

6G 저궤도 통신위성군의 통신 서비스를 위한 통신 탑재체 및 지상운용 기술 분석

김인준, 이수전, 김태희, 황유라
한국전자통신연구원

ijkim@etri.re.kr

Analysis of Communication Payloads and Ground Operation Technologies for 6G LEO Satellite Constellation Communication Services

Kim In Jun, Lee Soojeon, Kim Taehee, Hwang Yoola
ETRI

요 약

차세대 6G 비지상망(NTN)은 수백-수천 기의 저궤도(LEO) 위성으로 구성된 군집을 통해 전 지구적 초고속·초저지연 통신을 제공하는 것을 목표로 한다. 본 논문은 이러한 6G LEO 통신서비스를 실현하기 위해 필요한 통신 탑재체(Payload) 기술과 지상운용 기술을 종합적으로 분석하였다. 위성 측은 전자식 다중빔, 대용량 고주파 탑재체, 레이저 ISL, AI 자율성을 통한 실시간빔조정·초저지연·대역폭 확장 능력 등을 확보해야 6G 서비스 요구를 만족할 수 있으며, 지상 측은 클라우드 네이티브 분산 관제, 빔 커버리지 관리, 자원 스케줄링, ISL 운용 및 핸드오버 최적화, 통신 성능 분석/대응, 보안 관리를 수행해야 한다.

I. 서 론

5G-Advanced 이후 6G 표준화는 지상 네트워크와 저궤도 위성을 완전히 통합하는 “우주-공중-지상 통합 네트워크(SAGIN)”를 핵심 목표로 삼고 있다. 스타링크, 원웹 등의 초기 LEO 사업이 대역폭과 지연 성능을 입증했지만, 6G 서비스가 요구하는 Gbps 이상 최대전송률, 1ms 이하의 전송 지연, 글로벌 통신영역, cm 이하 측위 정확도 등[1]을 AI 자율 운용으로 만족하려면 탑재체와 지상 인프라의 근본적 진화가 필요하다. 본 논문은 이를 달성하기 위한 통신 탑재체 기술, 지상운용 기술, 기술적 과제 및 연구 방향을 고찰한다.

II. 6G LEO 통신 탑재체 기술

1. 고성능 통신 탑재체

○ 빔포밍 및 빔 스위칭

저궤도 위성은 지상 사용자 단말을 추적하고 빠르게 이동하는 위성 간 링크를 유지하기 위해, 위성 내 디지털/하이브리드 빔포밍 회로로 빔폭·편파·출력을 실시간 조정하며 전자식 빔 조향 안테나(예: 위상 배열 안테나)를 사용해야 한다. 이를 통해 빠른 빔 스위칭, 고이득 통신, 커버리지 제어가 가능하다.

○ 고속 데이터 전송 및 대역폭 관리

6G 급 초고속·초저지연 서비스에 대응하기 위해 대용량 고주파수 대역을 활용하고, 실시간으로 효율적인 주파수 및 대역폭 할당을 수행할 수 있는 탑재체가 요구된다.

2. Inter Satellite Link (ISL) 및 라우팅

○ 위성 간 레이저 링크

끊김 없이 광범위한 커버리지를 제공하려면, 인접 위성 간에 상호 직접 통신이 가능해야 한다. 이를 통해 지상 게이트웨이 경유없이 위성 간 경로로 데이터를 중계하여 글로벌 저지연 백홀(Backhaul)을 제공한다.

○ 온보드 라우팅/스위칭

ISL 을 통해 데이터가 이동할 때, 효율적으로 패킷을 라우팅·스위칭할 수 있는 기능(온보드 프로세싱)이 중요해진다. 수 Gbps-Tbps 급 광 ISL 은 지상국의 부담을 줄이고 글로벌 경로 길이를 단축해 네트워크 스루풋과 서비스 품질을 향상시킨다. 또한 이중화 ISL 과 다중 경로 라우팅 프로토콜이 요구된다.

3. 핸드오버 기능(위성 간 및 셀 간)

○ 다중 빔 간 핸드오버

LEO 위성이 빠르게 이동하므로, 일정 지역의 사용자를 지속적으로 커버하기 위해 빔 간 또는 위성 간 핸드오버가 빈번하다. 이를 원활히 처리해야 서비스 끊김이 최소화된다.

○ 위성 간 핸드오버 스케줄링

ISL 및 지상국의 관제 정보를 활용하여, 사용자 단말과 통신하는 위성이 사라지기 전에 인접 위성으로 접속을 옮겨주어야 한다.

4. 하드웨어 및 소프트웨어 모듈화

○ 무게와 전력 소모 최소화

LEO 위성은 소형화·경량화와 더불어 저전력 시스템 설계가 필수적이다. 동시에 통신 페이로드의 성능도 높아야 하므로, 설계와 생산에서 모듈화·집적화 기술이 중요하다.

○ 지능형 제어/관리 SW

6G 환경에서 요구되는 빠른 응답성, 네트워크 슬라이싱, 자원 할당 등을 지원하기 위해 AI/ML 기반의 위성 운영 SW 탑재도 고려된다.

III. 6G LEO 통신 위성 운용 기술

1. 탑재체 상태 모니터링 및 제어

위성의 통신 탑재체의 상태(전력, 온도, 유닛상태, 대역폭, 빔 가용성 등)를 실시간으로 수집·분석하고, 탑재체 구성 유닛을 제어하여 빔포밍/지향각 조정, 빔 스케줄링, 주파수 할당, 전력 설정 등 탑재체 설정값을 원격명령으로 제어한다. 또한 원격측정값이 정상 범위를 벗어나는지 감지하여 AI 기반 대응을 통해 자율 복구를 위한 원격명령 실행을 수행한다. 이때 클라우드 네이티브 분산 기능을 통해 전지구적 신속 관제 대응이 가능하다.

2. 탑재체 통신 서비스 관리

위성의 능동형 페이즈 어레이 안테나를 지상의 사용자/트래픽 분포에 따라 스폿빔의 위치·형태·출력·주파수를 동적으로 관리 조정한다.

위성의 가용한 주파수 및 빔 자원을 사용자 수요, 지역별/시간대별 서비스 요구사항, 서비스 유형별 품질 요구사항 등에 따라 트래픽 패턴을 예측하고, 주파수와 대역폭을 동적으로 분산 할당한다.

또한 사용자 단말, 지상게이트웨이, 다중 위성간의 지연, 손실률, 처리량 등 트래픽 흐름을 최적화하여 서비스 품질(QoS)을 보장한다.

3. 인공위성 간 링크(ISL) 운용 및 핸드오버

위성간 레이저 링크를 통해 지상국 의존도를 줄이고, 트래픽을 위성 간 어떤 구간에서 직접 라우팅할지 ISL 링크를 구성하고 제어한다. 다수의 LEO 위성이 상호 링크를 맺었다 끊는 상황을 동적으로 파악해, 가시선 유지를 위한 경로 최적화 및 재구성 수행하는 위성 네트워크 토폴로지를 관리한다.

또한 사용자가 끊임 없이 통신하기 위해서는, 현재 연결된 위성과 인접 궤도의 위성 정보를 실시간으로 파악해 두어야 한다. 지상국은 각 위성의 위치·속도·대기 링크상태 등을 종합해 최적의 위성을 선택해 핸드오버를 지휘할 수 있다.

4. 성능 분석 및 리포트

위성별, 빔별, 지역별 통신 성능지표(처리량, 지연, 에러율 등)를 실시간으로 집계하여 장기 성능 통계를 생성한다. 또한 생성한 통계를 바탕으로 머신러닝/빅데이터 기법 등을 활용해 트래픽 수요 변화, 장애 발생 추이 등을 예측해 사전에 대응 방안 마련할 수 있도록 분석/예측할 수 있다.

5. 보안 및 암호 관리 위협 대응

위성-지상간, 위성간 데이터 경로의 트래픽을 암호화·인증을 통해 도감청, 무단 간섭을 방지한다. 또한 해킹이나 신호 재밍 발생시 자동으로 감지하고 방어하는 사이버 공격 탐지 및 격리 대응 기능이 필요하다.

IV. 탑재-지상 연동 운영의 기술적 과제

1. 위성 간 ISL로 데이터 전송 경로 최적화

위성 A가 사용자 단말과 연결된 상태에서, 지상국으로 트래픽을 전송하는 대신 인접한 위성 B→게이트웨이 G 순서로 전송하여 지연을 낮출 수 있다.

지상국은 전체 궤도 상태와 링크 품질 정보를 기반으로 A-B 간 링크를 활성화하도록 명령하거나, A가 직접 관제 스케줄 정보를 받아 자율적으로 ISL을 열 수 있다.

2. 빠른 핸드오버 처리

위성 A가 가시선 아래로 사라지기 직전에, 지상국 또는 A 자체 알고리즘에 의해 인접 위성 B로 핸드오버 명령을 전송한다.

지상국은 미리 B 위성에 사용자 세션 정보를 전달하고, 필요한 자원을 할당받아 시점에 맞춰 핸드오버를 처리함으로써 사용자 서비스 끊김이 최소화된다.

3. 대규모 위성군 분산 운용

수많은 위성군을 안전하고 유기적으로 운용하려면 클라우드 기반 관제시스템 안에 다수의 위성과 표준화된 데이터 송수신 운용이 필요하며, 끊임 없는 통신서비스를 위한 AI 기반의 탑재체 운용 스케줄링과 실시간 트래픽을 고려한 빔 자동 조정, AI에 의한 대규모 위성의 이상탐지 및 대응 등 운용자의 개입을 최소화한 자동화 프로세스를 클라우드에 분산 배치한 위성군 운용 기술이 필요하다.

V. 결론

위성 측면에서 빠른 빔포밍/빔스위칭, 고속·대역폭 통신 페이로드, 위성 간 링크(ISL)와 온보드 라우팅, 소형화·경량화, AI/ML 기반 자율운용 등이 핵심이다. 핸드오버 시 위성 자체가 인접 위성 및 지상국과의 협력을 통해 사용자가 체감하는 끊김을 줄이도록 설계된다.

지상국 측면에서는 전 세계적 게이트웨이 분산 배치와 트래픽 중계, 네트워크 토폴로지 통합 제어, 주파수 및 자원 스케줄링, 핸드오버 및 ISL 제어가 중요하다. AI/ML 기반 트래픽 예측, 위성 상태 모니터링, 네트워크 운영 자동화로 위성군 운용 효율성을 극대화할 수 있다.

특히, 핸드오버 및 ISL 제어에 있어서 끊임 없는 통신을 위해 핸드오버를 위성에서만 처리할 수도 있지만, 전체 시스템 효율을 높이기 위해 지상국 관제 센터가 광역적인 시야를 갖고 스케줄링을 담당할 수 있다. ISL도 마찬가지로 지상국의 제어 하에 언제 어떤 경로를 통해 링크를 연결·해제할지 결정하며, 이를 통해 트래픽 경로 최적화 및 서비스 품질 달성이 가능하다.

6G 시대에 저궤도 위성 통신 서비스는 초연결·초저지연·초고속 목표를 달성하는 핵심 요소 중 하나가 될 것으로 전망된다. 위성과 지상국 양 측면에서 이러한 기능과 운용 전략을 갖춰야만 끊임없는 글로벌 인터넷 및 통합 통신 서비스를 성공적으로 제공할 수 있다.

ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by the Project [24AH1110, Satellite Ground Control System Design and Development Support for *** Satellite Ground Segment Construction and Operation] of ETRI.

참 고 문 헌

- [1] 김근영, 예충일, 고영조, "6G 이동통신 무선 전송 및 접속 기술 동향," 한국정보기술학회지 제 18 권 제 1 호, pp. 9-15. Jun. 2020.