

NTN 상향링크 랜덤엑세스 프리앰블 생성 및 검출

최수정, 조용수*
중앙대학교

crystal98923@naver.com, yscho@cau.ac.kr

Random Access Preamble Generation and Detection for Non-Terrestrial Networks

Su Jung Choi and Yong Soo Cho
Chung-Ang University

요 약

NTN(Non-terrestrial Network) 상향링크에서는 LEO(Low Earth Orbit)의 빠른 위성 속도에 의해 높은 도플러가 발생하여 기존의 PRACH 프리앰블을 사용하기 위해서는 높은 도플러를 보상할 수 있는 사전보상(Pre-compensation)이 필요하다. 본 논문에서는 NTN 시스템에서의 이에 적합한 사전보상 기법을 설명하고, 사전보상을 적용한 경우 NTN에서의 랜덤엑세스 프리앰블의 검출 성능을 확인한다.

I. 서 론

최근 5G 기술이 상용화 되면서 6G 핵심기술에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 6G 기술 중 하나인 Non-Terrestrial Network(NTN)은 위성의 매우 넓은 커버리지와 LOS 채널 환경을 장점으로 가진다[1]. 3GPP에서는 Geostationary Earth Orbit (GEO)와 Low Earth Orbit (LEO) 위성을 주로 고려하고 있는데, 상대적으로 적은 전파 지연과 경로 손실로 인하여 LEO를 사용한 셀룰러 통신에 관심이 증가하고 있다[2]. 그러나 LEO 위성은 7.56km/s의 고속 이동으로 도플러 시프트가 24ppm까지 발생할 수 있어 기존 동기화 방식으로 해결하기 어렵다[3].

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. NTN 도플러 효과의 보상 방법으로 사전 또는 사후 방법을 고려할 수 있는데, 사후보상 방법은 실시간 정보가 필요하며 여러가지 문제점이 있어, 사전보상 방법이 NTN에서는 적절하다. 기지국에서는 위성의 천문력(Ephemeris)을 활용하여 사전보상 도플러 값을 예측하고, UE에서는 SIB(System Information Block)을 통해 위성의 천문력과 자신의 GNSS(Global Navigation Satellite System)를 통해 사전보상 도플러 값을 예측한다.

본 논문에서는 UE에서 수행하는 도플러 시프트 사전보상 기법을 설명한다. 이를 위해 먼저 NTN 환경에서 사용되는 시간 및 주파수 동기화 기법과 UE에서의 사전보상 기법을 설명한다. 마지막으로, NTN 상향링크에서의 랜덤엑세스 프리앰블 기법을 설계하고 그 성능을 분석한다.

II. 본론

NTN에서는 ‘Moving beam’, ‘Fixed beam’ 두 가지의 빔 시나리오가 있다. ‘Moving beam’ 시나리오에서는 위성이 움직이면서 빔의 foot print도 움직여 도플러 시프트 값이 일정한 반면, ‘Fixed beam’ 시나리오에서는 위성의 움직임에 따라 보상해야 하는 도플러 값이 달라지게 된다. 따라서 이 경우에 UE에서 변화되는 도플러 사전 보상값을 계산할 수 있어야 한다.

UE에서 NTN 시스템에서 원활한 통신을 위해 TA(Timing Advance)는 CP(Cyclic Prefix)의 길이의 반안에는 들어와야 한다. TA는 propagation delay인 t_d 의 두배이기 때문에, t_d 의 에러는 $\pm \frac{CP}{4}$ 안에 들어와야 한다. 또한 상향링크 LLS 테이블을 참고하면, 상향링크 전송에서 주파수 에러가 $\pm 0.1ppm$ 이하가 되어야 한다. 원활한 NTN 통신을 위해 사전 보상 후 잔여하는 주파수 에러는 규격 테이블에 명시되어 있는 값의 20%인 $\pm 0.02ppm$ 를 만족해야 한다. 상향링크에서의 주파수는 $2f_{Doppler}$ 를 사용하여 사전 보상되기 때문에, $f_{Doppler}/F_c$ 는 $\pm 0.01ppm$ 를 만족해야 위의 조건을 만족할 수 있다.

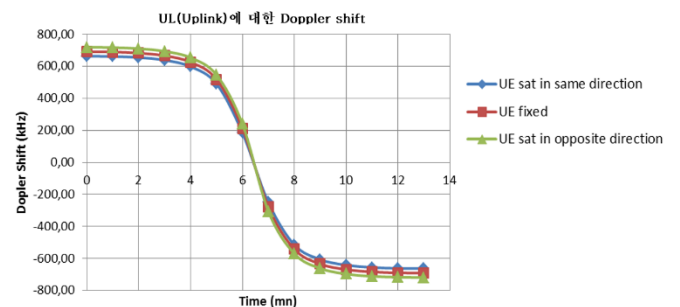


그림 1. LEO 위성의 상향링크에서 발생하는 Doppler Shift

LEO 위성통신의 가장 큰 문제점은 고도 600 km에서의 7.56 km/s의 속도로 이동하는 LEO의 빠른 속도에 의해 발생하는 큰 도플러 효과이다. 그림 1은 LEO 위성으로 Ka band 대역을 사용하였을 때 시간에 따른 위성의 움직임으로 나타나는 도플러 시프트 값을

보여준다. 이 그림에서 볼 수 있듯이, 상향링크에서 반송파 주파수가 30 GHz 일 때 위성과 단말의 위치에 따라 발생하는 도플러 시프트가 -600kHz~600kHz 로서 도플러 효과가 매우 크다는 것을 확인할 수 있다. 이는 단말기에서 사전보상을 하지 않는다면 위성의 움직임으로 인해 발생하는 도플러 시프트 영향이 매우 치명적임을 알 수 있다.

따라서, UE에서는 상향링크 전송을 위해 도플러 값 추정과 사전 보상이 필요하다. 사전 보상을 하기 위해서는 NTN SIB를 통해 위성의 천문력 정보를 받아야 하며, UE는 스스로 자신의 위치를 알아야 하기에 GNSS 정보가 필요하다. 이러한 정보를 사용하여 UE는 도플러 시프트 값을 추정하며, 사전보상을 진행한다.

$$f_{\text{Doppler,UL}} = \frac{\langle \vec{V}_{\text{Sat}}, \vec{U}_{\text{Sat-UE}} \rangle}{c \|\vec{U}_{\text{Sat-UE}}\|} f_{\text{UL,c}} \quad (1)$$

식 (1)은 UE의 GNSS와 위성의 천문력을 활용한 도플러 시프트 추정 식이다. 위성의 천문력은 두 가지 방식으로 전송될 수 있다. 위성의 궤도 파라미터를 활용하는 방법과 위치, 속도 파라미터들을 활용하는 방법이 있다. UE에서 위성의 천문력을 궤도 파라미터로 받았을 경우에는 매우 정확하게 위치를 계산할 수 있다는 장점이 있다. 하지만 결국 UE에서는 이 궤도 파라미터들을 두 번째 방법인 위치, 속도로 바꿔야 한다는 단점이 있다. 즉 위치, 속도로 바꿔야 하는 과정이 한 번 더 필요하다는 것이다. 또한 시간에 따라 궤도 파라미터는 빠르게 변하기 때문에 궤도 파라미터 정보를 빠른 주기로 보내줘야 한다는 단점이 존재한다. 반대로 두 번째 방식은 복잡도가 낮은 반면에 첫 번째 방식에 비해 낮은 성능을 보여준다.

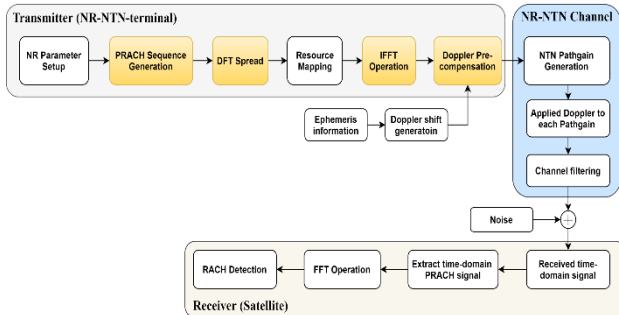


그림 2. PRACH 시뮬레이터 블록도

그림 2는 UE가 gNB에 접속하기 위해 자신의 ID를 실어서 보내는 UL preamble 전송과 수신단 검출을 포함한 PRACH 시뮬레이터의 블록도를 보여준다. 앞서 설명한 바와 같이 수신단에서 위성의 천문력과 UE의 위치 정보를 사용하여 도플러 시프트를 예측하고 사전보상을 진행하는 것을 확인할 수 있다.

$$f_{\text{comp}}(\text{Bysatellite}) = FO(f_{\text{sat}}, f_{\text{osc}}, f_{\text{UE}}) - f_{\text{sat}} - f_{\text{error}} \quad (2)$$

식(2)는 위성에서 UE에서의 crystal accuracy와 속도 등을 참고하여 발생하는 잔여 주파수 오프셋을 고려하여 시뮬레이터에서 최종 보상하는 주파수 오프셋이다. 본 시뮬레이션은 FR2에서 Configuration Index는 76인 A3 포맷의 PRACH을 사용하였다. PRACH의 길이는 139, 1151의 두 파라미터 값을 사용하였으며, $f_{\text{comp}} = 282.4\text{kHz}$, $f_{\text{sat}} = 10.74$, $f_{\text{error}} = 31.5\text{kHz}$, $f_{\text{UE}} = 13.89\text{kHz}$ 의 파라미터 값을 사용하였다. 또한 UE는 500km/h의 속도를 가지고 있다고 가정하였으며, 잔여 주파수 오프셋은 3GPP에서 정의한 도플러 시프트 값인 1.95ppm으로 가정하였다.

아래의 그림 3은 PRACH 길이에 따른 PRACH 검출 성능을 나타낸 결과이다. 그림 3의 위 그림은 139, 아래

그림은 1151의 길이를 갖는 경우를 나타낸다. 두 경우 모두 약 -22dB에서 99% 이상의 검출율을 가지는 것을 확인할 수 있다.

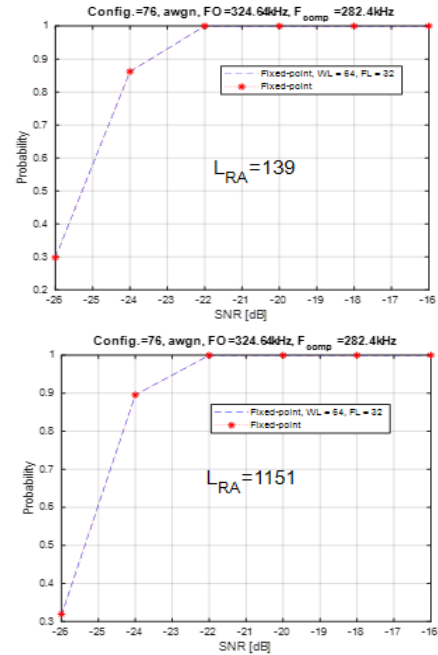


그림 3. AWGN 채널에서의 PRACH 검출 성능 (LRA=139,1151)

III. 결론

본 논문에서는 높은 도플러 천이가 있는 LEO 위성 환경에서의 상향링크 PRACH 프리앰블의 생성 및 검출 방식을 기술하였다. NTN 시스템에서 필요로 하는 타이밍 및 주파수 동기 요구사항과 위성 천문력의 방식, 도플러의 사전보상을 기술하였다. 제안된 사전 보상과 검출 기법의 성능을 분석하기 위하여 전형적인 파라미터들을 사용하여 PRACH 시뮬레이터를 설계하였고, PRACH 길이에 따른 검출 성능을 확인하였다. LEO 위성의 빠른 속도와 crystal accuracy 등으로 인해 발생하는 매우 높은 도플러 시프트를 사전 보상하여 그 영향을 줄임으로써 수신단에서 검출 성능의 열화가 발생하지 않음을 확인하였다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2021년도 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