

DTPC: 저궤도 위성 통신 시스템에서의
LSTM 기반의 감쇠 예측 및 송신 전력 동적 제어 기법
최남규, 이예린, 이호원
아주대학교
{msns1005, yerin1205, howon}@ajou.ac.kr

DTPC: LSTM-Based Attenuation Prediction and Dynamic Transmit Power Control for LEO Satellite Communication Systems

Namgyu Choi, Yerin Lee, Howon Lee
Ajou Univ.

요약

본 논문은 6G 통신의 핵심 기술인 고주파 대역 기반 저궤도(low earth orbit, LEO) 위성 통신의 품질을 개선하고, 안정적인 Link Budget 확보를 목표로 한다. 특히 저궤도 위성 통신 환경에서 빈번하게 발생하는 강우 감쇠, 경로 손실, 도플러 이동, 가우시안 잡음, 안테나 빔 폭에 따른 감쇠 등 복합적인 요소를 실시간으로 예측하고 이에 대응하는 기법을 제안한다. 시계열 데이터 예측에는 long short-term memory(LSTM) 모델을 적용하였으며, 감쇠량을 예측하고, 이를 기반으로 동적 송신 전력 알고리즘을 제안한다. 전력 제어 과정에서는 급격한 변동을 완화하기 위해 smoothing 기법을 추가로 적용하였다. 시뮬레이션 기반 실험을 통해 제안된 기법은 높은 예측 정확도를 달성하였으며, link margin 역시 안정적으로 유지함을 보이며, 저궤도 위성 통신에서의 안정적인 통신 품질 향상 가능함을 입증한다.

I. Introduction

통신 기술의 발전에 따라 6G 네트워크는 tera bps 수준의 초고속 데이터 전송과 지구 전역의 글로벌 커버리지 달성을 목표로 하고 있다. [1] 이러한 비전 실현을 위해 위성 통신 기술이 크게 주목받고 있다. 그러나 저궤도(low earth orbit, LEO) 위성은 고도가 낮을수록 더 고속으로 이동하며, 대기권 내 다양한 환경 변화에 노출되어 복합적인 감쇠 현상이 빈번히 발생한다 [1]. 주요 감쇠 요인으로는 경로 손실(path loss), 강우 감쇠(rain attenuation), 도플러 이동(doppler shift), 가우시안 잡음(gaussian noise), 그리고 안테나 빔 폭에 따른 이득 감소 등이 있다 [2]. 이러한 요소들이 사전에 예측되지 못하거나, 정적인 제어 방식으로만 대응할 경우, 자원 낭비와 link의 불안정성에 의해 통신 품질 저하가 발생할 수 있다. 따라서 위성 통신 시스템의 안정적 운용을 위해서는 복합적인 감쇠 요인의 변화를 실시간으로 예측하고, 이를 바탕으로 한 적응적 전력 제어 및 자원 분배 기법 적용이 필수적이다 [3].

본 연구는 이러한 문제의식을 바탕으로, (1) 저궤도 위성 통신 환경에서 발생하는 감쇠 요소들을 통합적으로 모델링하고, (2) long short-term memory(LSTM) 기반의 시계열 예측 모델을 통해 시간에 따른 실시간으로 예측하며, (3) 예측된 감쇠 값을 바탕으로 송신 전력을 적응적으로 제어함으로써 통신 품질의 안정성, 에너지 효율성, 실시간 적응성을 향상시키고자 한다.

II. System and Channel model

1) Damping Model

본 연구는 저궤도 위성 통신 환경에서 주요 감쇠 요인을 다음과 같이 통합적으로 모델링한다. a) 경로 손실은 자유공간 손실(free space path loss)에 기반하여 그림자 효과(shadowing) 및 산란(clutter) 손실을 포함하였고, 입사각과 Ka 밴드 환경을 고려하였다 [2]. b) 강우 감쇠는 [4]의 ITU-R P.838 권고안을 기반으로 다음과 같이 계산된다.

$$A_{rain} = k \times R^\alpha \quad (1)$$

여기서 R 은 강우율(mm/h)이며, k 와 α 는 주파수와 편광각, 입사각에 따라 결정되는 변수이다. c) 도플러 이동은 위상과 지상국 간의 속도에 따른

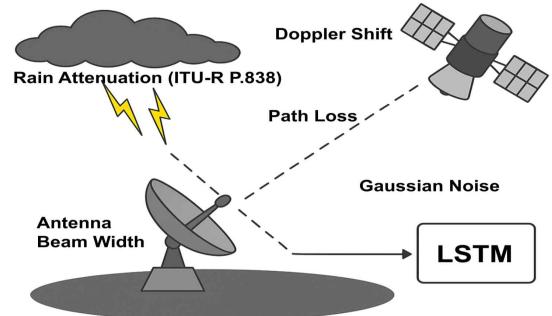


그림 1. 제안하는 DTPC 프레임워크

라 발생하며, 1회 케이드 접근-이탈 과정을 고려해 실시간으로 계산된다. d) 가우시안 잡음은 환경 및 하드웨어 기반 잡음을 평균 0, 표준편차 2의 정규 분포를 통해 모델링한다. e) 빔 폭에 따른 이득 감소는 half-power beam width(HPBW)을 기준으로 수신 위치에 따른 안테나 이득 감소를 정량화한다.

2) Dynamic Damping Mitigation Technique

복합 감쇠에 효과적으로 대응하기 위해 두 가지 기법을 적용한다. 첫 번째로, LSTM 기반 감쇠 예측 기법을 수행한다. 감쇠 sequence를 입력으로 받아 두 개의 LSTM 층과 dense layer를 통해 시계열 패턴을 학습하고, 향후 감쇠량을 예측한다. 두 번째로, 동적 송신 전력 제어 및 Smoothing 기법을 수행한다. 예측된 감쇠량을 기반으로 송신 전력을 동적으로 제어하며, 급격한 변화로 인한 불안정성을 줄이기 위해 다음과 같은 저역 통과 필터를 적용한다.

$$P_{tx}[n] = \beta \times P_{raw}[n] + (1 - \beta) \times P_{tx}[n-1] \quad (2)$$

여기서 β 는 Low Pass Filter 계수이며, 본 연구에서는 0.1을 사용하였다.

III. Evaluation

본 장에서는 제안 기법의 성능을 종합적으로 평가하기 위한 실험 환경, 평가지표, 그리고 결과 분석을 제시한다. 실험은 다양한 궤도 시나리오와

기상 조건을 포함한 시뮬레이션 환경에서 수행되었으며, 감쇠 예측의 정확도와 이를 기반으로 한 전력 제어 기법의 효과를 객관적으로 분석한다.

a. Experimental Results

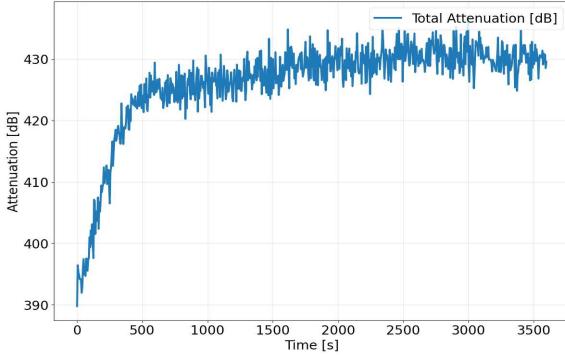


그림 2. DTPC 적용을 위한 복합 감쇠 환경

그림 2는 제안된 damping model에 기반한 시뮬레이션 중 수집된 감쇠 데이터를 나타낸다. 해당 데이터는 각 감쇠 요소를 실시간으로 반영하고 있으며, 이를 통해 복합 감쇠 환경을 고려한 통신 시나리오가 구성되었음을 확인할 수 있다. 본 연구는 이러한 복합 환경을 구현하여 제안 기법의 성능을 검증하였다.

b. Performance Metrics

본 연구에서는 예측 성능을 정량적으로 평가하기 위해 Mean Absolute Error(MAE), Root Mean Squared Error(RMSE), Coefficient of Determination(R^2) 지표를 고려하여 다각도의 성능 분석을 수행하였다.

표 1. 성능 지표에 따른 제안 기법 결과

Performance metrics	MAE	RMSE	R^2
Values	1.79 dB	2.23 dB	0.88

표 1은 제안 기법의 예측 성능 결과를 보여준다. 이는 모델이 실제 감쇠 패턴을 안정적으로 학습하고, 고정된 예측값이 아닌 시간에 따른 동적 추세를 효과적으로 반영하고 있음을 시사한다.

c. Performance Analysis

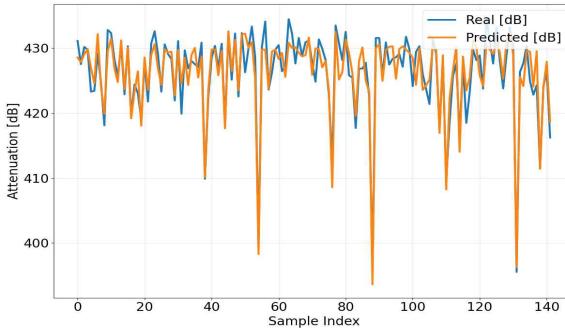


그림 3. 예측 모델의 적응성 분석: 실제 vs 예측 감쇠량 시계열

그림 3은 예측된 감쇠량과 실제 감쇠량을 비교한 시계열 그래프이며, 제안 모델이 감쇠 변화의 전반적인 추세를 정확하게 반영하고 있음을 보여준다. 특히, 급격한 감쇠 변화가 발생하는 구간에서도 예측값이 실제 값의 변화 양상을 민감하게 추종하며, 모델의 우수한 적응성을 확인할 수 있다.

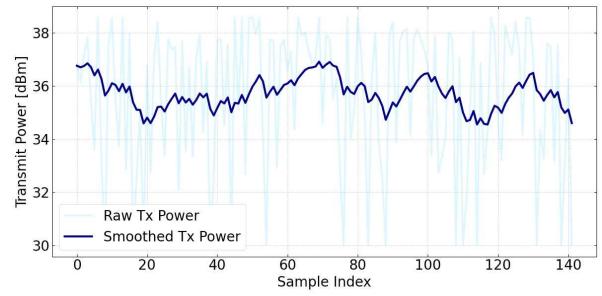


그림 4. 예측 기반 송신 전력 제어 결과

그림 4는 시간에 따른 예측 감쇠량을 기반으로 수행된 송신 전력 제어 결과를 나타낸다. 예측 결과의 추세에 따라 송신 전력이 안정적이면서도 적응적으로 조정되고 있음을 확인할 수 있다.

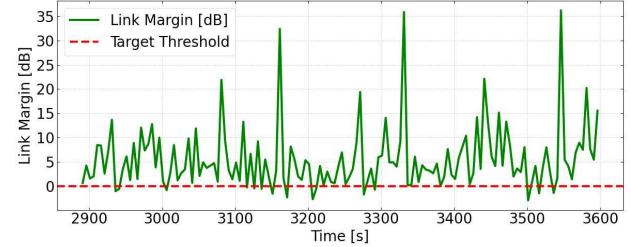


그림 5. 예측 기반 전력 제어에 따른 link 유지율

그림 5는 예측 기반의 전력 제어를 통해 통신 링크가 얼마나 안정적으로 유지되는지를 나타낸다. 다양한 감쇠 상황에서도 수신 전력이 수신 감도 이상을 유지한 비율이 78.91%에 달하며, 이는 실시간 저궤도 위성 통신 환경에서의 높은 안정성과 적응성을 입증한다.

IV. Conclusion

본 논문에서는 6G 위성 통신 환경에서 발생하는 복합 감쇠 요인을 실시간으로 예측하고, 이를 기반으로 송신 전력을 동적으로 조절하는 DTPC 기법을 제안하였다. 시계열 기반 LSTM 모델을 활용한 감쇠 예측은 MAE 1.79 dB, RMSE 2.23 dB, 결정 계수 R^2 0.88의 우수한 예측 성능을 보였으며, 링크 유지율 78.91%를 통해 높은 신뢰성과 실시간 적용 가능성을 입증하였다. 제안된 DTPC 기법은 향후 실제 궤도 조건 및 다양한 채널 환경으로의 확장이 가능하며, 6G 시대의 자율형 위성 통신 시스템 구현에 효과적으로 이바지할 수 있을 것으로 기대된다.

V. ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2024년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원(No. RS-2024-00396992, 저궤도 위성통신 핵심 기술 기반 큐브위성 개발)과 2022년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원(No. 2022-0-00704, 초고속 이동체 지원을 위한 3D-NET 핵심 기술 개발)과 2025년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(RS-2025-00563401, 3차원 공간에서 에너지 효율적 멀티레벨 AI-RAN 구현을 위한 AI-for/and-RAN 핵심 원천기술 연구)을 받아 수행된 연구임.

References

- [1] Yuehing Gao, "A Cross Polarization Interference Cancellation Scheme Based on CNN-LSTM for 6G Satellite Communication", 2023 IEEE WCNC.
- [2] 김재현, "차세대 저궤도 위성통신망을 위한 채널 모델링 및 주요 기술 동향", pp 1097-1108", 2021.
- [3] Menachem Manis Domb Alon, "Satellite to Ground Station, Attenuation Prediction for 2.4-72 GHZ Using LSTM, an Artificial Recurrent Neural Network Technology", 2022
- [4] ITU-R P.838-3 Documents