 식 (3)은 d 에서 같은 위성에게 커버되는 모든 UE의 총 보상 R_{total}^d 을 의미한다. 이 보상 값이 최대가 되게 하는 모든 $\lambda_{L,E}^d$ 를 찾기 위해 식 (4)와 같이 최적화 문제로 표현했다. d 에서 모든 UE는 한 대의 위성과 연결되어야 하며, 각 위성에는 최대 k 개의 UE가 연결될 수 있다.

$$\begin{aligned} \lambda_{total}^d &= \operatorname{argmax} R_{total}^d(\lambda_{L,E}^d), \quad \forall s_L \in S, u_E \in U. \\ \text{s.t.} \quad &\sum_{u_E \in U} \lambda_{L,E}^d \leq k, \quad \forall s_L \in S \\ &\sum_{s_L \in S} \lambda_{L,E}^d = 1, \quad \forall u_E \in U \end{aligned} \quad (4)$$

각 UE가 가장 큰 $R_{L,E}^d$ 를 선택하면 λ_{total}^d 의 값이 최대에 가까워지므로 UE와 위성 간의 링크에 가중치를 두고, 이 값을 더 직관적으로 비교하기 위해 식 (5)와 같이 표현하였다.

$$\omega_{L,E}^d = \frac{R_{L,E}^d + |\min(R_{L,E}^d)| + 1}{\sum (R_{L,E}^d + |\min(R_{L,E}^d)| + 1)}, \quad s_L \in \{S | \lambda_{L,E}^d = 1\}. \quad (5)$$

식 (2)의 근사적 최적해를 구하기 위해 UE는 CSAT을 식별하고, $\omega_{L,E}^d$ 를 계산해 각 위성에 대해 순위를 매겨 최적의 TSAT을 선택한다.

III. 제안 기법

본 장에서는 제안하는 알고리즘의 기반이 되는 시스템 구성을 설명한다. 또한 기존에 연구된 최적화 전략의 한계를 보완할 수 있는 추가적인 제약 조건을 제시하고 이를 이용한 최적의 TSAT 선택 알고리즘을 새롭게 제안한다.

3.1 시스템 구성

NTN을 구성하는 저궤도 위성이 정해진 궤도를 따라 이동하며 지상 UE들을 지속적으로 서비스함을 가정한다. 저궤도 위성은 위성 간 링크를 통해 제어 및 데이터 신호를 주고받을 수 있으며, UE에는 휴대용 위성 인터넷 단말기가 부착되어 있어, 위성과의 직접적인 데이터 송수신이 가능하다. 위성과의 채널에 존재하는 path loss는 식 (6)과 같이 자유 공간 전파 손실 PL_{free} , 새도우 페이딩으로 인한 경로 손실 PL_{shadow} , 대기 흡수 손실 PL_{atmos} 을 고려한다.

$$PL[dB] = PL_{free} + PL_{shadow} + PL_{atmos} \quad (6)$$

자유 공간 전파 손실은 전파가 장애물이나 대기층의 영향을 받지 않는 공간에서의 신호 감쇠를 의미하며, 전파 경로 길이와 주파수에 따라 계산된다. 전파가 건물, 나무 등의 물체에 의해 차단되거나 반사되면서 발생하는 새도우 페이딩으로 인한 신호 감쇠는 로그 정규 분포를 따른다. 대기 흡수 손실은 ITU-R에서 제공한 표준 문서를 따르며, 주로 산소와 수증기에 의한 신호 감쇠를 포함한다⁷⁾.

타임 슬롯 t_d 는 UE의 커버리지 상태가 변하는 때에 따라 구분되며, 한 타임 슬롯 내에서는 다른 위성으로의 핸드오버가 불가능하고, UE는 한 대의 위성에게 의해서만 서비스되어야 한다.

CHO는 그림 1의 절차와 같이 진행된다. UE는 CSAT들의 신호를 수신하여 SSAT에게 자신의 QoS와

수신한 CSAT 정보를 전달한다. SSAT는 전달 받은 정보를 토대로 각 CSAT에게 핸드오버 가능 여부 및 UE의 정보가 포함된 핸드오버 요청 메시지를 전송한다. 각 CSAT는 가용 가능한 리소스, 현재 연결된 UE의 수 등 자신의 서비스 능력과 UE의 요구 조건을 고려해 해당 UE를 추가로 연결할 수 있는지 여부를 판단해서 SSAT에게 응답 메시지를 전송하고, 핸드오버가 가능한 CSAT들은 핸드오버 대기 상태로 진입한다. 응답 메시지를 수신한 SSAT는 UE에게 최종 확정된 TSAT의 정보를 전송하고, UE는 TSAT을 모니터링하며 조건에 따라 해당 위성으로의 핸드오버를 수행한다.

3.2 최적의 타겟 위성 선정 알고리즘

[6]에서 제안한 타겟 위성 선택 알고리즘에는 한계점이 존재한다. 한 위성에 연결될 수 있는 UE의 개수를 제한해 한정된 위성의 자원을 균등하게 분배하는 효과를 기대했지만, UE마다 요구하는 자원량이 다를 수 있어 이를 고려한 알고리즘이 연구되어야 한다. 예를 들어 d 에서 잔여 자원량은 없지만 최대 연결 가능 UE 수를 초과하지 않은 s_L 이 존재하는 상황을 가정한다. 새로운 UE u_E 가 s_L 에 연결을 시도하려는 경우, [6]에서 제안한 알고리즘을 이용하면 위성에 연결될 수 있는 최대 UE량을 초과하지 않기 때문에 u_E 가 s_L 에 연결되는 시나리오가 발생한다. 그러나 실제로는 s_L 의 잔여 자원량이 없기 때문에 이 시나리오는 잘못된 위성으로의 핸드오버를 의미하게 된다. 또한 위성의 최대 서비스 용량이 연결된 각 UE의 총 자원 요구량을 초과하지 않는다는 제약이 필요하다. 위 내용을 식으로 표현하면 (7)과 같은 제약 조건을 도출할 수 있다.

$$\begin{aligned} s.t. \quad & R_{s_L}^d \geq R_{s_E}^d \\ & \sum_{u_E \in U} R_{s_E}^d \cdot \lambda_{L,E}^d(t) \leq R_{s_L}^d, \forall s_L \in S, \end{aligned} \quad (7)$$

따라서 최적화 문제 (4)는 (7)의 제약조건을 추가하여 (8)과 같이 재정의된다. 이 경우, UE가 타겟 위성으로 선택할 수 있는 저궤도 위성 집합이 줄어들지만 잘못된 핸드오버를 방지할 수 있다.

$$\begin{aligned} \lambda_{total}^d &= \operatorname{argmax} R_{total}^d(\lambda_{L,E}^d), \forall s_L \in S, u_E \in U. \\ s.t. \quad & \sum_{u_E \in U} \lambda_{L,E}^d \leq k, \forall s_L \in S \\ & \sum_{s_L \in S} \lambda_{L,E}^d = 1, \forall u_E \in U \\ & R_{s_L}^d \geq R_{s_E}^d \\ & \sum_{u_E \in U} R_{s_E}^d \cdot \lambda_{L,E}^d(t) \leq R_{s_L}^d, \forall s_L \in S, \end{aligned} \quad (8)$$

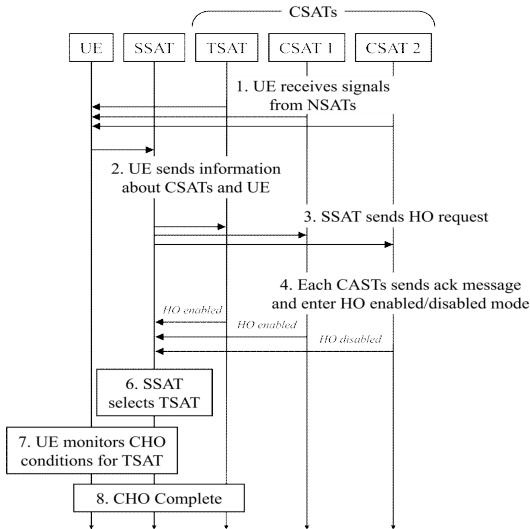


그림 1. Conditional handover의 기본 절차
Fig. 1. Basic process of conditional handover

$$R_{L,E}^d(\lambda_{L,E}^d) = \begin{cases} +1 \cdot \rho \cdot TR_{L,E}^d - TR_{L,E}^{d-1} \cdot (t_{L,E}^{total} - t_{d-1}) \cdot \lambda_{L,E}^d & \text{Case 1} \\ -1 \cdot \rho \cdot |TR_{L,E}^d - TR_{L,E}^{d-1}| \cdot \frac{1}{(t_{L,E}^{total} - t_{d-1})} \cdot \lambda_{L,E}^d & \text{Case 2,} \end{cases} \quad (9)$$

또한 기존 연구에서 제안한 보상 함수의 Case 2에서는 SSAT와의 서비스 능력 차에 절대값을 취해 보상 함수의 결과가 음수값이 되게 함으로써 그 위성이 선택될 확률을 낮추고자 한다. 그러나 보상 함수 식에 잔여 서비스 시간 값을 그대로 곱했기 때문에, 오히려 서비스 시간이 더 적은 CSAT가 선택될 수 있고, 이는 잦은 핸드오버를 야기한다. 따라서 잔여 서비스 시간 값의 역수를 곱해서 보상 함수 식을 (9)와 같이 재정의한다.

제안하는 최적화 기법과 보상 함수를 이용해 근사 최적해를 구하기 위한 최적의 TSAT 선정 알고리즘을 그림 2와 같이 제시한다. 알고리즘은 최적화 문제 (8)의 목적 함수를 최적화하기 위해 설계된 보상 함수를 사용해 각 타임 슬롯에서 최적의 후보 위성을 선택한다. 각 타임 슬롯에서 n 개의 후보 위성이 존재한다고 가정하면, 알고리즘의 시간 복잡도는 보상 함수의 가중치를 구하는 과정에서 가장 높은 복잡도를 가져 $O(n \log n)$ 이 된다. 알고리즘은 타임 슬롯 내에서 유한한 후보 위성 집합에 대해 결정적인 평가 방식을 사용하여 최적의 후보를 선택하기 때문에 수렴성이 보장된다.

Algorithm 1 The Optimal Target Satellite Selection Algorithm

```

1: Let source satellite  $s_s$ , and target satellite  $s_t$ 
2:  $u_E$  determines if  $[t_{d-1}, t_d]$  is an active time slot or not;
3: if  $[t_{d-1}, t_d]$  is passive time slot then
4:   Calculate  $C_{L,E}^d$  for  $s_t$ ;
5:   Carry out the CHO when  $C_{L,E}^d > C_{s,E}^d$ ;
6: else
7:    $[t_{d-1}, t_d]$  is active time slot;
8:   Calculate  $t_{L,E}^{total}$  for each candidate  $s_L$ ;
9:   Calculate  $C_{L,E}^d$  for each candidate  $s_L$ ;
10:  Determine reward cases of  $\{s_L\}$  based on  $\{TR_{L,E}^d\}$  and  $\{Rs_{L,E}^d\}$ ;
11:  Calculate selection weight  $\omega_{L,E}^d$  for each candidate  $s_L$ ;
12:  Calculate  $Rs_{L,E}^d$  for each candidate  $s_L$ ;
13:  if  $\omega_{L,E}^d$  is the maximum value then
14:     $s_t = s_s$  and algorithm break;
15:  else
16:    Prepare the CHO based on  $\{\omega_{L,E}^d\}$ ;
17:    Obtain the optimal  $s_L$  as target satellite  $s_t$ ;
18:  end if
19: end if
20: return  $s_t$ ;

```

그림 2. 최적의 TSAT 선정 알고리즘

Fig. 2. The optimal TSAT selection algorithm

IV. 시뮬레이션 환경 및 결과

본 장에서는 시뮬레이션 환경을 소개하고, 본 논문에서

제시하는 최적화 문제와 보상 함수를 이용한 시뮬레이션 결과들을 제시한다.

표 1은 시뮬레이션을 진행할 때 사용한 파라미터를 정리한 표이다. 시뮬레이션은 매트랩의 CVX를 이용해 구현되었다. 위성과 UE 간의 서비스 능력은 위성이 정해진 궤도 위에서 이동한다는 특성을 반영하여 코사인 함수에 노이즈를 추가해 시간이 변화함에 따라 증감하는 형태로 설정했다. UE는 위성에 비해 현저히 느린 속도로 이동하므로 UE의 위치는 시뮬레이션 과정에서 변하지 않음을 가정했으며, 가까운 거리에 위치한 UE들은 같은 위성과의 서비스 능력이 비슷한 값을 갖도록 설정했다. 제안하는 보상 함수와 최적화 전략의 성능은 [6]에서 제안한 보상 함수와 최적화 전략과 함께 비교되었다. 두 기법은 공통적으로 $N_{SAT}=7$, $N_{UE}=25$, $N_{timeslot}=6$ 으로 설정했으며, $N_{connection}=5$, $N_{connection}=4$ 인 상황에서 ρ 값을 0.1부터 1까지 0.1씩 증가시키며 시뮬레이션을 수행했다.

그림 3은 하나의 UE u_E 관점에서 시간에 따른 위성과의 $TR_{L,E}^d$ 변화를 나타낸 그래프이다. $N_{connection}=4$, $\rho=0.8$ 로 설정했으며, u_E 에게 제공할 수 있는 위성의 초기 서비스 시간을 표 2와 같이 정의한다. 각 타임 슬롯이 지날 때마다 잔여 서비스 시간은 5분씩 감소함을 가정한다. 기존 연구^[6]의 보상 함수와 제안하는 보상 함수의 성능을 비교하기 위해 기존 연구의 위성 선택 알고리즘과 보상 함수를 사용하는 CMCR(Conventional Method with Conventional Reward function) 방식과, 기존 연구의 알고리즘과 제안하는 보상 함수를 사용하는 CMPR(Conventional Method with Proposed Reward) 방식을 비교한다. 시뮬레이션 결과, 표 3을 통해 CMCR은 $d=3, 4$ 에서 잔여 서비스 시간이 더 낮은 위성을 TSAT으로 선정해 핸드오버 하는 현상이 발생

표 1. 제시하는 알고리즘의 파라미터들과 그 설명

Table 1. Parameters of the presented algorithm and their descriptions

Parameter	Description
N_{SAT}	Number of LEO satellites
N_{UE}	Number of UEs
$N_{timeslot}$	Number of time slots
$N_{connection}$	Maximum number of UEs that can be connected to one satellite
ρ	Reward function weights
$N_{handover}$	Number of handover occurrences
P_{match}	Percentage of correct answers

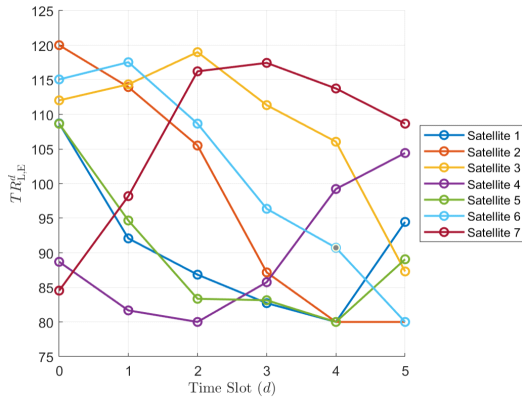


그림 3. 각 저궤도 위성과 하나의 UE 간의 데이터 전송 속도 변화
Fig. 3. Variation of data transmission rate between each LEO satellite and a single UE

표 2. 각 위성 s_L 이 UE u_E 에게 제공 가능한 초기 서비스 시간
Table 2. The initial available service time each satellite s_L can provide to the UE u_E

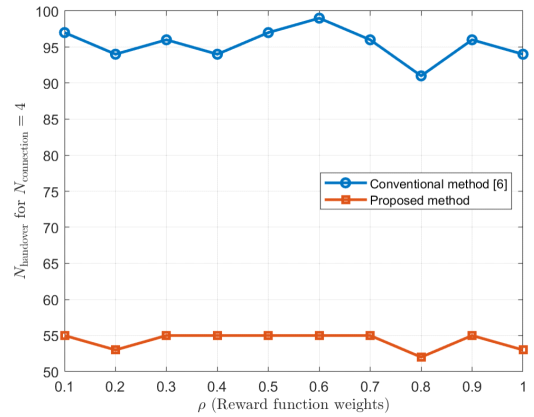
Initial available service time (min)						
s_1	s_2	s_3	s_4	s_5	s_6	s_7
50	50	45	45	35	40	35

표 3. 타임 슬롯 d 에서 각 기법의 핸드오버 결과
Table 3. Handover results of each method at time slot d

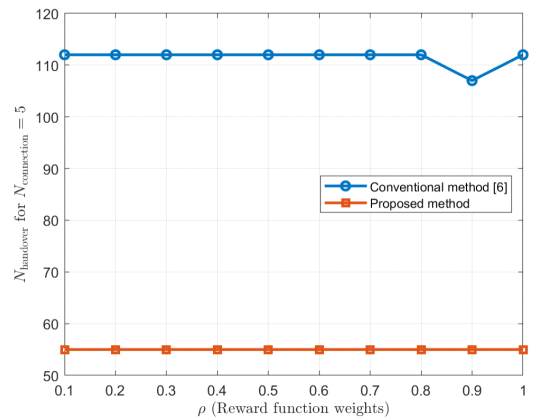
	$d=1$	$d=2$	$d=3$	$d=4$	$d=5$
CMCR[6]	6	3	7	7	7
CMPR[6]	6	3	3	3	7
answer	6	3	3	3	7

함을 알 수 있었다.

그림 4는 기존 연구의 보상 함수와 제안한 보상 함수를 사용했을 때의 핸드오버 횟수를 비교하기 위한 그래프이다. 그림 4(a)는 한 위성에 연결될 수 있는 UE를 4개로, 그림 4(b)는 5개로 설정했다. 한 위성에 연결될 수 있는 UE의 최대값이 늘어나면 UE는 더 많은 선택지를 갖게 되고, 이는 더 좋은 서비스 능력이나 잔여 시간을 가진 위성으로의 전환을 유도한다. [6]에서 제안한 보상 함수에 비해 본 논문에서 제안하는 보상 함수는 잔여 서비스 시간이 얼마 남지 않은 위성으로의 핸드오버를 통제할 수 있었고, 이는 그림 3에서 핸드오버 횟수가 약 50% 감소했음을 통해 확인할 수 있다.



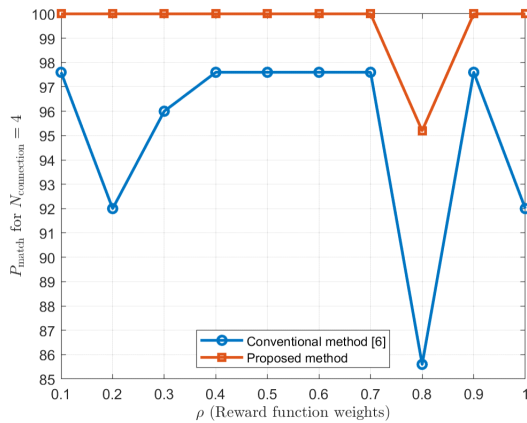
(a) Set the maximum number of UEs that can be connected to one satellite to 4



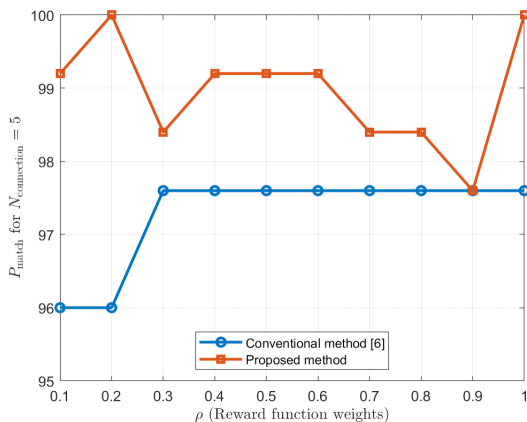
(b) Set the maximum number of UEs that can be connected to one satellite to 5

그림 4. 한 위성에 연결될 수 있는 UE의 개수에 따른 핸드오버 횟수 비교
Fig. 4. Comparing the number of handovers based on the number of UEs that can be connected to a satellite

그림 5는 [6]과 제안한 연구의 최적화 전략을 적용했을 때 보상 함수의 가중치 값에 따른 정답률을 보여준다. 정답률은 실제로 연결되어야 하는 저궤도 위성과의 쌍의 개수 중 각 알고리즘이 맞힌 개수를 백분율로 나타낸 값이다. 시뮬레이션에서는 초기 연결 상태인 타임 슬롯 0을 제외하고 각 알고리즘이 125개의 정답 중 몇 개를 맞혔는지를 비율로 나타내었다. 그림 5(a)는 한 위성에 연결될 수 있는 UE의 수를 4개로 설정했을 때의 그래프로, 기존에 연구된 최적화 알고리즘을 사용할 경우 $\rho=0.8$ 일 때 85.6%, $\rho=0.2, 1$ 일 때 92%, $\rho=0.3$ 일 때 96%의 정답률을 달성했으며, 나머지 가중치 값에서는 최고 정답률인 97.6%를 달성했다. 제안



(a) Set the maximum number of UEs that can be connected to one satellite to 4



(b) Set the maximum number of UEs that can be connected to one satellite to 5

그림 5. 한 위성에 연결될 수 있는 UE의 개수에 따른 핸드 오버 정답률 비교

Fig. 5. Compare handover correctness rates based on the number of UEs that can be connected to a satellite

한 최적화 알고리즘을 사용한 경우 $\rho = 0.8$ 일 때 정답률이 95.2% 인 것을 제외하고 모두 97.6%의 정답률을 달성했다. 제안한 최적화 알고리즘을 사용한 경우에는 $\rho = 0.9$ 일 때 97.6%, $\rho = 0.3, 0.7, 0.8$ 일 때 98.4, $\rho = 0.1, 0.4 \sim 0.6$ 일 때 99.2%의 정답률을 달성했으며, $\rho = 0.2, 1$ 일 때 최고 정답률인 100%를 달성했다. 기존 연구는 UE의 요구 자원량이 TSAT의 잔여 자원량을 초과하는 상황에서도 핸드오버를 수행하는 문제가 발생했다.

V. 결 론

본 논문에서는 NTN에서 저궤도 위성 기반의 조건부 핸드오버 성능을 최적화하기 위한 새로운 알고리즘을 제안하고 그 효과를 검증했다. 제안한 알고리즘은 기존 연구와 달리 최적의 TSAT을 선택하는 과정에서 운용 가능한 자원의 수를 고려함으로써 자원 부족으로 인한 핸드오버 실패 문제를 줄이는 방법을 도입하였다.

시뮬레이션 결과, 제안된 최적화 알고리즘과 보상 함수가 기존의 방법에 비해 핸드오버 횟수를 약 50% 줄일 수 있음을 확인하였다. 또한, 제안한 최적화 전략을 이용하여 시뮬레이션을 진행했을 때의 핸드오버 결과가 최적에 더 가까운 값을 도출함을 알 수 있었다.

본 연구의 결과는 NTN 환경에서 안정적이고 효율적인 핸드오버를 실현하는 데 중요한 기여를 할 것으로 기대된다. 본 연구는 다양한 트래픽 패턴과 사용자 요구 사항을 반영한 추가적인 최적화 기법 개발들의 연구로 확장될 수 있을 것이다.

References

- [1] M. M. Azari, S. Solanki, S. Chatzinotas, O. Kotheli, H. Sallouha, A. Colpaert, J. F. M. Montoya, S. Pollin, A. Haqiqatnejad, A. Mostanni, E. Lagunas, and B. Ottersten, "Evolution of non-terrestrial networks from 5G to 6G: A survey," *IEEE Commun. Surv. & Tuts.*, vol. 24, no. 4, pp. 2633-2672, Fourthquarter 2022. (<https://doi.org/10.1109/COMST.2022.3199901>)
- [2] B. Lee, N. Lee, J.-H. Kim, and W. Shin, "A survey of LEO satellite networks for 5G and beyond: Channel modeling, research trends, and open challenges," *J. KICS*, vol. 46, no. 7, pp. 1097-1108, 2021. (<https://doi.org/10.7840/kics.2021.46.7.1097>)
- [3] A. Warriar, L. Aljaburi, H. Whitworth, S. Al-Rubaye, and A. Tsourdos, "Future 6G communications powering vertical handover in non-terrestrial networks," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 33016-33034, 2024. (<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3371906>)
- [4] *Procedures for the 5G System (5GS)*, document TR 23.502, 3GPP, (Release 15),

- 2024.
- [5] E. Juan, M. Lauridsen, J. Wigard, and P. Mogensen, "Performance evaluation of the 5G NR conditional handover in LEO-based non-terrestrial networks," *2022 IEEE WCNC*, Austin, TX, USA, 2022.
(<https://doi.org/10.1109/WCNC51071.2022.9771987>)
- [6] F. Wang, D. Jiang, Z. Wang, J. Chen, and T. Q. S. Quek, "Seamless handover in LEO based non-terrestrial networks: Service continuity and optimization," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 71, no. 2, pp. 1008-1023, Feb. 2023.
(<https://doi.org/10.1109/TCOMM.2022.3229014>)
- [7] *Solutions for NR to Support Non-Terrestrial Networks (NTN)*, document TR 38.821, 3GPP, (Release 16), 2023
- [8] *Radio Resource Control (RRC) protocol specification*, document TS 38.331, 3GPP, (Release 17), 2024.
- [9] Y. Guo and H. Zhang, "3D boundary modeling and handover analysis of aerial users in heterogeneous networks," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 72, no. 10, pp. 13523-13529, Oct. 2023.
(<https://doi.org/10.1109/TVT.2023.3276890>)
- [10] H.-S. Park, H. Kim, C. Lee, and H. Lee, "Mobility management paradigm shift: From reactive to proactive handover using AI/ML," *IEEE Netw.*, vol. 38, no. 2, pp. 18-25, Mar. 2024.
(<https://doi.org/10.1109/MNET.2024.3357108>)
- [11] Y. Zhang, J. Wang, Q. Li, J. Chen, H. Feng, and S. He, "Joint communication, sensing, and computing in space-air-ground integrated networks: System architecture and handover procedure," *IEEE Veh. Technol. Mag.*, vol. 19, no. 2, pp. 70-78, Jun. 2024.
(<https://doi.org/10.1109/MVT.2024.3371420>)
- [12] M. F. Özkoc, S. Goyal, A. Koutsaftis, U. Salim, P. Liu, R. Pragada, and S. S. Panwar, "On the impact of rotational mobility in directional cellular systems," *IEEE Open J. Commun. Soc.*, vol. 3, pp. 1119-1133, 2022.
(<https://doi.org/10.1109/OJCOMS.2022.3192006>)
- [13] S. B. Iqbal, S. Nadaf, A. Awada, U. Karabulut, P. Schulz, and G. P. Fettweis, "On the analysis and optimization of fast conditional handover with hand blockage for mobility," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 30040-30056, 2023.
(<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3260630>)

서 경 희 (Kyunghee Seo)



2023년 8월 : 경북대학교 컴퓨터
학부 졸업
2023년 9월~현재 : 경북대학교
컴퓨터학부 석사과정
<관심분야> 5G/6G, Non-terrestrial
Networks, Handover, V2X
[ORCID:0009-0005-0487-384X]

권 진 솔 (Jinsol Kwon)



2022년 2월 : 경북대학교 컴퓨터
학부 졸업
2024년 2월 : 경북대학교 컴퓨터
학부 석사
2024년 3월~현재 : 경북대학교
컴퓨터학부 박사과정
<관심분야> 항재밍, 주파수 도
약, 무선통신
[ORCID:0009-0003-1408-3679]

백 호 기 (Hoki Baek)



2006년 2월 : 아주대학교 정보
및 컴퓨터공학 학사

2008년 2월 : 아주대학교 정보통신공학 석사

2014년 2월 : 아주대학교 컴퓨터공학 박사

2014년 3월~2015년 2월 : 아주대학교 장위국방연구소 전임연구원

2015년 3월~2021년 2월 : 아주대학교 국방디지털융합학과 강의교수

2021년 3월~현재 : 경북대학교 컴퓨터학부 조교수

<관심분야> 5G/6G, Spectrum sharing, Non-terrestrial networks, UAV networks, Tactical networks, IoT, V2X, Networked PNT (Positioning, navigation and timing), Manned-Unmanned Teaming

[ORCID:0000-0001-9213-7845]