

## 6G 저궤도 위성통신에서의 높은 도플러 천이를 고려한 하향링크 동기부 설계

하승원, 조용수  
중앙대학교

leo3026@cau.ac.kr, yscho@cau.ac.kr

## Synchronization Tracking Technique for 6G LEO Communication with High Doppler Shift

Seung Won Ha and Yong Soo Cho  
Chung-Ang University

## 요 약

본 논문에서는 NTN(Non-terrestrial Network) 통신시스템에서 LEO(Low Earth Orbit)의 빠른 위성 속도에 의해 발생하는 높은 도플러를 보상할 수 있는 사전보상기(Pre-compensator)와 잔여 CFO(Carrier Frequency Offset)를 고려한 하향동기부 알고리즘을 설계한다. 기지국에서는 위성의 천문력(Ephemeris)을 활용하여 사전보상 도플러 값을 예측하여 사전보상하고, 잔여 CFO 를 고려하여 하향동기부를 설계한다. LEO 를 갖는 NTN 송수신 통신시스템 시뮬레이터를 설계하고, NTN 채널하에서 사전보상기와 하향동기 알고리즘의 성능을 분석한다.

## I. 서 론

최근 6G 후보기술 중 하나로 NTN(Non-terrestrial Network)이 통신 기술의 진화, 새로운 서비스에 대한 증가되는 수요와 지상의 네트워크로 서비스가 제공되지 않는 문제점을 보완하는 효과적인 솔루션으로 활발히 연구되고 있다. 3GPP NTN 에서는 GEO(Geostationary Earth Orbit)와 LEO(Low Earth Orbit) 위성이 주로 고려되고 있다[1]. 최근에는 부품 가격 하락, 발사 비용 저하, 상대적으로 적은 전파 지연과 경로 손실로 인하여 LEO 를 활용한 셀룰러 통신에 관심이 증가하고 있다. NTN 에서의 가장 큰 문제점 중의 하나는 LEO 의 빠른 위성 속도로 인한 도플러 시프트이다[2],[3]. LEO 위성은 7.56km/s 의 고속 이동으로 도플러 시프트가 24ppm 까지 발생할 수 있어 기존 동기화 방식으로 해결하기 어렵다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 하향링크와 상향링크에서 신호를 전송하기 전에 기지국과 UE(User Equipment)에서 각각 예상되는 LEO 이동에 의해 발생하는 도플러 천이 값을 미리 사전보상(Pre-compensation) 해주는 방식을 사용할 수 있다. 즉, 기지국에서는 위성의 천문력(Ephemeris)을 활용하여 사전보상 도플러 값을 예측하고, UE 에서는 SIB(System Information Block)을 통해 위성의 천문력과 자신의 GNSS(Global Navigation Satellite System)를 통해 사전보상 도플러 값을 예측한다. OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 통신시스템은 CFO(Carrier Frequency Offset)에 특히 민감하기 때문에 동기 초기화 및 트래킹 시에 사전보상후 잔여 CFO 를 보상해 주어야 한다. 본 논문에서는 NTN 통신시스템의 하향링크에서 LEO 에 의해 발생하는 도플러를 고려하여 위성의 천문력과 속도를 고려한 사전보상과 하향동기 기법을 개발하였다. 또한 NTN 채널하에서 하향동기 성능을 분석한다.

## II. 본 론

LEO 위성통신의 가장 큰 문제점은 고도 600 km 에서의 7.56 km/s 의 속도로 이동하는 LEO 에 의해

발생되는 큰 도플러 효과이다. 그림 1 에서 볼 수 있듯이, 반송파 주파수가 20 GHz 일 때 위성고도 단말의 위치에 따라 발생하는 도플러 시프트가 -400kHz~400kHz 로서 도플러 효과가 매우 크다는 것을 확인할 수 있다. 3GPP 국제 표준 문서에서는 천문력과 GNSS 신호를 사용하여 NTN 에서 도플러 효과를 보상할 수 있다고 기술되어 있으나 구체적인 보상 방법에 대해서는 명시하고 있지 않다[4]. NTN 도플러 효과의 보상 방법으로 사전 또는 사후 방법을 고려할 수 있는데, 사후보상 방법은 실시간 정보가 필요하며 여러가지 문제점이 있어, 사전보상 방법이 NTN 에서는 적절하다.

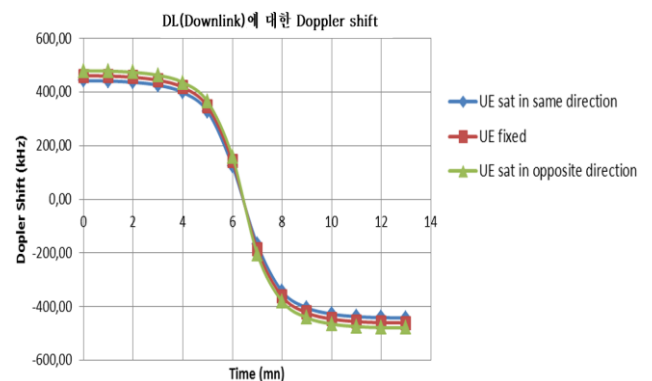


그림 1. LEO 위성통신에서의 발생하는 도플러 효과

식 (1)은 NTN 도플러 사전보상 값을 구하는 방법을 보여준다. 이 식에서  $v_{sat}$ ,  $c$ ,  $R$ ,  $h$ ,  $\alpha$ ,  $f_c$  는 위성 속도, 빛의 속도, 지구의 반지름, 고도, 고도각, 반송 주파수를 각각 나타낸다.

$$f_{comp} = \left(\frac{v_{sat}}{c}\right) \times \left(\frac{R}{R+h} \cos \alpha\right) \times f_c \quad (1)$$

그림 2 는 본 논문에서 설계한 NTN 통신시스템 하향링크 시뮬레이터를 보여준다. 이 그림에 나타난 바와

같이 Transmitter(Satellite)에서는 사전 보상(Doppler Pre-compensator)을 통해 LEO 위성의 속도로 발생하는 도플러 효과를 상쇄시켜 주며, 나머지 CFO 값은 초기(Initial) 동기를 진행하며 보상한다.

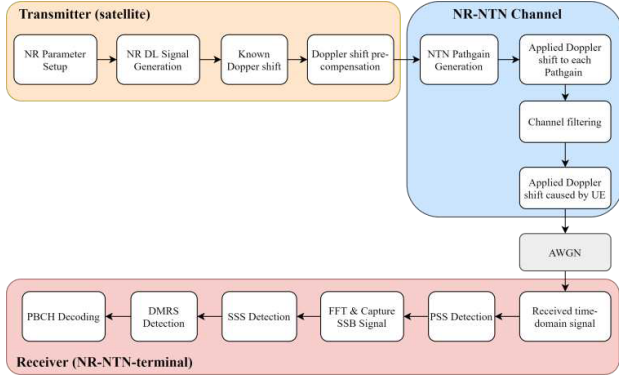


그림 2. NTN 통신시스템 하향링크 시뮬레이터

NR NTN 에서 하향동기에는 synchronization signal block(SSB)를 활용한다[2]. SSB 는 primary synchronization block (PSS), secondary synchronization block (SSS), physical broadcast channel (PBCH)로 이루어져 있다. 또한 NR NTN 은 다른 numerology 에 따라 15kHz, 30kHz, 120kHz, 240kHz 의 다른 subcarrier spacings (SCS)을 가능하게 한다. PSS correlation 을 활용하여 numerology, timing, NID2, 그리고 integer CFO 값을 찾을 수 있다.

$$R_{i,u,\epsilon}(d) = \frac{Q_{i,u,\epsilon}(d)}{P_{u,\epsilon}(d)} \quad (2)$$

$$Q_{i,u,\epsilon}(d) = \sum_{n=0}^{N_p-1} y_{u,\epsilon}(n+d)x_i^*(n) \quad (3)$$

$$P_{u,\epsilon}(d) = \sum_{n=0}^{N_p-1} |y_{u,\epsilon}(n+d)|^2 \quad (4)$$

여기서  $y_{u,\epsilon}(n)$  은 수신된 신호를  $\mu, \epsilon$  에 따라 다른 numerology 로 decimation 하고 정수 CFO 도 보상한 것이다.  $x_i(n)$  은 locally generated 된 신호이다. 식 (5)를 통해 적절한  $N_{ID}^{(2)}$ , 타이밍, numerology, 정수 CFO 를 검출한다.

$$(N_{ID}^{(2)}, \hat{d}, \hat{\mu}, \hat{\epsilon}) = \arg \max_{i,d,\mu,\epsilon} |R(d)|^2 \quad (5)$$

Fractional CFO 는 따로 추정해야 하는데 PSS 를 활용하는 방법과 CP 를 활용하는 방법 2 가지를 제안한다. 식 (6), (7)은 각각 PSS 를 활용하는 방법, CP 를 활용하는 방법이다.

$$\hat{\epsilon} = \frac{1}{\pi} \angle \left\{ \left( \sum_{i=0}^{N_{sym}/2-1} y[n+i]x^*[n+i] \right) \left( \sum_{i=N_{sym}/2}^{N_{sym}-1} y[n+i]x^*[n+i] \right) \right\} \quad (6)$$

$$\hat{\epsilon} = \frac{1}{2\pi} \angle \left\{ \sum_{i=\delta}^{N_G-1+\delta} y^*[n+i]y[n+N_{sym}+i] \right\} \quad (7)$$

CFO 보상 이후 수신된 신호는 FFT 를 하여 SSS 검출을 진행한다. SSS 검출은 주파수 도메인에서 진행되고 식 (8)을 활용한다.

$$R_c(\epsilon_r, \delta) = \frac{1}{127} \sum_{k=56}^{182} Y(k)X_c^*(k), c = N_{ID}^{(1)} \in \{0,1,2,\dots,335\} \quad (8)$$

그림 3 과 표 1 은 시뮬레이션에 활용한 파라미터들과 시뮬레이션 결과이다. PSS, CP 를 활용한 기법 각각 초기 동기를 잘 작동하는 것을 확인할 수 있다. 또한 block error rate (BLER) 성능도 -7dB 에서 1%의 성능을 달성함을 알 수 있다.

Parameters	Value
Frequency band	Ka
Carrier frequency	20 GHz
Subcarrier spacing	120kHz
Downlink reference signal	SSB
UE elevation angle	30°
UE crystal accuracy	5 ppm
Satellite altitude	600 km
Maximum doppler shift	24 ppm
Number of antennas at Tx	1
Number of antennas at Rx	2

표 1. Simulation parameter

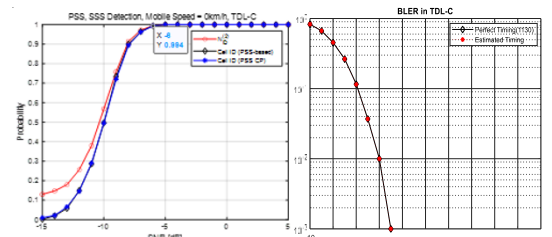


그림 3. NTN TDL-C 에서 PSS, SSS, PBCH 검출 성능

### III. 결론

본 논문에서는 NTN 통신시스템에서 LEO 에 의해 발생하는 높은 도플러를 보상할 수 있는 사전보상기와 잔여 CFO 를 고려하여 초기 하향링크 동기화 기법을 제안하였다. 또한 PSS, CP 를 활용한 CFO 추정 방식 두 가지를 제안하였다. 그리고 NTN-TDL-C 채널에서 하향링크 동기부 시뮬레이션을 진행하여 PSS, CP 를 활용한 기법의 성능 분석을 하고 장단점을 비교하였다.

### ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (2021R1A4A2001316, 2022R1F1A1064413).

### 참고 문헌

- [1] 3GPP Technical Specification Group Radio Access Network, *Solution for NR to Support Non-Terrestrial Networks(NTN)*, Document TR 38.821, Release 16, May 2021
- [2] M. Giodani, M. Zoizi, "Non-Terrestrial Networks in the 6G Era: Challenges and Opportunities," *IEEE Network*, vol. 35, no. 2, pp. 244-251, Mar. 2021
- [3] F. Rinaldi et. al., "Non-Terrestrial Networks in 5G & Beyond: A Survey," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 165178-165200, 2020
- [4] 3GPP, TR 38.821 v1.0.0, *Solutions for NR to Support Non-terrestrial Networks(NTN)*, Dec, 2019