

저궤도 위성 통신 시스템을 위한 LSTM 기반 피더 링크 스위칭 최적화 알고리즘

임동규, 김현준, 강신영, 안유정*, 김민식*, 김재현

아주대학교 전자공학과, 아주대학교 AI 융합네트워크학과*

{dg7795, guagmire, rgz1204, *dbwjd5825, *qq01025, jkim}@ajou.ac.kr

Optimization of Feeder Link Switching Performance Based on LSTM for Low Earth Orbit Satellite Communication System

Donggyu Rim, Hyunjun Kim, Shinyoung Kang, *Yujeong Ahn, *Minsik Kim, Jaehyun Kim

Department of Electrical and Computer Engineering, Ajou University,
Department of Artificial Intelligence Convergence Network, Ajou University*

요약

최근 low Earth orbit (LEO) 위성통신 시스템이 빠르게 성장함에 따라, 위성의 빠른 이동 속도를 고려한 위성-게이트웨이 간의 피더 링크 스위칭 알고리즘이 필요하다. 본 논문에서는 시계열 데이터 기반 long short-term memory (LSTM) 예측 모델을 활용하여 reference signal received power (RSRP)를 예측하고, 이를 바탕으로 피더 링크 스위칭을 최적화하는 알고리즘을 제안한다.

I. 서론

Low Earth orbit (LEO) 위성은 낮은 지연과 광범위한 서비스 제공이 가능하여 non-terrestrial network (NTN)의 핵심 요소로 주목받고 있다. LEO 위성은 빠른 속도로 이동하여 가시권이 계속 변하여 게이트웨이 간의 스위칭이 필연적으로 발생하기 때문에, 안정적인 피더 링크 스위칭에 대한 보장이 필요하다. 본 논문에서는 피더 링크 스위칭의 최적화를 위해 long short-term memory (LSTM) 모델을 활용한다. 제안하는 모델은 위성이 게이트웨이로부터 수신하는 reference signal received power (RSRP)를 LSTM을 통해 예측하여 스위칭을 최적화하고, 게이트웨이 선택을 안정화하여 신호 세기 기반 알고리즘에서 발생하는 불필요한 스위칭을 줄인다. 모델의 성능은 불필요한 피더 링크 스위칭 횟수를 기반으로 분석하였다. 제안한 LSTM 기반 피더 링크 스위칭 알고리즘은 평균 RSRP 성능을 유지하면서 불필요한 스위칭 횟수를 효율적으로 감소시켰다.

II. 본론

1. 시스템 모델

본 논문에서는 그림 1(a)와 같이 단일 위성이 다중 게이트웨이를 지나면서 피더 링크 스위칭을 수행하는 환경을 가정한다. 3rd generation partnership project (3GPP)의 deployment-d4를 기반으로, LEO 위성의 ka-band uplink 환경을 고려한다 [1]. 게이트웨이의 antenna는 parabolic antenna를 적용하였고, 위성이 게이트웨이의 위치를 알고 있다고 가정한다. Shadow fading (SF)에 따른 RSRP 변동은 빈번한 스위칭을 유발할 수 있다. 이를 보완하기 위해, 이전 측정값과 최신 측정값을 일정 비율로 결합하여 보다 안정적인 측정값을 제공하는 layer 3 filtering 기법을 활용한다. 위성은 sampling time을 기준으로, 주기적으로 RSRP를 측정하며 RSRP는 수식 (1)로 계산한다.

$$RSRP = EIRP - PL + G_{rx}, \quad (1)$$

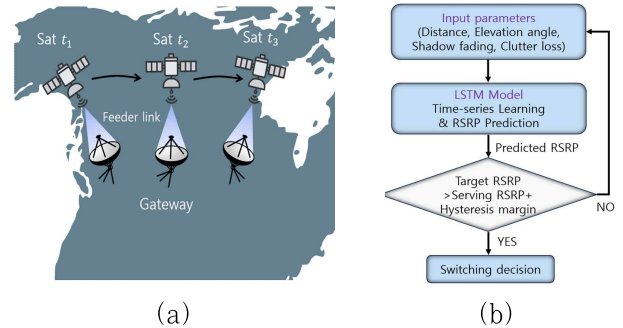


그림 1. (a) 시스템 모델, (b) 피더 링크 스위칭 최적화 알고리즘

Equivalent isotropically radiated power (EIRP)는 등방성 안테나가 방출할 수 있는 최대 전력으로, 송신 전력과 송신 안테나 이득을 더하여 계산한다 [2]. Path loss (PL)는 위성-게이트웨이 간의 통신 과정에서 발생하는 경로 손실을 의미한다 [1]. G_{rx} 는 수신 안테나 이득으로, 특정 방향에서 신호를 얼마나 효율적으로 수용하는지의 정도이다 [2].

2. 제안하는 피더 링크 스위칭 최적화 알고리즘

LSTM은 시계열 데이터의 장기적 의존성을 학습할 수 있는 모델로, 시간에 따라 변화하는 RSRP의 패턴을 안정적으로 학습할 수 있다. 이를 통해 순간적인 신호 감쇠에 의한 RSRP 변화를 장기적으로 예측함으로써, 불필요한 피더 링크 스위칭을 최소화한다. 제안하는 알고리즘에서 LSTM은 그림 1(b)의 알고리즘과 같이 위성-게이트웨이 간의 거리, elevation angle, SF, clutter loss를 input으로 받아 현시점의 RSRP를 계산한다. 이후 계산된 RSRP 값의 시계열 패턴을 학습하고, 이를 기반으로 일정 시간 후의 RSRP 예측값을 output으로 내보낸다. 예측된 RSRP는 서빙 게이트웨이와 타겟 게이트웨이 간의 비교 기준으로 활용된다. 피더 링

표 1. 성능 분석 파라미터

Parameter	Value
중심 주파수	30 GHz
위성 운용 고도	600 km
수신 안테나 이득	39.5 dBi [4]
게이트웨이 송신 전력	80 W [1]
송신 안테나 직경	1.5 m [5]
송신 안테나 개구효율	0.625 [2]
배경 시나리오	rural 시나리오 [1]
Hysteresis margin	3 dB
Sampling time 주기	0.2 s
시뮬레이션 시간	10 min

크 스위칭 조건은 3GPP에서 정의하는 A3 이벤트를 기반으로, 타겟 게이트웨이의 RSRP가 서빙 게이트웨이의 RSRP 보다 hysteresis margin 이 상 커졌을 경우 스위칭을 수행한다 [3].

III. 성능 분석

LSTM 기반 피더 링크 스위칭 알고리즘은 단일 starlink LEO 위성과 북미 대륙의 8개의 게이트웨이 환경에서 성능 분석을 수행한다. LEO 위성은 two-line element set (TLE) 파일을 참고하여 궤도를 구성하였으며, 채널 모델을 위한 파라미터는 표 1과 같다.

그림 2(a)는 LSTM 기반 측정 비율 변화에 따른 분당 스위칭 횟수를 보여준다. 성능 분석을 위해 LSTM 예측값과 실측값의 반영 비율을 변화시키며 진행하였다. 실측값:예측값의 비율을 100:0으로 설정한 A3 이벤트 기반에서부터 0:100 비율의 예측 기반까지 20% 단위로 구분하여, 총 6가지 비율에 대해 시뮬레이션을 수행하였다. 이때 실측값은 채널 환경을 고려한 이론적 RSRP 값이며, 예측값은 LSTM 모델이 시계열 패턴을 학습하여 일정 시간 후의 RSRP를 예측한 결과이다. 실측값 100%로 구성된 기존 A3 이벤트 기반 스위칭 방식에서는 분당 약 3.83회의 스위칭이 발생하였다. 이는 SF에 의한 RSRP의 순간적인 변화와 같은 요인에 즉각 반응하여 불필요한 스위칭이 발생하기 때문이다. 그러나 예측값의 비율을 늘려감에 따라 평균 스위칭 횟수는 각각 3.49회, 3.11회, 2.72회, 2.34회로 감소하였으며, 예측값 100% 구간에서는 1.92회로 실측값 100% 대비 49.8% 감소하였다. 즉, LSTM이 시계열적 특성을 학습하여 순간적인 RSRP 변화로 인해 A3 이벤트가 불필요하게 발생하는 것을 방지한다. 결과적으로 제안하는 LSTM 기반 RSRP 예측을 통한 스위칭을 통해 불필요한 스위칭을 감소시키는 것을 확인하였다.

그림 2(b)는 LSTM 기반 측정 비율 변화에 따른 평균 RSRP 값을 보여준다. 평균 RSRP는 예측값 비율이 높아질수록 감소하는 경향을 보인다. 실측값 100% 구간에서는 평균 -34.48 dBm을 기록하였고, 예측값의 비율이 높아질수록 -34.49, -34.50, -34.52, -34.53 dBm으로 점진적으로 낮아졌다. LSTM 예측 100% 기반 RSRP의 최대 감소 폭은 0.05 dB이다. 이는 스위칭 빈도를 줄이는 대신, 순간적으로 더 높은 신호 세기를 갖는 링크로의 전환이 감소하였기 때문이다. 스위칭 횟수를 줄이는 과정에서 순간적인 RSRP 향상을 놓치는 trade-off 관계가 발생하였으나, 그 손실 비율이 약 1.25% 정도로 미미하다. 결론적으로, 제안한 LSTM 기반 피더 링크 스위칭 알고리즘은 측정 기반 A3 이벤트 방식에 비해 스위칭 횟수를 49.8%가량 줄이면서도 평균 RSRP 손실이 1.25%밖에 발생하지 않았다. 즉, LEO 위성 통신 시스템에서의 불필요한 스위칭을 줄이는 동시에, 통신 품질 저하를 완화하여 시스템의 효율을 개선하였다. 또한, 예측값의 비율이 높아질수록 실시간 RSRP 측정을 위한 신호 자원의 사용량이 줄어들어

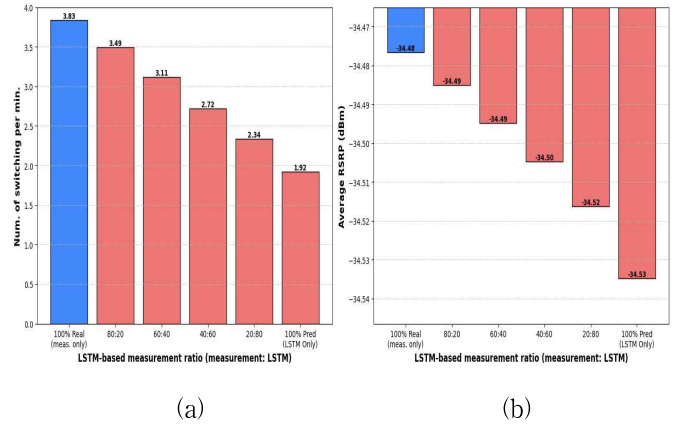


그림 2. LSTM 반영 비율에 따른 (a) 분당 스위칭 횟수 및 (b) 평균 RSRP

전체 시스템의 측정 자원 소모를 감소시킨다. 따라서 LSTM 기반 스위칭 알고리즘은 단순히 스위칭 효율을 높이는 데서 그치지 않고, 측정 자원 사용량 절감 측면에서도 실질적인 효율 향상을 제공한다.

IV. 결론

본 논문에서는 LEO 위성 통신 시스템의 피더 링크 스위칭 효율을 향상시키기 위해 LSTM 기반 RSRP 예측 모델을 적용한 피더 링크 스위칭 최적화 알고리즘을 제안한다. 제안한 알고리즘은 3GPP A3 이벤트 조건을 기반으로 하되, LSTM 기반 RSRP의 시계열 데이터 예측을 통해 측정값의 변동성을 완화하여 불필요한 스위칭을 줄이는 데 초점을 두었다. 성능 분석 결과, 실제 측정값 대비 LSTM 기반 RSRP 비율이 높아질수록 스위칭 횟수는 49.8% 감소하였으나, 평균 RSRP는 0.05 dB 내외로 1.25% 감소하였다. 이는 불필요한 스위칭 감소와 신호 세기 간의 trade-off 관계를 보여주며, LSTM 모델이 스위칭 효율성을 유지하면서도 링크 안정성 유지할 수 있음을 확인할 수 있다. 또한 RSRP 측정 자원 절감 측면에서도 실질적인 시스템 효율 개선 효과를 제공한다. 향후 연구에서는 다중 위성-다중 게이트웨이 환경으로 확장하여 스위칭 간섭을 고려한 다중 피더 링크 동시 최적화를 수행할 계획이다.

참고 문헌

- [1] 3GPP TR 38.811 V15.1.0, "Study on New Radio (NR) to support non-terrestrial networks (Release 15)", Jun. 2019.
- [2] 3GPP TR 38.821 V16.0.0, "3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Solutions for NR to support non-terrestrial networks (NTN) (Release 16)", Dec. 2019.
- [3] 3GPP TS 36.331 V18.5.0, "Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio Resource Control (RRC); Protocol specification (Release 18)", Mar. 2025.
- [4] FCC 22-91A1, "Report and Order and Order on Reconsideration in the Matter of Space Exploration Holdings, LLC Request for Orbital Deployment and Operating Authority for the SpaceX Gen2 NGSO Satellite System", Dec. 2022.
- [5] FCC DOC-378177A1, "Public Notice: Satellite Communications Services Information (Report No. SES-02420)", Nov. 2021.