

저궤도 위성 기반 사물인터넷을 위한 직접 접속 프로토콜 최신 기술 동향

이채혁[§], 방인규[†], 김태훈^{■§}

[§]국립한밭대학교 컴퓨터공학과, [†]국립한밭대학교 지능미디어공학과

20242073@edu.hanbat.ac.kr, {ikbang, thkim}@hanbat.ac.kr

Recent Trends in Direct-Access Protocol Technologies for IoT using LEO Satellites

Chaehyeok Lee[§], Inkyu Bang[†], Taehoon Kim^{■§}

[§]Department of Computer Engineering, Hanbat National University

[†]Department of Intelligence Media Engineering, Hanbat National University

요약

본 논문은 저궤도(LEO) 위성 기반 IoT(SIoT) 네트워크에서 직접 접속(Direct-Access) 방식의 효율성을 극대화하기 위한 임의 접속(Random Access, RA) 프로토콜의 최신 동향을 조사한다. 지상망의 한계를 넘어 전 지구적 커버리지를 제공하는 LEO 위성 통신은 방대한 수의 IoT 장치 연결을 목표로 하지만, 긴 전파 지연과 높은 이동성으로 인한 도플러 효과 등 기술적 난제에 직면해 있다. 특히, 기존의 예약 기반 방식보다 오버헤드가 적은 Grant-free RA(GFRA) 기술이 주목받고 있다. 본 논문에서는 ALOHA 계열의 진화부터 NOMA 기반의 최신 RA 기술까지 체계적으로 분류하고, 각 프로토콜이 SIoT의 주요 성능 지표인 처리량, 지연 시간, 에너지 효율성에 미치는 영향을 분석한다. 마지막으로 미래 SIoT 환경을 위한 지능형 임의 접속 기술의 발전 방향을 제시하고자 한다.

I. 서론

최근 6G 통신 및 비지상 네트워크(NTN)의 발전으로 전 세계 어디서나 연결이 가능한 저궤도 위성 기반 IoT가 핵심 기술로 부상하고 있다. 지상 네트워크가 닿지 않는 해상, 산간 지역 및 재난 현장에서 IoT 서비스를 제공하기 위해 LEO 위성은 낮은 고도와 상대적으로 짧은 지연 시간을 바탕으로 강력한 대안이 되고 있다. 특히, 지상 게이트웨이를 거치지 않고 위성과 직접 데이터를 주고받는 Direct-Access SIoT 방식은 인프라 구축 비용을 절감하고 서비스 범위를 극대화할 수 있는 장점이 있다.

Direct-access SIoT 시스템은 광범위한 커버리지와 저비용 인프라라는 장점에도 불구하고, 위성 통신의 물리적 한계 해결이 선행되어야 한다. 우선, 긴 전파 지연(Propagation Delay)은 빈번한 신호 교환이 요구되는 기존 예약 기반 매체 접속 방식의 효율을 저해한다 [1]. 또한, 저궤도 위성의 고속 이동으로 인한 강력한 도플러 효과(Doppler Shift)는 신호 동기화를 어렵게 하여 통신 품질을 저하시킨다 [1]. 나아가 수만 개 이상의 단말이 밀집된 환경에서는 한정된 자원에 접속 시도가 집중됨에 따라 심각한 신호 충돌과 데이터 손실이 불가피하다 [1]. 따라서 가혹한 통신 환경에서 지연 시간을 최소화하고 에너지 효율을 제고하기 위해서는, 충돌을 효과적으로 제어 및 복구할 수 있는 고도화된 임의 접속(Random Access, RA) 프로토콜 설계가 필수적이다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저 제2장에서는 SIoT 환경을 위한 다양한 임의 접속 프로토콜을 기술적 특징에 따라 체계적으로 분류하고, 각 프로토콜의 동작 원리와 최신 연구 동향을 상세히 서술한다. 제3장에서는 앞서 살펴본 프로토콜들의 성능을 평가하기 위한 주요 과제와 핵심 지표들을 정리한다. 특히 위성 통신의 특수성을 반영한 처리량, 지연 시간, 에너지 효율성 등의 성능 요소들을 분석하여 최적의 프로토콜 설계 방향을

모색한다. 마지막으로 제4장에서는 본 논문의 내용을 요약하고, 차세대 위성 IoT 통신 기술의 발전 전망을 제시하며 결론을 맺는다.

II. SIoT 임의 접속 프로토콜 분류 및 기술 동향

본 논문에서는 Direct-Access SIoT 환경에 제안된 주요 임의 접속 프로토콜을 기술적 메커니즘에 따라 세 가지 범주로 분류하여 고찰한다.

A. **ALOHA 기반 프로토콜:** ALOHA 기반 방식은 별도의 자원 예약 과정 없이 단말이 즉각적으로 패킷을 전송하는 구조로, 구현이 단순하여 초기 위성 통신부터 널리 사용되었다. 그러나 고전적인 Pure/Slotted ALOHA는 대규모 IoT 환경에서 충돌 확률이 급격히 증가한다는 한계가 있다. 이를 극복하기 위해 제안된 CRDSA(Contention Resolution Diversity Slotted ALOHA)는 동일한 패킷의 복제본을 서로 다른 슬롯에 전송하며, 수신단에서 연속 간섭 제거(SIC, Successive Interference Cancellation) 기법을 활용해 충돌된 신호를 복구함으로써 처리량을 획기적으로 개선하였다. 나아가 IRSA(Irregular Repetition Slotted ALOHA)는 사용자마다 패킷 복제 횟수를 가변적으로 설정하는 그래프 기반 부호화 기법을 도입하여, 제한된 자원 내에서 이론적 한계에 근사하는 성능 최적화를 달성하였고 최근에는 데이터의 처리량 뿐만 아니라 정보의 신선도(Age of Information, AoI)를 최적화하기 위해, 네트워크 부하에 따라 전송 확률을 실시간으로 제어하는 MiST A(Minimizing AoI Slotted ALOHA)와 같은 동적 확률 제어 프로토콜 연구가 활발히 진행되고 있다 [2].

B. **허가 기반(Grant-based) 및 하이브리드 프로토콜:** 데이터 전송의 신뢰성을 보장하고 단말 간의 자원 충돌을 근본적으로 방지하기 위해, 위성 시스템이 자원을 관리하고 할당하는 허가 기반(Grant-based) 접속 방식은 SIoT의 중요한 기술적 축을 담당한다. 대표적인 DA-PAM

A(Demand Assignment Priority Access)는 단말이 위성에 자원 할당을 요청하면, 위성이 유효한 자원을 스케줄링하여 승인 메시지를 전달하는 구조이다. 이러한 방식은 전송할 데이터가 많거나 지속적인 QoS(Quality of Service) 보장이 필요한 서비스에 최적화되어 있다. 그러나 LEO 위성 환경의 긴 전파 지연으로 인해, 데이터 전송 전 반드시 수행되어야 하는 요청-승인(Request-Grant) 절차는 필연적인 대기 시간을 발생시킨다. 이는 특히 소량의 데이터를 간헐적으로 보내는 IoT 기기들에게 불필요한 제어 오버헤드와 접속 지연을 야기하는 원인이 된다. 이를 보완하기 위해 최근에는 초기 예약 요청은 비허가(Grant-free) 방식인 ALOHA를 통해 신속히 수행하고, 확정된 데이터 전송은 할당된 자원을 사용하는 하이브리드(Hybrid) 방식이 활발히 연구되고 있다. 이는 위성 IoT 특유의 비정기적인 트래픽 패턴과 대용량 전송 효율을 동시에 충족시킬 수 있는 유연한 대안으로 평가받는다 [3].

C. **비직교 다중 접속(NOMA) 기반 프로토콜:** 최근 6G 및 차세대 SiOT의 핵심 기술로 주목받는 NOMA 기반 RA는 동일 자원 내에서 다수 사용자의 신호를 중첩하여 전송함으로써 자원 효율성을 극대화한다. Power-domain NOMA는 단말 간 수신 전력 차이를 의도적으로 발생시켜 수신단에서 신호 세기 순으로 간섭을 제거하며 신호를 분리한다. 반면 Code-domain NOMA는 각 사용자에게 고유한 희소 코드북(Sparse Codebook)을 할당하여 신호 간 상관관계를 최소화함으로써 다중 사용자 검출(MUD) 성능을 보장한다. 최근에는 위성 중계망 환경에서 발생하는 복잡한 자원 충돌 문제를 해결하기 위해 강화학습의 일종인 Q-Learnin을 NOMA에 접목한 지능형 임의 접속 프로토콜이 연구되고 있다 [4]. 이는 단말이 최적의 시간 슬롯과 채널을 스스로 학습하게 함으로써, 대규모 기기가 접속하는 환경에서도 처리율을 극대화할 수 있는 대안으로 주목받고 있다. 이러한 NOMA 기술은 수만 개의 장치가 동시 접속해야 하는 미래 위성 환경에서 기존 직교 접속 방식이 가진 주파수 자원 고갈 문제를 해결하고 대규모 연결성(Massive Connectivity)을 확보하는 데 중추적인 역할을 할 것으로 기대된다.

III. 주요 설계 과제 및 성능 평가 지표

본 장에서는 LEO 위성 환경의 물리적 제약으로 인한 기술적 난제와 이를 해결하기 위한 각 프로토콜의 성능 특성을 핵심 지표를 중심으로 비교 분석한다. 위성 IoT 시스템은 긴 전파 지연과 도플러 효과, 대규모 접속 시의 충돌 문제를 극복해야 하며, 특히 제한된 전력과 자원을 보유한 단말들이 가혹한 채널 환경에서도 신뢰성 있는 통신을 유지할 수 있도록 하는 것이 프로토콜 설계의 핵심 과제이다. 각 프로토콜 범주별 대응 성능 및 난제 해결 특성은 아래 표 1과 같다.

표 1. 위성 환경 난제에 따른 임의 접속 프로토콜 성능 비교

평가 지표	ALOHA 기반	Grant-based	NOMA 기반
접속 지연	우수 (즉각 전송)	미흡 (핸드셰이킹)	우수 (비연결형 접속)
처리량	보통 (SIC 보완)	보통 (전용 자원 할당)	우수 (자원 중첩 활용)
에너지 효율	보통 (재전송 가능성)	우수 (충돌 최소화)	보통 (연산 복잡성)
구현 복잡도	낮음 (단순 구조)	보통 (스케줄링 필요)	높음 (수신기 고도화)

각 프로토콜은 위성 통신의 물리적 난제에 대해 서로 다른 대응 특성을 보인다. ALOHA 기반 방식은 별도의 자원 예약 절차 없이 패킷을 즉각

전송하여 긴 전파 지연 환경에서 신속한 접속을 가능하게 하지만, 트래픽 부하 증가 시 신호 충돌로 인한 재전송 지연이 발생할 수 있다. 예약 기반 방식은 자원 할당 과정을 통해 데이터 전송의 신뢰성과 에너지 효율성을 보장하는 반면, 위성-단말 간의 반복적인 신호 교환(Handshaking)으로 인해 전체적인 접속 지연 시간이 길어지는 한계가 있다. 최근 핵심 기술로 부상한 NOMA 기반 방식은 동일 자원 내 다수 사용자 접속을 허용하여 처리량을 극대화하지만, 수신단에서의 복잡한 간섭 제거 연산으로 인해 구현 복잡도가 상대적으로 높다는 특징이 있다.

IV. 결론

본 논문에서는 Direct-Access LEO 위성 기반 IoT 네트워크의 핵심 기술인 임의 접속 프로토콜의 기술 동향과 주요 과제를 고찰하였다. LEO 위성 통신은 전 지구적 커버리지를 제공할 수 있는 강력한 수단이지만, 긴 전파 지연과 도플러 효과, 그리고 대규모 단말 접속으로 인한 신호 충돌 문제는 여전히 해결해야 할 과제로 남아 있다.

기존 ALOHA 방식은 SIC 기법과의 결합을 통해 처리량을 높이는 방향으로 발전해 왔으며, 최신 NOMA 및 하이브리드 기술은 자원 효율성 증대와 지연 시간 단축 측면에서 탁월한 가능성을 보여주었다. 결론적으로 미래의 SiOT 환경은 단순한 충돌 회피를 넘어, 충돌된 신호를 지능적으로 복구하고 자원을 실시간으로 동적 할당하는 고도화된 시스템으로 발전할 것으로 전망된다.

향후 연구에서는 위성 궤도의 동적인 변화와 가변적인 트래픽 패턴에 실시간으로 대응하기 위해 강화학습(Reinforcement Learning) 등 인공지능 기술을 임의 접속 프로토콜에 접목하는 지능형 매체 접속 제어 기술이 주를 이룰 것으로 예상된다. 또한, 물리 계층과 MAC 계층을 통합적으로 고려한 교차 계층 최적화(Cross-layer optimization) 연구가 병행된다면, 더욱 견고하고 효율적인 차세대 위성 IoT 통신 인프라 구축이 가능할 것이다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2025-24523509, 50%). 본 연구는 대학ICT연구센터사업의 연구결과로 수행되었음(IITP-2024-RS-2024-00437886, 50%).

참 고 문 헌

- [1] Le, Thien Thi Thanh, et al. "A survey on random access protocols in direct-access LEO satellite-based IoT communication." IEEE Communications Surveys & Tutorials 27.1 (2024): 426-462.
- [2] Ahmetoglu, Mutlu, Orhan Tahir Yavascan, and Elif Uysal. "MiST A: An age-optimized slotted ALOHA protocol." IEEE Internet of Things Journal 9.17 (2022): 15484-15496.
- [3] Zhang, Ningbo, and Xuzhen Zhu. "A hybrid grant NOMA random access for massive MTC service." IEEE Internet of Things Journal 10.6 (2022): 5490-5505.
- [4] Tubiana, Douglas Alisson, et al. "Q-learning NOMA random access for IoT-satellite terrestrial relay networks." IEEE Wireless Communications Letters 11.8 (2022): 1619-1623.