

# 저궤도 위성 초기 접속을 위한 LSTM 기반 SSB 잔여 도플러 보상 기법

문태한, 이재열\*, 이재영, 이영포\*\*, 김재현\*\*\*

아주대학교 AI융합네트워크학과, 아주대학교 우주전자정보공학과\*,  
SK텔레콤 New Connectivity팀\*\*, 아주대학교 전자공학과\*\*\*

{ansxogks3, \*jaeyel98, dlwodudd486, \*\*\*jkim}@ajou.ac.kr, \*\*youngpo.lee@sk.com

## LSTM-based SSB Residual Doppler Compensation Method for LEO Satellite Initial Access

Taehan Moon, JaeYeol Lee\*, Jaeyeong Lee, Youngpo Lee\*\*, Jae-Hyun Kim\*\*\*

Department of Artificial Intelligence Convergence Network, Ajou University,  
\*Department of Space Electronics and Information Engineering, Ajou University,  
\*\*SK Telecom Company, Limited, Seoul, South Korea,  
\*\*\*Department of Electrical and Computer Engineering, Ajou University.

### 요약

저궤도 위성 네트워크는 긴 전파 거리와 위성의 빠른 속도로 인해 큰 도플러 효과가 발생한다. 본 논문에서는 저궤도 위성 네트워크의 잔여 도플러를 보상하기 위해 long short-term memory (LSTM) 기반 도플러 보정 알고리즘을 제안한다. 제안한 알고리즘은 초기 접속할 때 발생하는 잔류 도플러를 정확하게 추정하고 보상할 수 있음을 보여준다.

### I. 서론

저궤도 (low Earth orbit, LEO) 위성 시스템은 지상 네트워크와 달리 광범위한 커버리지를 제공할 수 있다. 하지만 저궤도 위성은 긴 전파 거리와 높은 상대 속도로 인해 높은 도플러 효과가 발생한다. 3rd generation partnership project (3GPP)에서는 이러한 도플러 효과를 완화하기 위해, 빔 중심 좌표로 도플러를 보상하는 pre-compensation 도플러 기법을 제안한다 [1]. 그러나 user equipment (UE)가 빔 중심에서 떨어진 위치에 존재할 경우, 추가적인 도플러 편이가 발생한다. 이러한 도플러는 synchronization signal block (SSB)의 상관을 왜곡시키고, 저궤도 위성 과 UE 간의 초기 접속 실패를 야기할 수 있다. 본 논문에서는 long short-term memory (LSTM)을 기반으로 저궤도 위성 초기 접속 잔여 도플러 보상 기법을 제안한다. 제안한 기법은 예측한 잔여 도플러를 보상함으로써, 저궤도 위성망 초기 접속률을 99.4%까지 성능을 향상시킨다.

### II. 시스템 모델 설계

본 논문에서 고려하는 시스템 모델은 그림 1과 같다. 저궤도 위성  $s$ 는 Earth-fixed 빔들을 방사하고, 저궤도 위성 빔은  $B = \{b | b = 1, 2, \dots, B\}$ 로 정의한다. 지상에 위치한 UE는  $U = \{u | u = 1, 2, \dots, U\}$ 로 정의한다. 저궤도 위성  $s$ 와 UE  $u$  간의 초기 접속은  $T = \{t | t = 1, 2, \dots, T\}$  시간 동안 진행되며, 시간  $t$ 에서 저궤도 위성  $s$ 와 빔  $b$  간의 고도각  $\theta_b^s(t)$ 이 최소 고도각  $\theta_{\min}$ 을 초과하면 초기 접속이 진행된다. 이때 저궤도 위성  $s$ 는 SSB 전송을 스케줄링하고 UE  $u$ 는 동기화를 시도한다. 저궤도 위성  $s$ 는 global navigation satellite system (GNSS)로부터 위성의 위치 및 속도와 빔  $b$ 의 좌표를 수신받는다. 받은 정보에 기반하여 저궤도 위성  $s$ 는 사전 보상한 도플러 기반 SSB  $x_s(t)$ 를 수신하고, 아래와 같이 정의한다.

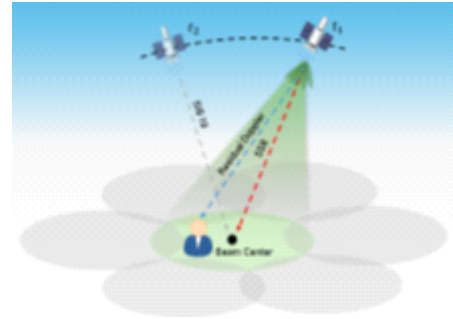


그림 1. 저궤도 위성 초기 접속 시스템 모델

$$x_s(t) = x(t)e^{-j2\pi f_{pre}(t)t}, \quad (1)$$

$x(t)$ 는 시간  $t$ 에서의 SSB waveform을 의미하고,  $f_{pre}$ 는 저궤도 위성  $s$ 와 빔  $b$  간의 사전 보상한 도플러 주파수를 의미한다. 빔  $b$ 의 중심으로부터  $d$  km 거리에 위치한 UE  $u$ 는 추가적인 도플러 편이인 잔여 도플러가 발생하고, 이에 기반하여 SSB를 수신하고 초기 접속을 진행한다. UE  $u$ 에서 수신된 SSB 신호를  $x_r(t)$ 라고 할 때, 아래와 같이 정의한다.

$$x_r(t) = x(t)e^{j2\pi(f_{res}(t) + f_{pre}(t))t} + n(t), \quad (2)$$

$f_{res}(t)$ 는 시간  $t$ 에서 발생한 잔여 도플러 주파수,  $n(t)$ 는 additive white Gaussian noise (AWGN)을 의미한다.

UE는 잔여 도플러 추정 및 SSB 복호화를 수행하기 위해서, 3GPP 문서에 명시된 global synchronization channel number (GSCN)을 활용한다 [2]. GSCN은 5G new radio (NR)에서 UE가 SSB를 효율적으로 탐색할 수 있도록 정의된 주파수 간격을 의미한다. UE는 GSCN에서 지정한 모든 후보 주파수에 대해서 primary synchronization signal (PSS) 상관관계를

표 1. 시뮬레이션 파라미터

Parameters	Values
Altitude	340 km
Carrier frequency	1.542 GHz
Bandwidth	20 MHz
$\theta_{\min}$	25°
EIRP	48.8 dBW
PPM grid	0.5 ppm
Layers	3
Dropout	0.2
Activation function	ReLU
Batch size	64
Epochs	500

평가하고, 최대 상관 값을 나타내는 주파수를 동기 참조 값으로 선택한다.

$$C(f_{\text{cand}}) = \max \left| \sum_{n=0}^{N-1} x_r[n+m] e^{-j2\pi f_{\text{cand}}(n+m)T_s} s^*[n] \right|, \quad (3)$$

$f_{\text{cand}}$ 는 GSCN을 통해 정의된 후보 주파수군을 의미하고,  $s[n]$ 은 PSS 참조 신호를 나타내며, UE는 이들 사이의 상관관계를 최대화하는 ppm 간격  $m$ 과  $f_{\text{cand}}$ 를 탐색하여 동기화를 위한 잔여 도플러를 추정한다.

본 논문에서는 잔여 도플러 탐색에서 얻은 측정값들을 LSTM 모델의 입력 파라미터로 활용하여 주파수 추정의 정확도를 높인다. 입력 벡터는 측정된 잔류 도플러 주파수 및 반송파 주파수, 최대 상관관계를 갖는 ppm index, 정규화된 최대 상관 값, 그리고 최대 상관 값의 1차 및 2차 도함수로 구성된다. 이를 통해 제안한 LSTM 기반 알고리즘은 잔여 추정치의 오차를 보정하기 위한 수정값을 예측한다. 제안한 모델은 실제 잔여 도플러 주파수와 보정된 추정치 사이의 오차를 최소화하는 방향으로 학습된다.

### III. 시뮬레이션 구성 및 결과

본 논문에서는 SpaceX 문서를 기반으로 저궤도 위성의 파라미터를 설정하고, 표 1은 시뮬레이션에 사용된 파라미터를 나타낸다 [3]. 저궤도 위성 은 서울을 기준으로 Earth-fixed beam을 방사한다. UE는 서울로부터 25 km 떨어진 지점에 위치한다. 저궤도 위성은 20ms마다 SSB를 수신하고, UE는 SSB를 송신하면 PSS 기반의 상관관계 방식을 사용하여 잔여 도플러를 추정하고 보상한다. 잔여 도플러 탐색할 때, UE는 GSCN에 의해 정의된 SSB 중심 주파수 주변을 5 ppm 범위 내에서 0.5 ppm 간격으로 탐색한다. 이후, 잔여 도플러 탐색 과정에서 도출한 상관도 및 주파수 특성 파라미터들을 LSTM 모델의 입력으로 활용하여, 미세한 잔여 도플러 오차를 정밀하게 예측하고 보상한다. 최종적으로 보상된 잔여 도플러 오차가 하향 링크 반송파 주파수의 0.1 ppm 이내로 보상된 경우에는 초기 접속을 성공한 것으로 가정한다 [3].

본 논문에서는 제안된 LSTM 기반 잔류 도플러 보상 기법의 성능을 평가하기 위해 시뮬레이션을 수행하였다. 제안한 알고리즘의 실험 결과는 그림 2와 같다. 그림 2-(a)는 학습 및 검증 데이터셋에 따른 손실을 보여 준다. 약 400 에폭크를 기점으로 손실 값의 변동이 감소하며 안정적인 수렴한 결과를 보여준다. 이러한 결과는 제안한 시스템이 과적합 없이 견고한 일반화 성능을 달성했음을 시사한다.

제안된 모델의 성능을 정량적으로 평가하기 위해, 잔여 도플러를 보상하지 않는 baseline과 LSTM을 통해 보상이 이루어진 제안한 알고리즘의 예측 오차를 비교하였다. 성능 지표로는 mean absolute error (MAE), root mean square error (RMSE), 154.2 Hz 임계값 기준의 동기 획득 성

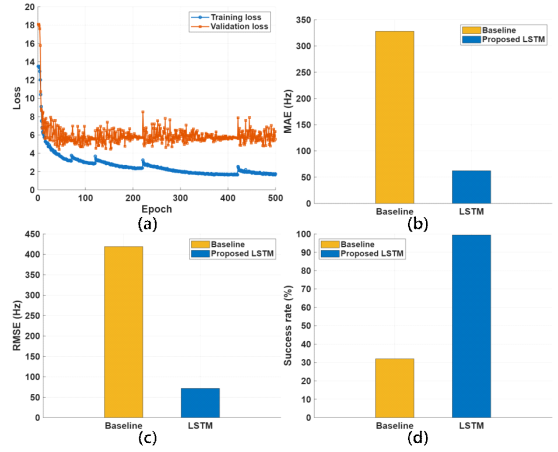


그림 2. 시뮬레이션 성능 결과: (a) 학습 및 검증 손실, (b) 평균 절대 오차, (c) 평균 제곱근 오차, (d) 잔여 도플러 보상 성공률

공률을 활용하였다. 비교 분석 결과, LSTM 모델 적용 시 MAE는 약 81.0%, RMSE는 약 82.9%의 유의미한 오차 감소율을 보였다. 특히 성공률 측면에서 베이스라인은 31.9%의 성능을 보인 반면, 제안한 LSTM 모델은 99.4%에 도달하여 초기 동기 성공률의 성능이 향상되었다. 결과적으로 제안된 모델이 복잡한 신호 패턴을 효과적으로 학습함으로써, GNSS 정보가 부재한 동적 NTN 환경에서도 초기 접속 성공률을 크게 개선할 수 있음을 확인하였다.

### IV. 결론

본 논문에서는 저궤도 위성 시스템의 초기 접속 동기화를 위한 LSTM 기반 잔류 도플러 보상 기법을 제안하였다. 저궤도 위성 시스템에 초기 접속하는 UE는 저궤도 위성의 궤도 정보를 활용하지 못하는 상태에서 잔여 도플러 편이를 처리하는 데 어려움이 있다. 이러한 한계를 극복하기 위해, 제안된 기법은 PSS 탐색 과정에서 획득한 frequency offset과 상관 메트릭을 LSTM 네트워크의 입력 특징값으로 활용하여 잔류 오차를 정밀하게 추정한다. 실험 결과, 154.2 Hz 임계값 기준의 동기 획득 성공률은 기존 baseline의 31.9%에서 제안 모델 적용 시 99.4%로 향상되었다.

### ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 SK 텔레콤 산학협력과제 (6G 확장기술: 위성 시뮬레이터 고도화 및 VSAT 실증)와 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. RS-2024-00396992, No. RS-2024-59330030).

### 참고 문헌

- [1] 3GPP TR 38.821 v16.2.0, "Solutions for NR to support non-terrestrial networks (NTN) (Release 16)," Mar. 2023.
- [2] 3GPP TS 38.101-5 v19.2.0, "User Equipment (UE) radio transmission and reception; Part 5: Satellite access Radio Frequency (RF) and performance requirements," Oct. 2025.
- [3] 3GPP TR 38.811 v15.4.0, "Study on New Radio (NR) to support non-terrestrial networks (Release 15)," Sep. 2020.