

큐브 위성 개발을 위한 저궤도 위성통신 시스템 핵심 기술 연구

추현우, 김태윤, 도상준, 이도현, 양준모, 김유빈, 오민규, 장희연, 장보우*, 허준*, 김홍빈*, 최현우*,
박용배, 이호원, 정방철, 정소이, 나동엽*, 김재현
아주대학교, 포항공과대학교*

요약

본고에서는 큐브 위성 기반 저궤도 위성통신 시스템 개발의 필요성 및 요소 기술에 대해 살펴보고, 6G 통신 기반 저궤도 위성 NTN(Non Terrestrial Networks) 표준기술의 구현 가능성과 적용 방안을 제시한다. 또한, 아주대학교 전파연구센터에서 연구 중인 한반도에 seamless 통신 서비스 제공을 위한 위성통신 시스템의 NET(Network), MAC(Medium Access Control), PHY(Physical), RF(Radio Frequency) 계층의 주요 연구내용을 소개한다.

이에 본문에서는 큐브 위성 개발을 위한 6G 기술 기반 저궤도 위성통신 시스템에 대해 살펴본다. II장에서는 저궤도 위성통신 시스템의 필요성과 필요 요소 기술에 대해 살펴본다. III장에서는 큐브 위성 개발을 위한 저궤도 위성통신 시스템 모델링에 대해 논하고, IV장에서는 아주대학교 전파연구센터의 큐브 위성 개발을 위한 저궤도 위성통신 시스템의 계층별 연구내용을 소개한다. 마지막으로 V장에서 결론을 맺는다.

II. 저궤도 위성통신 시스템

I. 서론

우주 기술의 발전에 따라 저궤도 위성을 활용한 통신 시스템이 기존 지상 네트워크를 보완하는 인프라로 주목받고 있다. 국제 표준화 기구인 3GPP(3rd Generation Partnership Project)는 Release 15부터 비지상 네트워크의 가능성을 검토하기 시작했으며, Release 17부터는 저궤도 위성을 활용한 6G 이동통신 기술에 대한 본격적인 논의를 진행하고 있다[1]. 더불어 Starlink, OneWeb, Kuiper 등 민간 기업 주도의 저궤도 위성 프로젝트가 활발히 추진되며, 6G 저궤도 위성통신 시대가 다가오고 있다[2]. 6G 통신 서비스 구현을 위해서는 통신 음영지역 없이 seamless 서비스를 제공할 수 있는 저궤도 위성통신 시스템의 개발이 필요하며, 이를 위해 경량, 저비용 구조의 큐브 위성을 활용한 통신 방안이 떠오르고 있다. 특히, 모바일 광대역 서비스를 위한 O-RAN(Open-Radio Access Networks) 기반 큐브 위성 개발이 기술적 해법으로 주목된다. 이에 본고에서는 큐브 위성 개발을 위한 저궤도 위성통신 시스템의 핵심 요소 기술 및 계층별 요구사항을 분석한다. 또한, 아주대학교 전파연구센터에서 연구 중인 주요 연구내용을 소개하고, 계층별 기술을 통합하여 성능 분석을 위한 시스템 모델링 및 통합 시뮬레이터 개발 방향을 제시한다.

1. 저궤도 위성통신 시스템 필요성

현재 위성통신 기술은 통신 음영지역 없이 seamless 서비스를 제공하는데 한계가 있으며, 2023년 ITU-R(International Telecommunication Union Radiocommunication Sector)에서 제시한 6G framework의 usage scenario를 지원하는데 한계가 있다. 이에 따라, 이러한 요구사항을 만족시키기 위한 저궤도 위성통신 시스템의 핵심 요소 기술 개발 및 통합 연구가 진행되어야 한다[3].

3GPP에서는 핸드오버 지연시간을 0 ms 수준으로 단축하기 위한 DAPS(Dual Active Protocol Stack) 기반 핸드오버 기술을 제안하였으며, 위성 접속 성능지표로는 단위 면적당 하향 링크 기준 1.5 Mbit/s/km^2 로 제시하였다. 또한, ITU에서는 hyper-reliable and low-latency communication 구현을 위한 지연 성능 기준으로 0.1 ~ 1 ms 수준을 명시하고 있다. 한편, 최근 개발된 중국형 물리 정보/트랜스포머 기반 기상 정보 예측 모델 DeepPhysiNet은 위/경도 오차 0.01도 수준의 고정밀 공간해상도를 달성하며, 통신 및 측위 서비스에 대한 높은 정밀도가 요구되고 있다. 따라서, 6G framework의 usage scenario를 구현하기 위해서는 이러한 요구사항을 만족시켜야 하며 계층별 요소 기술 개발 및 통합 과정이 필요하다. <그림 1>은 ITU-R에서 제시한 6G framework의 usage scenario의 핵심 요소와

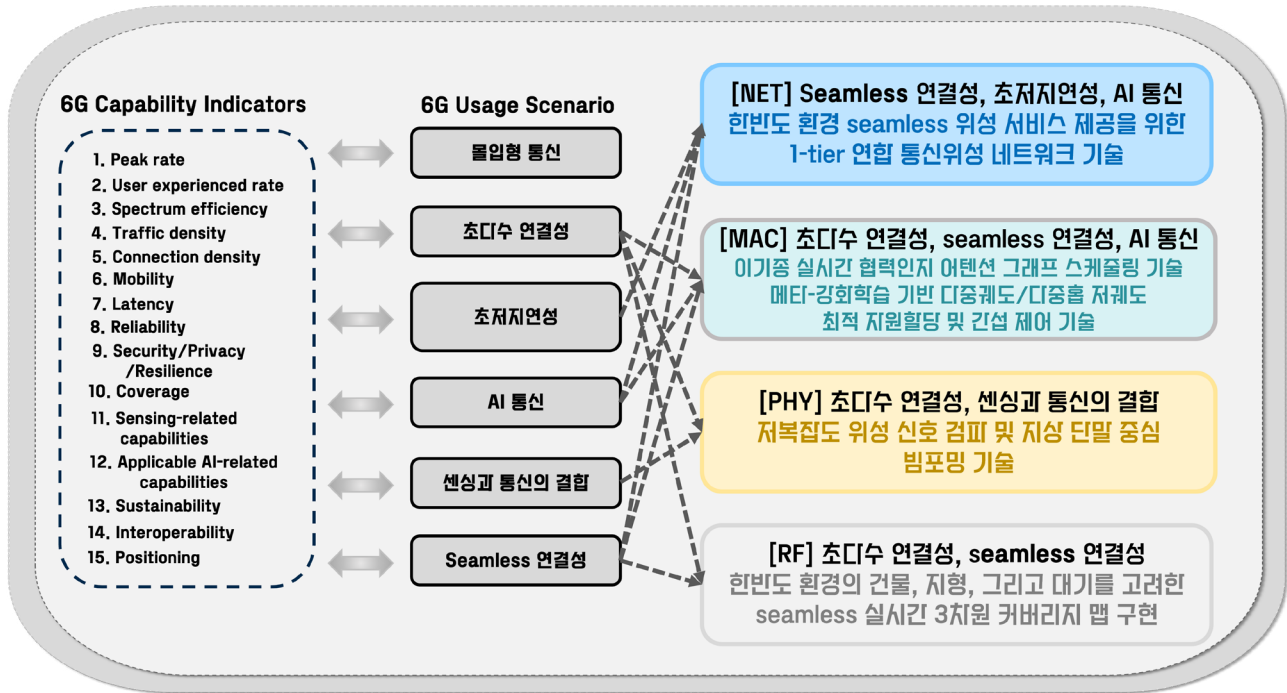


그림 1. 6G 네트워크 프레임워크 구현을 위한 저궤도 위성통신 시스템 구성

이를 달성하기 위한 계층별 요소 기술을 도식화한 것이다.

2. 저궤도 위성통신 시스템 계층별 요소 기술 및 필요성

저궤도 위성통신 시스템은 NET(Network), MAC(Medium Access Control), PHY(Physical), RF(Radio Frequency) 계층으로 구성되며, 각 계층의 요구사항을 충족시키기 위한 핵심 요소 기술의 개발이 요구된다. 본 절에서는 각 계층에서 발생하는 문제점과 이를 해결하기 위한 요소 기술에 대해 살펴본다.

가. NET 계층 문제점 및 필요 요소 기술

NET 계층에서는 저궤도 위성의 높은 이동성으로 인해 네트워크 환경이 시간에 따라 변화하며, 빈번한 핸드오버 문제가 발생한다. 또한, 3GPP 및 ITU-T(ITU Telecommunication Standardization Sector)가 제시하는 6G framework를 만족시키기 위해서는, 다수의 위성을 통합적으로 관리하고 운용할 수 있는 기술이 필요하다. 그러나 현재 대부분의 연구는 단일 저궤도 위성 상황을 가정하고 있어, 다중 위성 환경에서의 효율적인 네트워크 운용을 위한 관련 기술 개발이 요구된다. 이를 해결하기 위한 요소 기술로는 1-tier 협력 정보 교환을 기반으로 한 seamless 핸드오버 기술과 저궤도 위성 기반의 LEO-PNT(Low Earth Orbit Positioning, Navigation and Timing) 최적 기술 등이 있다.

나. MAC 계층 문제점 및 필요 요소 기술

MAC 계층에서는 저궤도 위성통신 서비스 환경에서 하나의 위성이 다수의 장치와 연결되기 때문에, 기존 지상 네트워크에서 사용되는 자원할당 및 간섭제어 기법으로는 한계가 있다. 따라서 저궤도 위성의 다중 링크 특성을 고려한 새로운 자원관리 기술 개발이 필요하다. 또한, 다수의 저궤도 위성이 고속으로 이동하는 환경에서 6G usage scenario의 ultra massive connectivity를 만족시키기 위해, 에이전트 간 협력인지 스케줄링 기술의 개발이 필요하다. 이를 해결하기 위한 요소 기술로는 메타-강화학습 기반의 다중 궤도 및 다중 홉 환경에서 최적 자원할당 및 간섭제어 기술, 그리고 다중궤도 환경에서 이기종 협력인지 기반 실시간 스케줄링 기술 등이 있다.

다. PHY 계층 문제점 및 필요 요소 기술

PHY 계층에서는 3GPP의 Release 18에서 HAPS(High Altitude Platform Stations) 및 ATG(Air to Ground)를 포함하는 NTN(Non Terrestrial Networks) 시나리오가 새롭게 추가됨에 따라, 위성통신의 높은 안정성 확보와 저지연 및 대용량 신호 전송을 위한 위성 신호의 연속 중계 기술 개발이 필요하다. 또한, 기존의 파라볼릭 안테나에서 발전하여 많은 위성통신 서비스 기업들이 서비스 링크에 배열안테나를 활용하고 있지만, 큐브 위성과 같은 소형 플랫폼에서의 경량화 및 저복잡도 회로를

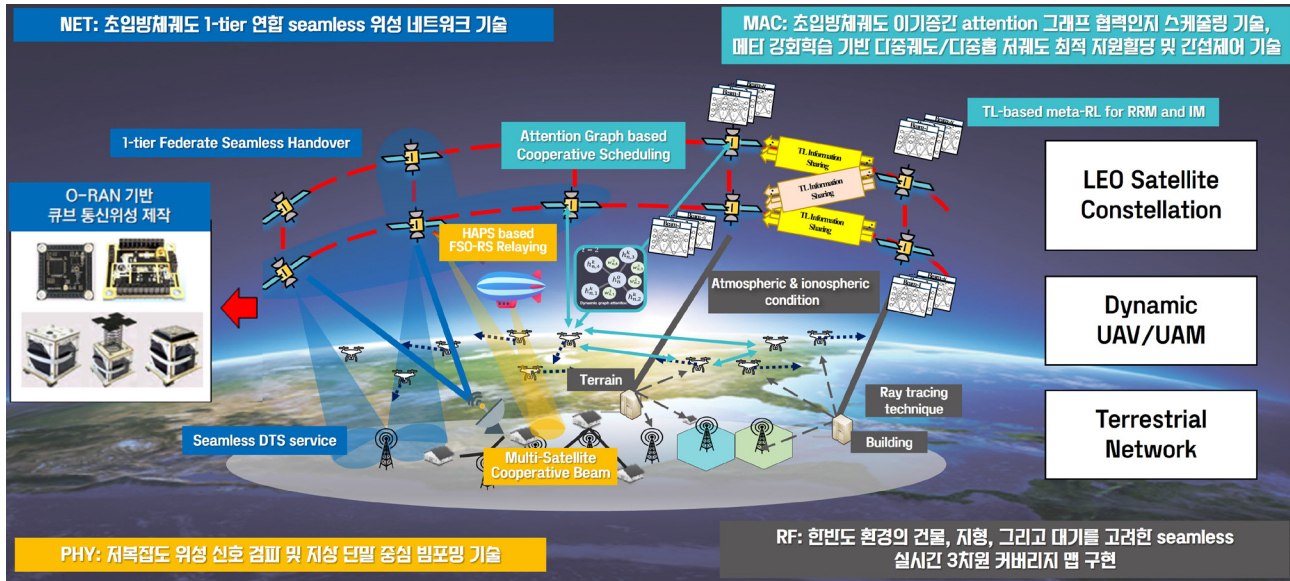


그림 2. O-RAN 기반 큐브 통신위성 제작을 위한 저궤도 위성통신 시스템 모델링

구현하기 위해서는 홀로그래픽 안테나 기술 개발과 검증이 필요하다. 이를 해결하기 위한 요소 기술로는 다중지상 단말 통신 서비스 제공을 위한 다중궤도 위성 간 협력 HBF(Holographic Beamforming) 기술, HAPS 및 RIS(Reconfigurable Intelligent Surfaces)와 같은 다중 플랫폼을 활용한 위성 신호 중계 기술 등이 있다.

라. RF 계층 문제점 및 필요 요소 기술

RF 계층에서는 저궤도 위성의 높은 이동성으로 인해 위성파와 사용자 단말 사이의 통신 경로가 지형, 건물, 대기 환경 등의 영향을 받아 실시간으로 변동하는 문제가 발생한다. 특히, 대기 굴절률은 고도별 기상 정보에 의존하지만, 지역 내 고도별 기상 정보를 정확하게 측정하는 데에는 한계가 있으며, 기존 딥러닝 기반 공간 보간법은 물리 정보가 부재하여 신뢰성이 낮다는 문제가 존재한다. 이러한 문제를 해결하기 위한 요소 기술로는 지형, 건물, 대기의 특성을 반영한 광선추적 기반 위성통신 채널 모델링 기술과 물리 정보와 트랜스포머 기반 딥러닝을 융합한 하이브리드 네트워크 구조의 고해상도 기상 정보 및 대기 굴절률 예측 알고리즘 기술 등이 있다.

III. 저궤도 위성통신 시스템 모델링

앞서 언급한 계층별 저궤도 위성통신 시스템의 문제점 및 요소 기술을 바탕으로, <그림 2>와 같이 6G 저궤도 군집 위성의 계

층별 모바일 광대역 서비스 제공을 위한 핵심 요소를 통합하여 O-RAN 기반 큐브 통신위성 개발을 목표로 한다. NET 계층에서는 seamless 위성망 설계, 1-tier 협력 기반 seamless 핸드오버 기술, 그리고 LEO-PNT 최적화 기술을 개발하며, 이러한 기술들을 검증하기 위한 네트워크 시뮬레이터를 구축한다. 최종적으로는 핸드오버 지연시간 0 ms 달성을 목표로 한다. MAC 계층에서는 저궤도 위성통신 시스템에서의 다중 링크 환경과 초고속 이동성을 고려하여, 전이학습 기반 메타-강화학습(ZS/FS/MS meta RL) 기법을 바탕으로 최적 자원할당 및 간섭제어 기술을 개발한다. 또한, 초입방체궤도에서의 이기종 적응형 협력인지 스케줄링 기술을 개발하고, 이기종 에이전트 고속 이동성에 대응할 수 있는 동적 그래프 모델 기반의 적응형 상호 협력 스케줄링 기술을 구현하여 이기종 간 데이터 전송 지연시간 0.01ms 이하 달성하는 것을 목표로 한다. PHY 계층에서는 저지연, 고신뢰 통신을 위한 저복잡도 위성 신호 검파 기술과 지상 트래픽 기반 다중 위성 빔포밍 기술을 개발하며 SWaP-C(Size, Weight, Power and Cost) 성능 향상을 위한 저복잡도 HBF 패터닝 알고리즘을 구현한다. 또한, RSMA(Rate Splitting Multiple Access) 기반 다중 위성 협력 HBF를 적용한 위성 다이버시티 기술을 개발한다. 최종적으로 2.25 Mbit/s/km^2 의 단위 면적당 트래픽 용량 제공을 목표로 한다. RF 계층에서는 실제 환경에 적용 가능한 초입방체궤도 regenerative 위성 기반의 실시간 3차원 커버리지 해석 기술을 개발하고, 저궤도 위성의 초고속 이동성에 대응할 수 있는 실시간 3차원 커버리지 M&S(Modeling & Simulation) 기법과 커버리지 맵 도출을 위한 시뮬레이터

를 구축한다. 또한, 기상 정보 측정 결과 및 수치해석 기반 물리 정보와 트랜스포머 기반 딥러닝 기법을 결합하는 하이브리드 PiNN(Physics Informed Neural Network)을 개발한다. 이를 통해 실시간 3차원 커버리지 해상도 및 대기 굴절률 예측 해상도 100 m 이하의 성능 달성을 목표로 한다.

IV. 저궤도 위성통신 시스템 주요 연구내용

현재 아주대학교 전파연구센터에서는 6G 구현을 위한 저궤도 위성통신 시스템 모델링을 위해 계층별 연구를 수행 중이다. NET 계층에서는 단일 위성-다중 게이트웨이 시나리오를 기반으로 <그림 3>과 같이 S1 핸드오버를 기반으로 피더링크 스위칭 알고리즘을 적용하는 연구가 진행 중이다[4]. 저궤도 위성은 일정 주기마다 serving gateway에 RSRP(Reference Signal Received Power) 값을 전달하여 스위칭할 게이트웨이를 결정하며, 피더링크 스위칭 조건으로 A3 event를 사용하여 offset 값은 3dB로 가정하여 연구를 수행 중이다. 위성 네트워크 환경에서의 초저지연 통신을 실현하기 위해, RACH-less(Random Access Channel-less) 기반 조건부 핸드오버 기술 및 시간 동기화에 대한 연구가 진행 중에 있다. 피더링크는 위성을 통해 전달되는 SIB(System Information Block) 19의 commonTA(Common Timing Advance)를 활용해 동기를 수행할 수 있으나, 서비스 링크는 참조 신호 없이 자체적으로 거리 변화를 분석해 전파 지연을 예측해야 하므로 UE-specific TA(User Equipment Specific TA) 예측 모델을 설계 중에 있다. 해당 모델을 선형회귀, 오일러, 2차 다항식 등 다양한 알고리즘 기반으로 구성되며, 실시간 예측 정확도 향상을 목표로 한다. 또한, 업링크 동기화 검토를 위해 SCS(Sub Carrier Spacing) 별 slot 시간 단위를 기준으로 예측 지연 값을 분석하고 있으며,

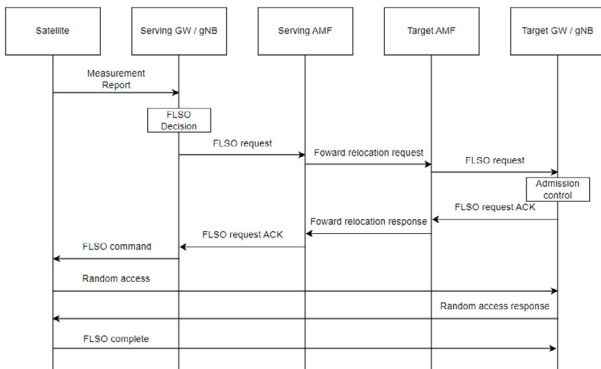


그림 3. S1 핸드오버를 참고 피더링크 스위칭 시퀀스 다이어그램

CP(Cyclic Prefix) 허용 범위 내 TA 오차 수렴 여부에 대한 검증도 병행되고 있다.

MAC 계층에서는 단일 transparent 저궤도 위성통신 환경에서 멀티 에이전트 심층 강화학습 기반 스케줄링 기술 개발 연구가 진행 중이다. 저궤도 위성은 제한된 메모리 및 전력 자원을 가지며, 위성의 고속 궤도 운동으로 인해 위성-지상국 및 위성 간 통신 링크의 가용성과 품질이 동적으로 변한다. 이러한 제약 및 환경적 요인으로 인해, 최근 위성 네트워크에서 작업 처리 지연 시간의 최소화 및 시스템 부하 분산을 위한 최적 스케줄링 기법 연구가 활발히 이루어지고 있다[5][6]. 또한, 변화하는 네트워크 상태를 예측하고 이를 기반으로 최적의 스케줄링 결정을 내리기 위해, <그림 4>와 같이 순환 신경망(recurrent neural network) 기반 예측 모델을 활용한 멀티 에이전트 심층 강화학습 스케줄링 기법 연구가 진행 중에 있다. 다중 빔 기반 위성통신 시스템에서는 위상 배열 안테나의 발전에 따라 빔 호핑 기술을 활용하여 시간적-공간적으로 유연한 빔 제어가 가능하다[7]. 지상의 데이터 트래픽은 지역적으로 불균일하고 시간에 따라 변하는 특성을 가지고 있기 때문에, 이를 위해 인공지능 기반의 지능적이고 상황 적응적인 무선 자원 관리 기술 적용이 필수적이다[8]-[13]. 따

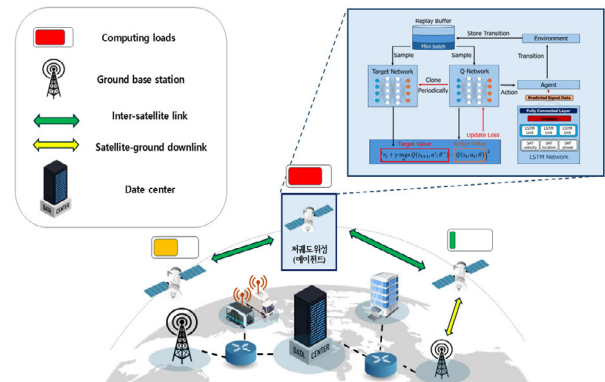


그림 4. 저궤도 위성 네트워크 예측 기반 멀티 에이전트 심층 강화학습 스케줄링 시스템 모델

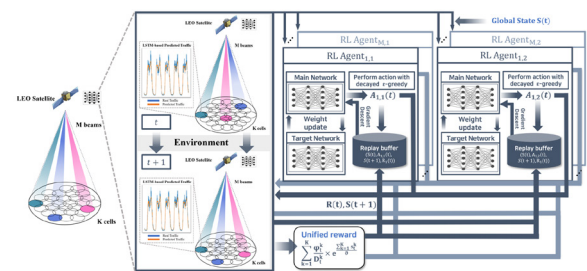


그림 5. 빔 호핑 시스템에서 트래픽 예측을 활용한 다중 에이전트 심층 강화학습 기반 통합 자원관리 프레임워크

라서, <그림 5>와 같이 지상 셀의 트래픽 수요와 발생 패턴에 따라 빔 자원을 동적으로 제어하기 위해 다중 에이전트 심층 강화 학습 기반 빔 호핑 framework의 연구가 진행 중에 있다.

PHY 계층에서는 저궤도 위성통신 시스템을 위한 표준화 활동이 활발히 진행되고 있으며, 이동통신 국제 표준화 단체인 3GPP는 NR(New Radio) 기반의 NTN 통신 시스템에 관한 연구와 표준화 작업을 지속해서 수행하고 있다. Rel-18의 NR-NTN Enhancements에서는 위성을 활용한 5G 네트워크의 적용 범위 및 시스템 성능 확장을 도모하고 있다[14]. Rel-19에서는 위성을 경유한 두 단말 간 데이터 직접 교환, 지상 코어 네트워크를 우회한 통신 서비스 제공, 그리고 지연에 덜 민감한 서비스를 위한 다양한 사용 사례(use cases)를 도출하고 그에 따른 요구사항 분석을 수행하고 있다[15]. 표준화를 토대로, 위성-지상 단말 통신을 위한 다양한 연구가 활발하게 진행되고 있다. <그림 6>과 같이 단일 저궤도 위성과 다중지상 단말 간의 통신 시스템은 중궤도, 정지궤도와 같은 타 위성 궤도 대비 낮은 경로 손실과 높은 데이터 전송률을 제공할 수 있을 것으로 기대된다. 그러나, 낮은 고도로 인하여 산발적인 무선 접속, 이기종 통신 트래픽 처리, 좁은 커버리지와 같은 다양한 이슈가 수반될 것으로 예상된다. 이러한 문제를 해결하기 위해 대규모 연결성을 고려하면서 높은 통신 신뢰성과 낮은 지연시간을 보장할 수 있는 NTN-IoT(NTN Internet of Things) 시스템용 통신 기법이 요구된다[16]. GFMA(Grant Free Multiple Access)는 기존의 허가 기반의 임의 접속 후 자원할당 방식과 달리 기지국의 별도 허가 없이 IoT 단말이 기지국에 접속하여 데이터를 전송할 수 있는 기술이다. GFMA 기술은 저궤도 위성통신 시스템에서 지상국 대비 높은 이동성 및 고도로 인한 지연시간 특성을 고려할 때, 기존 허가 접속 방식 대비 효과적인 통신 트래픽 수용이 가능할 것으로 예상된다. 그러나, GFMA 기술은 단말이 동일한 무선 자원을 이용하여 데이터를 전송하므로 자원 충돌 문제가 여전히 존재한다. 이러한 상황을 고려했을 때, 반복 전송을 활용한 자원 도약 기반

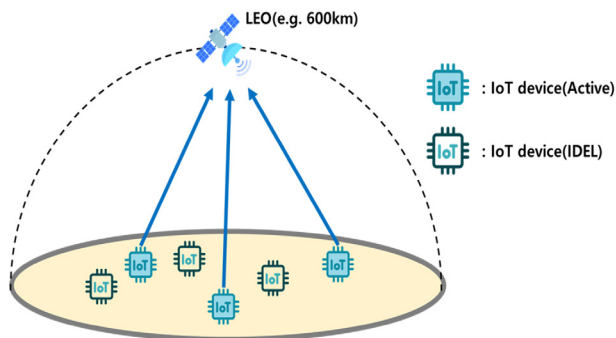


그림 6. 저궤도 위성-IoT 단말 간 통신 시스템 모델

RH-GFMA(Resource Hopping based GFMA) 기법[17]이 효과적일 것으로 예상되며, 이와 관련한 연구가 진행 중에 있다.

RF 계층에서는 단일/다중궤도 환경의 저궤도 위성통신을 위한 한반도 지역의 지형, 건물, 대기 환경에 따른 영향 분석 연구가 수행되고 있다. 한반도의 실제 지형과 도시 환경을 반영하기 위해 고해상도 3차원 데이터베이스가 구축되고 있다. 국토지리정보원을 통해 실제 지형 및 건물 데이터를 각각 추출하여 지형과 건물 데이터를 통합하는 연구가 진행 중에 있다. 또한, 와이오밍 대학교 기상학과와 웹페이지로부터 고도별 기온, 기압, 습도 측정 데이터를 확보하여 장기간 누적 데이터베이스를 구축하고, 이를 바탕으로 <그림 7>과 같이 기상 정보 및 공간 보간법을 이용한 대기 굴절률 모델링 연구가 진행 중에 있다. 전리층 영향 분석 측면에서는, 한반도 상공에서 고도 90 ~ 1,000 km에서의 전자밀도 분포를 기반으로 Simplified Appleton-Hartree 방정식을 적용한 전파 굴절 특성 분석을 수행하고 있다. 이를 통해, 전리층 운용 주파수에 따른 거리 및 각도 오차를 <그림 8>과 같이 정량적으로 평가하는 연구가 수행 중에 있다[18]. 저고도에서는, 기상 및 대기 정보를 반영하여 저궤도 위성통신용 채널을 구성한다. 구체적으로, 전자기 수치해석 방법론 중 하나인 광선 추적법을 이용하여 전파 환경 및 통신 채널을 모델링한다. 이를 위해서는 대기 굴절률 정보가 필요하며, 저고도에서의 대기 굴절률은 대기 상태 및 기상 상황에 영향을 많이 받는다[19]. 따라서, 기상 실측 데이터 및 예보 모델을 활용하여 대기 굴절률을 복원하는 과정이 필수적이다. 이를 위해 기상 관측소 라디오존데 측정 데이터를 확보하고, KIM(Korean Integrated Model)

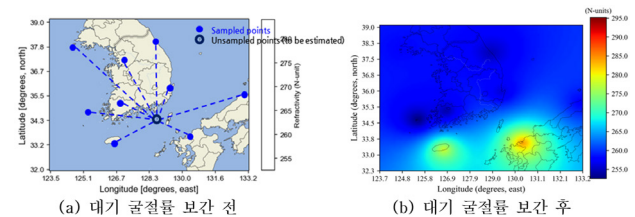


그림 7. 기상 정보 및 공간 보간법을 이용한 대기 굴절률 모델링

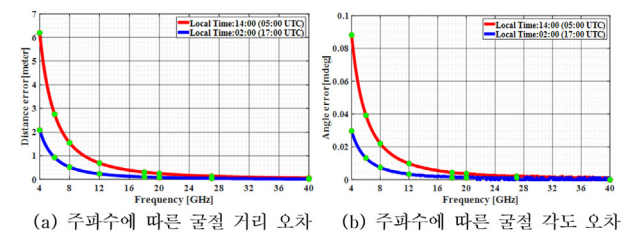


그림 8. 주파수에 따른 굴절 거리 및 각도 오차

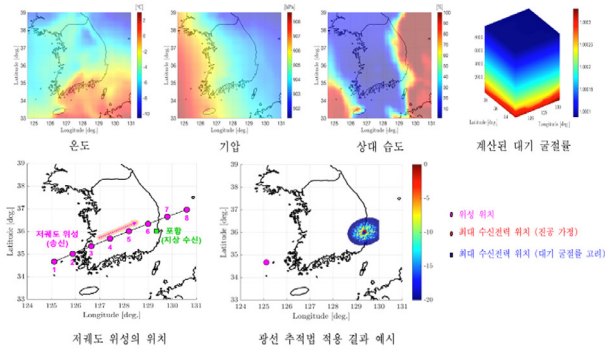


그림 9. 2024년 1월 15일 자정, 고도 1,000 m에서의 KIM 기상 데이터 및 대기 굴절률 시각화와 광선 추적법 적용 결과 예시

예측 데이터를 활용하여 구한 대기 굴절률 모델에 광선 추적법을 적용하는 연구가 진행 중이다. 현재 운용 중인 SpaceX 사의 Starlink 위성군 궤도 및 위치 정보를 이용하여 안테나 보어사이트 오차를 최소화하는 방법을 탐색하고 있다. 또한, 급변하는 저궤도 위성통신 채널의 특성을 고려하여 물리정보 신경망 PiNN과 Transformer 기반의 Hyper Network를 활용한 딥러닝 대기 굴절률 예측 모델에 대한 연구를 수행하고 있다.

V. 결론

본고에서는 6G 통신 서비스 구현을 위한 저궤도 위성통신 시스템의 필요성을 살펴보고, 한반도에 seamless 통신 서비스를 제공하기 위한 NET, MAC, PHY, RF 계층별 요소 기술을 정리하였다. 아울러, 아주대학교 전파연구센터의 계층별 요소 기술을 기반으로 한 연구내용을 소개하였다. 이러한 연구를 기반으로 향후 O-RAN 기반 큐브 위성 시제품을 제작할 예정이다.

Acknowledgement

이 논문은 2024년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(NO.RS-2024-00396992, 저궤도 위성통신 핵심 기반 큐브 위성 개발)

참고 문헌

[1] 3GPP, Study on new radio (NR) to support non-

terrestrial networks(release 15), Technical Report TR 38.811 V15.40, 3rd Generation Partnership Project (3GPP),[online] (2020).URL https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/38_series/38.811/

- [2] 조용완, “저궤도 위성통신 기술 및 산업 동향,”전자공학회지, 제50권 제7호, pp. 18-29, 2023.
- [3] ITU-R, “ITU-R framework for IMT-2030: review and future direction,”전자공학회지, 제50권 제7호, pp. 18-29, 2023.
- [4] 3GPP, “Study on new radio (NR) to support non-terrestrial networks (Release 16),” 3rd Generation Partnership Project (3GPP), TR 38.821, V16.0.0, Dec. 2019.
- [5] T. Huang et al., “Dual-timescales optimization of task scheduling and resource slicing in satellite-terrestrial edge computing networks,” IEEE Transactions on Mobile Computing, vol. 23, no. 12, pp. 14111-14126, Dec. 2024.
- [6] Y. Xie, Q. Wu, G. Niu, M.-O. Pun, and Z. Han, “Online scheduling for multi-access in space-air-ground integrated networks using iGNNSeq-enhanced reinforcement learning,” IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 74, no. 3, pp.4774-4787, Mar. 2025.
- [7] S. Zheng, X. Zhang, J. Zhang, P. Wang and W. Wang, “Traffic-aware resource management of beam hopping in satellite-enabled internet of things,” IEEE Internet of Things Journal, vol. 11, no. 21, pp. 34504-34518, Nov. 2024.
- [8] Z. Lin, Z. Ni, L. Kuang, C. Jiang and Z. Huang, “Dynamic beam pattern and bandwidth allocation based on multi-agent deep reinforcement learning for beam hopping satellite systems,” IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 71, no. 4, pp. 3917-3930, Apr. 2022.
- [9] E. Kim, J. Kim, J. Kim, and H. Lee, “HiMAQ: Hierarchical multi-agent Q-learning-based throughput and fairness improvement for UAV-aided IoT networks,” Journal of Network and Computer Applications, vol. 223, Mar. 2024.
- [10] J. Lee et al., “Low-complexity multi-agent Q-learning for maximizing energy efficiency in IAB-enabled small-cell networks,” IEEE Access, vol. 11, pp. 121529-121538, Nov. 2023.
- [11] H. Lee et al., “Towards 6G hyper-connectivity: Vision,

challenges, and key enabling technologies,” Journal of Communications and Networks, vol. 25, no. 3, pp. 344-354, Jun. 2023.

- [12] W. Lee, H. Lee, and H. Choi, “Deep learning-based network-wide energy efficiency optimization in ultra-dense small cell networks,” IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 72, no. 6, pp. 8244-8249, Jun. 2023.
- [13] E. Kim, H. Choi, H. Kim, J. Na, and H. Lee, “Optimal resource allocation considering non-uniform spatial traffic distribution in ultra-dense networks: Multi-agent reinforcement learning approach,” IEEE Access, vol. 10, pp. 20455-20464, Feb. 2022.
- [14] M. M. Saad, M. A. Tariq, M. T. R. Khan and D. Kim, “Non-terrestrial networks: An overview of 3GPP Release 17 & 18,” IEEE Internet of Things Magazine, vol. 7, no. 1, pp. 20-26, Jan. 2024.
- [15] 3GPP, Study on satellite access phase 3 (release 19), Technical Report TR 22.865 V19.2.0, 3rd Generation Partnership Project (3GPP), [online] (2023). URL https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/22_series/22.865/
- [16] A. F. M. S. Shah, M. Al. Karabulut, and K. Rabie, “Multiple access schemes for 6G enabled NTN-assisted IoT technologies: Recent developments, prospects and challenges,” IEEE Internet of Things Magazine, vol. 7, no. 1. pp. 48-54, Jan. 2024.
- [17] H. S. Jang, B.C. Jung, T. Q. S. Quek, and D.K. Sung, “Resource-hopping-based grant-free multiple access for 6G-enabled IoT networks,” IEEE Internet of Things Journal, vol. 8, no. 20, pp. 15349-15360, Oct. 2021.
- [18] 이도현, 양준모, 임상호, 최익환, 박용배, “3차원 전자밀도 데이터 기반 한반도 상공 전리층 전파 경로 분석”, 한국전자과학회논문지, 제 35권 제 11호, pp. 920-928, 2024.
- [19] P. Series, “The radio refractive index: its formula and refractivity data,” Recommendation ITU-R, P.453-11, 2015.

약 력



추현우

2024년 아주대학교 전자공학과 공학사
2024년~현재 아주대학교 시융합네트워크학과 석사과정
관심분야: 위성-지상 통합 네트워크, 저궤도 위성 측위



김태윤

2020년 아주대학교 전자공학과 공학사
2020년~현재 아주대학교 시융합네트워크학과 석박통합과정
관심분야: 무선 MAC 프로토콜, 6G 통신 시스템, UAV 통신 시스템, 위성 시스템 등



도상준

2023년 아주대학교 전자공학과 공학사
2023년~현재 아주대학교 시융합네트워크학과 석박사 통합과정
관심분야: 안테나 설계, 광선추적법

약 력



이도현

2024년 아주대학교 전자공학과 공학사
2024년~현재 아주대학교 AI융합네트워크학과 석사과정
관심분야: 우주 전파 모델링



양준모

2021년 아주대학교 전자공학과 공학사
2021년~현재 아주대학교 AI융합네트워크학과 석박사
통합과정
관심분야: 머신러닝, 우주 전파 모델링



김유빈

2024년 한경국립대학교 전기전자제어 공학사
2024년~현재 아주대학교 AI융합네트워크학과 석사과정
관심분야: 6G 무선통신, 저궤도 위성 시스템



오민규

2021년 부산외국어대학교 지능형IT융합학부 공학사
2021년~2025년 충남대학교 박사수료
2025년~현재 아주대학교 박사과정
관심분야: 차세대 무선통신, 배열안테나 및 위성 신호처리



장희연

2023년 아주대학교 전자공학과 공학사
2023년~현재 아주대학교 AI융합네트워크학과 석사과정
관심분야: 저궤도 위성통신 시스템, 이동통신, 강화학습

약 력



장보우

2024년 충남대학교 전자공학과 공학사
2024년~현재 포항공과대학교 전자전기공학과 석사과정
관심분야: 광선 추적법, 양자 광학 현상 수치해석 모델링



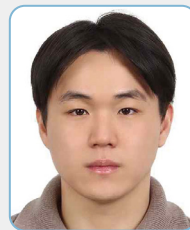
허준

2018년 아주대학교 전자공학과 공학사
2024년 아주대학교 AI융합네트워크학과 박사
2024년~현재 포항공과대학교 전자전기공학과
박사후연구원
관심분야: 대류권 전자파 전파 해석



김홍빈

2024년 경북대학교 전기공학과 공학사
2024년~현재 포항공과대학교 전자전기공학과 석사과정
관심분야: 전자기 수치해석 모델링, 플라즈마 시뮬레이션
알고리즘



최현우

2025년 경북대학교 전자공학과 공학사
2025년~현재 포항공과대학교 전자전기공학과 석박사
통합과정
관심분야: 양자 및 전자기 수치해석 모델링



박용배

1998년 한국과학기술원 전기 및 전자 공학과 학사
2000년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 석사
2003년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 박사
2003년~2006년 KT인프라연구소 선임 연구원
2006년~현재 아주대학교 전자공학과/AI융합네트워크학과
교수
관심분야: 전자파 Propagation 해석, 레이다, 레이돔, AI

약 력



이 호 원

2009년 KAIST 전기및전자공학과 박사
2009년~2012년 KAIST IT융합연구소 선임연구원/연구교수
2018년~2019년 University of California, San Diego 방문
교수
2012년~2024년 국립한경대학교 전자전기공학부 교수
2024년~현재 아주대학교 전자공학과 교수
관심분야: 6G 무선통신, AI for RAN, 위성 시스템 등



정 방 철

2002년 아주대학교 전자공학부 공학사
2004년 KAIST 전기전자공학과 석사
2008년 KAIST 전기전자공학과 박사
2009년~2010년 KAIST IT융합연구소 팀장
2010년~2014년 경상국립대학교 정보통신공학과 조교수
2014년~2015년 경상국립대학교 정보통신공학과 부교수
2015년~2024년 충남대학교 전자공학과 교수
2025년~현재 아주대학교 전자공학과 교수
관심분야: 차세대 무선통신, 정보이론, 신호 처리, 주파수
공유, 무선 자원 관리



정 소 이

2013년 아주대학교 전자공학과 공학사
2014년 아주대학교 전자공학과 석사
2021년 아주대학교 전자공학과 박사
2021년 고려대학교 정보통신기술연구소 연구교수
2021년~2022년 한림대학교 소프트웨어학부 조교수
2021년~2022년 University of California at Irvine 방문
교수
2022년~현재 아주대학교 전자공학과 조교수
관심분야: 모빌리티, 자율주행, 이동통신, 저궤도 위성통신,
인공지능



나 동 엽

2012년 아주대학교 전자공학과 공학사
2014년 아주대학교 전자공학과 석사
2018년 Ohio State University 박사
2019년~2021년 Purdue University 박사후연구원
2021년~2022년 Purdue University Research Scientist
2022년~현재 포항공과대학교 전자전기공학과 조교수
관심분야: 전자기 수치해석 방법론, 고에너지 플라즈마
시스템 모델링, 양자 광학 현상 수치해석 모델링



김 재 현

1996년 한양대학교 전산과 학사 및 석/박사
1997년~1998년 미국 UCLA 전기전자과 박사 후 연수
1998년~2003년 Bell labs, NJ, USA, 연구원
2003년~현재 아주대학교 전자공학과 교수
관심분야: QoE/QoS, 무선 MAC 프로토콜, IEEE
802.11/15, 6G 통신 시스템, 국방 전술
네트워크, 위성시스템 등