

저궤도 위성통신 시스템에서 슬롯 정합을 위한 단말 송신 타이밍 보정 기법에 관한 연구

문지훈, 류영빈, 홍근표, 송동호, 박준환
한화시스템

{jhmoon100, yeongbin94.ryu, keunpyo.hong, dongho37.song, wnsghks7045}@hanwha.com

A Study on Timing Correction Method for Slot Alignment in LEO Satellite Communication Systems

JiHun Moon, Yeongbin Ryu, Keunpyo Hong, Dongho Song, Junhwan Park
Hanwha Systems

요약

일반적으로 통신 시스템은 송수신단 사이 타이밍 정합을 통해 데이터를 주고받아야 한다. 특히, 저궤도 위성(Low Earth Orbit, LEO)은 지상망 대비 먼 거리로 인해 정밀한 타이밍 정렬이 요구된다. 그러나, 저궤도 위성은 지속적인 이동으로 위성-지상간 거리가 변화하여 전파지연에 의해 동일한 1ms 타이밍 기준만으로는 송신 타이밍을 정확히 동기화하는 것이 어렵다. 따라서, 본 연구는 OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 기반 물리계층과 TDMA(Time Division Multiple Access) 기반 슬롯 구조에서 위성과 단말은 각각 1PPS(Pulse Per Second) 신호를 기준으로 각각 1ms 간격의 타이밍 기준을 생성한다. 1ms 단위의 타이밍 인덱스를 활용하여 전파지연을 실시간으로 추정하고, 단말의 송신 시점 보정 기법을 제안한다. 타이밍 보정을 위해 위성은 index 정보를 단말에 주기적으로 전송하고, 단말은 이를 수신하여 로컬 시간 기준과 비교함으로써 전파지연을 실시간으로 추정한다. 추정된 전파지연 값은 단말의 송신 시점에 반영되어, 목표로 하는 OBP(On-Board Processor)의 수신 슬롯에 맞춰 데이터가 도달할 수 있도록 타이밍 정합을 수행한다. HDL(Hardware Description Language) 기반 로직 및 Vivado 시뮬레이션을 통해 제안된 기법이 슬롯 정합에 필요한 시간 정확도를 만족함을 확인하였다.

주제어 : 저궤도 위성, OFDM, TDMA, 시간 정합, PPS

I. 서론

저궤도(Low Earth Orbit, LEO) 위성통신 시스템은 정지궤도 위성통신과 비교하여 위성과 단말 간의 통신 거리가 짧고, 빠른 이동성을 가지기 때문에 전파지연 특성이 지상 통신 시스템에 비해 빠르게 변동된다[1]. 특히, TDMA(Time Division Multiple Access) 통신에서는 각 단말이 자신에게 할당된 슬롯에 정확히 송신하기 위해 송수신 타이밍 정합이 필수적이다. 기존의 1PPS(Pulse Per Second) 기반 정합 방법은 전파지연 혹은 신호가 약한 환경에서의 동기 오류가 발생할 수 있다[2]. 또한 RTD(Round Trip Delay) 기반 보정 방법은 핸드셰이크 절차로 인해 실시간성이 떨어진다[3]. 이에 따라 저궤도 위성통신 시스템에 적합하고 정밀한 송신 타이밍 보정 기법이 요구된다[4].

따라서, 본 논문에서는 1ms 단위 index 정보를 활용하여 단말이 전파지연을 실시간으로 추정하고, 이를 기반으로 송신 타이밍을 보정하는 방법을 제안한다.

II. 시스템 환경

단말은 저궤도(LEO) 위성과 약 500~1,200km 거리에서 통신하며, 위성의 이동 및 궤도 특성에 따라 단말과 위성 간 거리 및 상대 속도가 빠른 속도로 변동하여 전파지연이 지속적으로 변한다. 그림 1은 위성과 단말 간의 링크 및 시스템 환경을 도식화한 것으로 위성 탑재 신호처리 장치인 OBP(On-Board Processor)와 지상 단말 간의 링크를 구성한다. OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 기반의 물리 계층

과 TDMA(Time Division Multiple Access) 방식의 슬롯 기반 다중접속 구조를 채택하여 주어진 주파수 대역폭 내에서 시간 단위로 다중 사용자 간 충돌없는 통신 환경을 가정한다. OBP와 단말은 GPS로부터 수신한 1PPS 신호를 통해 각각 자체 1ms tick을 생성하여 시간 동기를 위한 자체 타이밍 정렬 기준으로 삼는다.

III. Index 기반 타이밍 정합 기법

단말이 Uplink 송신을 정확히 TDMA 슬롯에 맞추기 위해서는 OBP와의 시간 기준 차이, 즉 전파지연(one-way delay)을 정밀하게 추정해야 한다.

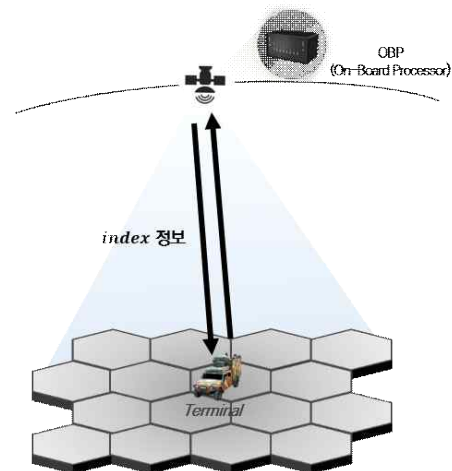


그림 1. 위성-단말 간 링크 환경

전파지연을 추정하기 위해 OBP가 송신하는 1ms index 정보를 이용하고 해당 정보를 기반으로 단말의 송신 타이밍을 보정하는 구조를 제안한다.

위성은 1ms 주기의 tick 신호에 따라 생성된 index 값을 포함한 타이밍 정보를 주기적으로 단말에 전송한다. 해당 index 값은 1PPS 신호를 기준으로 초기화된 후, 0부터 999까지 순차적으로 증가한다. 전파지연은 OBP가 송신한 1ms 단위 index 정보가 단말에 도달한 시점과 해당 index 값에 대응하는 단말 로컬 1ms tick 기반 시각의 차이를 통해 추정이 가능하다. 구체적으로, 단말은 위성이 전송한 index 값을 수신한 순간의 로컬 시간과 1PPS를 기반으로 생성된 로컬 타이밍 시간 사이의 편차를 계산하여 전파지연으로 간주한다. Index 값과 로컬 시각을 통한 추정 전파지연 $d(t)$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$d(t) = T_{rx_index}(t) - T_{local_index}(t), \quad (1)$$

$T_{rx_index}(t)$ 는 단말이 OBP로부터 index 정보를 수신한 시간이고 $T_{local_index}(t)$ 는 수신된 index에 해당하는 단말의 로컬 시간이다. 해당 방식을 통해 절대 시간 기준 없이 전파지연을 효과적으로 추정할 수 있다. 추정된 전파지연 값을 기반으로, 단말 송신 타이밍 $T_{tx}(t)$ 는 다음과 같이 설정된다.

$$T_{tx}(t) = T_{OBP_rx}(t) - d(t), \quad (2)$$

$T_{OBP_rx}(t)$ 는 위성이 특정 슬롯에서 신호를 수신해야 하는 이상적인 시각을 의미한다. 단말은 신호가 전파지연을 고려한 정확한 시점에 도달하도록 송신 시점을 조정하며, 이는 TDMA 기반 통신 시스템에서 슬롯 간 간섭을 방지하고 정밀한 타이밍 정합을 유지하는데 핵심적인 역할을 수행한다.

IV. 시뮬레이션 결과

시뮬레이션을 수행하기 위해 OBP와 단말 간 거리는 약 550km로 가정하고, 위성 이동에 의해 시간에 따라 전파지연이 변화하는 시나리오를 반영한다. 저궤도 위성과 지상 단말 사이 정밀한 송수신 타이밍 정렬을 위해 전파지연 추정의 정확도와 송신 타이밍 정합 성능을 검증한다.

그림 2는 HDL 기반으로 설계 및 구현된 로직의 시뮬레이션 결과로, 전파지연 트래킹 및 송신 타이밍 보정 결과를 보여준다.

제안한 타이밍 보정 기법은 지속적으로 변화하는 전파지연 환경에도 불구하고 약 $0.12\mu s$ 의 추정된 전파지연($d(t)$)과 실제 전파지연 간의 오차로 매우 높은 정확도를 보여준다. 또한, 단말 송신 시점을 추정된 전파지연에 따라 동적으로 보정함으로써 OBP의 수신 시점에 데이터가 정확하게 도달하도록 조정됨을 확인하였다. 결과적으로, 제안한 송신 타이밍 보정 방식이 실제 저궤도 위성통신 시스템과 유사한 환경에서도 안정적으로 동작할 수 있음을 검증하였다.

V. 결론

본 논문에서는 TDMA 기반의 송수신 기술을 사용하는 저궤도 위성통신 시스템에서 위성의 빠른 이동에 의한 잦은 링크 특성 변화에 효과적으로 대응하기 위해 단말 송신 타이밍을 정밀하게 보정할 수 있는 1ms index 기반 전파지연 추정 및 보정 기법을 제안하였다.

Vivado 시뮬레이션을 통해 제안된 기법으로 추정된 전파지연의 오차가

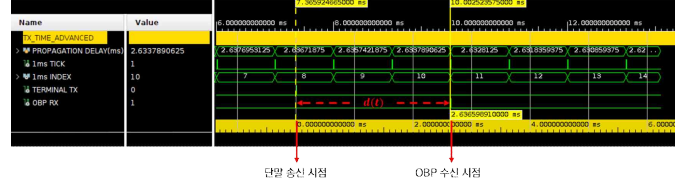


그림 2. 단말 송신 타이밍 정합 시뮬레이션 결과

TDMA 구조의 가드 타임 이내에 수렴함을 확인하였고, OBP 수신 시점에 맞춰 단말 송신 시점을 정밀하게 조정함으로써 타이밍 보정의 유효성을 입증하였다.

향후 연구에서는 OBP 장치에 탑재될 것으로 예상되는 FPGA 등의 장비를 활용한 구현 및 다양한 이동 환경(예: 궤도 변화, 다양한 링크 상태)에서 성능 평가를 통해 본 기법의 실용성을 확장할 예정이다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2025년 정부(방위사업청)의 재원으로 국방기술진흥연구소의 지원을 받아 수행된 연구임(KRIT-CT-22-079)

참 고 문 헌

- [1] Ma, J., Zheng, P., Liu, X., Zhang, Y., & Al-Naffouri, T. Y. (2024). Integrated Positioning and Communication via LEO Satellites: Opportunities and Challenges. arXiv preprint arXiv:2411.14360.
- [2] Smith, Austin M., and David M. Bevely. "Precision Timing with LEO Satellite Time and Location Signals." Proceedings of the 54th Annual Precise Time and Time Interval Systems and Applications Meeting. 2023.
- [3] T. T. T. Le, N. U. Hassan, X. Chen, M. -S. Alouini, Z. Han and C. Yuen, "A Survey on Random Access Protocols in Direct-Access LEO Satellite-Based IoT Communication," in IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 27, no. 1, pp. 426-462, Feb. 2025
- [4] F. S. Prol et al., "Position, Navigation, and Timing (PNT) Through Low Earth Orbit (LEO) Satellites: A Survey on Current Status, Challenges, and Opportunities," in IEEE Access, vol. 10, pp. 83971-84002, 2022