

저궤도 위성 네트워크에서 동기화 지연 시 목적지 오류 패킷 처리를 위한 경량 라우팅 전략

백수빈, 최지환
한국과학기술원 항공우주공학과
{havenbaek, jhch}@kaist.ac.kr

A Lightweight Routing Strategy for Synchronization Delay-Induced Errors in LEO Satellite Networks

Subin Baek, Jihwan Choi
Dept. of Aerospace Eng., KAIST

요약

SDN(Software-Defined Network) 기반의 위성 간 광통신을 사용하는 저궤도 위성 통신 시스템에서 핸드오버 이후 라우팅 정보 업데이트가 반영되기 전 발생한 패킷의 경로 재설정 문제를 위성에서 처리할 수 있는 메커니즘을 제안한다. 이 방법은 위성이 적은 온보딩 능력만으로도 직접 재전송을 처리함으로써 별도의 복잡한 경로 재계산 혹은 재전송 과정 없이 즉각적으로 오류에 대응할 수 있고, 효율적으로 네트워크 성능을 향상시키며 사용자 경험 개선에 기여한다.

I. 서론

더 빠른 데이터 전송 속도, 더 낮은 지연 시간, 향상된 연결성 등을 목표로 하는 6G 네트워크에서 저궤도 위성 통신 시스템은 기존 정지궤도 위성 대비 낮은 전파지연, 광통신을 이용한 고속 광대역 데이터 전송, 대형 군집을 활용하여 통신 음영 지역까지 확대된 글로벌 커버리지를 제공함으로써 초연결성 완성하는 중요한 역할을 수행할 것으로 주목받고 있다. [1]

하지만 저궤도 위성은 기존 정지궤도 위성 대비 빠른 이동속도와 좁은 커버리지로 인해 사용자가 현재 연결 중인 위성에서 다음 연결 위성으로 전환하는 핸드오버가 빈번하게 발생하고, 이에 따라 같은 사용자에게 연결을 원하더라도 라우팅의 목적지 노드(위성)가 달라진다. 따라서 핸드오버 정보를 경로 계산에 빠르게 반영하여 전체 네트워크 토폴로지 정보를 동기화해야 한다.

업데이트된 토폴로지 정보를 받기 전에 경로 계산을 마치고 패킷을 전송하게 되면 목적지는 핸드오버 전 위성(S_{old})이 되고, 사용자는 이미 S_{old} 의 연결 가능 지역을 벗어나 새로운 위성(S_{new})에 연결되어 있으므로, 패킷은 길을 잃게 된다. 이러한 패킷을 '미아패킷'이라고 정의한다. 즉, 핸드오버로 인해 업데이트된 라우팅 정보가 반영되지 않은 상태로 전송된 패킷을 말한다.

미아패킷은 업데이트 동기화가 이루어지는 매우 짧은 시간 동안 낮은 확률로 발생하므로 사소한 문제로 여겨질 수 있다. 하지만 핸드오버는 10분에 한 번 꼴로 규칙적이고 빈번하게 발생하며, 이에 따른 토폴로지 수정 및 라우팅 업데이트도 필수적이다. 그러나 위성 네트워크의 특성을 반영하여 핸드오버와 라우팅의 동기화 시점에서 비동기로 인해 발생하는 오류에 대응하는 전략은 연구된 바가 없으며, 잘못된 목적지 주소로 패킷이 전달되었을 때의 처리 방법을 따르게 될 것이다. 널리 사용되는 OSPF 기반 프로토콜은 위성 노드에서 경로를 계산하므로 목적지 주소로 경로

재계산을 시행하거나, ICMP 프로토콜에서는 잘못 도착한 패킷은 버리고 오류를 보고하여 재전송을 받는다.

전파 지연이 지배적인 위성 네트워크에서는 재전송의 부담이 크고, 라우팅 테이블이 업데이트되는 매우 짧은 시간 안에 드물게 발생하므로 복잡한 오류 처리 프로토콜을 도입하는 것은 비효율적이다. 또한 위성에서 경로 재계산을 위한 프로토콜을 사용할 경우에도 추가적인 온보딩 능력이 필요하고, 프로토콜의 복잡도에 따른 계산 부담과 그에 비례한 전력 사용은 네트워크의 효율성을 저하시키고 위성의 수명을 단축시킨다. 특히 지연에 민감한 응용 프로그램에게는 패킷을 누락시키고 재전송을 받음으로써 발생하는 전파지연이나 경로 재계산에 의한 처리지연이 치명적일 수 있다.

따라서 본 논문에서는 미아패킷 처리 문제를 적은 연산량의 간단한 메커니즘을 통해 기존 재전송 프로토콜 대비 신속하게 대응이 가능한 오류 대응 라우팅 기법을 제안하여 네트워크의 완성도를 높이고자 한다.

II. 시스템 모델

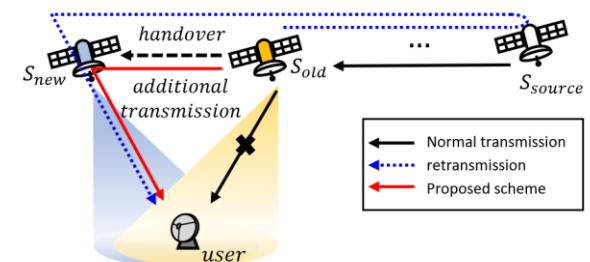


Fig. 1. System model

본 논문에서는 핸드오버-라우팅 동기화 문제를 고려하기 위해 SDSN(Software-Defined Satellite Network) 구조에서 지구 고정 셀, 셀 분할 방식의 그룹

핸드오버가 일어나고, 위성 간 광링크를 사용하는 시나리오를 설정하였다.

SDSN 구조 기반 라우팅[2]은 제어평면과 전송평면을 분리하고, 중앙 서버는 경로 계산을, 위성은 전송 기능을 수행한다. 중앙에서 소프트웨어를 통해 네트워크 전체를 관리하므로 유지가 쉽고, 위성 노드의 부담을 줄여준다. 하지만 위성의 라우팅 능력을 배제하였으므로 오류 발생 시 자체적인 경로 탐색이 어렵고, 중앙 서버로부터 대체경로를 포함한 응답을 기다리거나 재전송을 요청하는 등 추가적인 오류 대응 기법의 도입이 필요한 점이 문제로 남는다.

위성 간 광링크를 사용하는 환경에서 동일 궤도의 한 홉 이내에 이웃한 위성과는 영구적인 링크 연결이 가능하므로, 이 위성과는 항상 연결된 상태를 보장한다. 셀 분할 기반 그룹핸드오버는 하나의 궤도 평면에 속한 위성이 해당 지역을 연이어 서비스하며, 핸드오버 시 궤도 내 바로 다음 위성에게 위성 간 광링크를 이용하여 자원 분할 정보, 등록된 유저 정보 등을 전송한다. Fig. 1은 섹션 III에서 설명할 제안하는 기법과 비교군의 전체 시스템 모델을 나타내었다.

III. 핸드오버 정보 재사용 라우팅 기법

핸드오버 대상이 되는 위성의 정보와 광링크 연결 시 사용한 LCT(Laser Communication Terminal) 인터페이스 정보를 라우팅 테이블에 저장해 둔다.

미아패킷은 핸드오버 정보가 중앙 서버에 전파되고 중앙 서버에서 재계산 후 다시 재배포하는 과정 중에 발생하며, 이는 저궤도 위성의 평균 서비스 시간인 10 분 이내에 이루어지므로 수정된 새 목적지 위성은 반드시 1 홉 이내에 있기 때문에, 영구 링크를 이용하여 새 위성으로 전송이 가능하다.

따라서 위성 S_{old} 가 이전 타임 슬롯에서는 서비스하였지만 현재는 연결할 수 없는 사용자에게 향하는 패킷을 수신한 경우, 경로 재계산 없이 핸드오버 시 저장한 정보를 바탕으로 1 홉을 추가 전송하여 미아패킷을 변경된 목적지인 S_{new} 로 전송할 수 있다.

제안한 기법의 효과를 확인하기 위해, 대응 전략이 없을 경우 기존 프로토콜에서 채택할 재전송 방식과 비교하였으며, 지연 중 지배적인 전파지연의 차이를 확인하였다. 시뮬레이션은 고도 550km, 경사각 53도, 궤도면 12개, 궤도 당 20개의 위성으로 이루어진 저궤도 위성 네트워크 환경에서 30분간 시행하였다. 그 결과 Fig.2와 같이, 소스 위성과 목적지 위성 사이의 홉 수가 늘어남에 따라 제안한 라우팅 기법이 우수한 성능을 보였다. 특히 ISL이 필요한 대륙간 통신의 경우를 조사하기 위해, 서울-뉴욕의 통신을 확인하였다. 최소 7홉 이상의 통신이 필요하고, 이때 전파 지연이 평균 59.7ms 감소하였으며, 기존 대비 62.38%의 성능 향상을 보였다.

또한 위성 노드에서 직접 경로 계산을 하는 방식과 비교하면, 전파지연은 대부분 같은 값을 가지며 최악의 경우 4ms의 차이가 있다. 하지만 연산의 시간 복잡도를 비교하면, 가장 보편적인 다익스트라 알고리즘을 사용하는 프로토콜은 위성 노드가 V 개 있을 때 데이터 자료구조에 따라 차이가 있으나 $O(V^2)$ 혹은 $O(V \log V)$ 의 복잡도를 가지지만, 제안한 알고리즘은 $O(1)$ 의 낮은 복잡도를 가지므로 처리 지연에서 이득을 볼 수 있다.

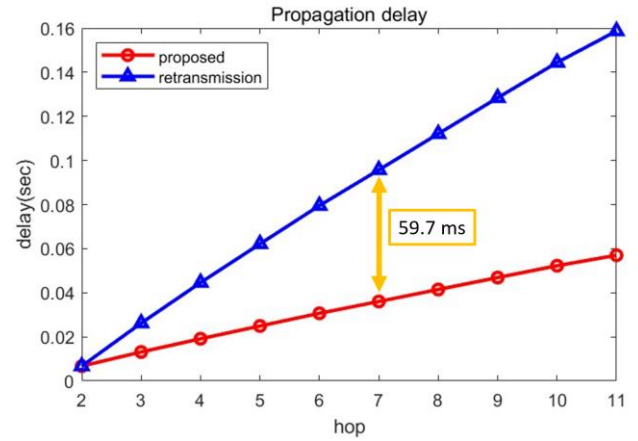


Fig. 2. Simulation result

IV. 결론

본 논문에서는 핸드오버로 인한 업데이트된 라우팅 정보가 반영되지 않았을 때, 유저를 서비스했던 위성에 잘못 도착한 패킷을 미아패킷으로 정의하고, 이를 해결하기 위해 핸드오버에 사용한 정보를 이용하여 별도의 연산 없이 현재 해당 유저를 서비스하는 위성으로 패킷을 전송할 수 있는 기법을 제안하였다. 이 라우팅 전략은 위성의 계산 부담을 줄이고 중앙 서버와 재전송을 위한 제어 메시지 교환이 없으므로 전력 소모를 줄여 위성 수명 연장에 기여하고 데이터 전송을 위한 대역폭을 확보한다. 특히, 복잡한 오류 처리 프로토콜 없이도 위성 노드 자체에서 빠르게 대응하여 저지연 고효율의 라우팅을 통해 전체적인 네트워크 성능 향상 및 사용자 경험 개선의 효과를 기대한다.

ACKNOWLEDGMENT

본 논문은 2024년 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단 미래우주교육센터(2022M1A3C2069728)와 중견연구(No. 2021R1A2C1007729)의 지원을 받아 수행된 연구입니다.

참고 문헌

- [1] J. P. Choi and C. Joo, "Challenges for efficient and seamless space-terrestrial heterogeneous networks," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 53, no. 5, pp. 156-162, May 2015, doi: 10.1109/MCOM.2015.7105655.
- [2] Weiwei Jiang, "Software defined satellite networks: A survey," *Digital Communications and Networks*, Volume 9, Issue 6, 2023, Pages 1243-1264, ISSN 2352-8648.