

3GPP NR NTN 기반 저궤도 위성통신 환경에서 타이밍 이중 보정 현상이 상향링크 성능에 미치는 영향

노영채¹, 노석현¹, 김민규¹, 김정창¹, 김판수², 이재영²
국립한국해양대학교¹, 한국전자통신연구원²

dudco3050@g.kmou.ac.kr, badeko8065@g.kmou.ac.kr, kimmimgyu01@g.kmou.ac.kr,
jchkim@kmou.ac.kr, pskim@etri.re.kr, jaeyl@etri.re.kr

Effect of Double Correction on Uplink Performance in 3GPP NR NTN-Based LEO Satellite Communications

Yeongchae Noh, Seokhyeon No, Min-gyu Kim, and Jeongchang Kim

National Korea Maritime and Ocean University (KMOU)

Pansoo Kim and Jae-young Lee

Satellite Comm. Research Division, Electronics and Telecommunications Research Institute

요약

3GPP NR NTN(Non Terrestrial Network)에서는 Open-loop 와 Closed-loop 제어를 함께 사용하여 위성과 단말 간의 전파 지연에 의한 타이밍 오차와 단말의 GNSS 오차에 의한 타이밍 오차를 동시에 보상할 경우 타이밍 이중 보정 현상이 발생한다. 본 논문에서는 전산 실험을 통하여 LEO(Low Earth Orbit) 환경에서 타이밍 이중 보정 현상이 상향링크 PUSCH(Physical Uplink Shared Channel)의 블록 오류율 성능에 미치는 영향을 확인한다.

I. 서론

3GPP (3rd Generation Partnership Project)는 5G NR 을 위성 기반 NTN (non-terrestrial network)으로 확장하며 정밀한 시간 동기화를 위해 단말이 GNSS (Global Navigation Satellite System) 및 위성 궤도 정보를 이용해 타이밍을 예측하여 보정하는 Open-loop 제어와 기지국이 실제 수신지연을 기반으로 타이밍 보정 명령을 하달하는 Closed-loop 제어를 혼합해 사용하는 기법을 도입하였다[1]. 그러나 두 루프가 동일한 전파 지연을 중복으로 보정하게 되면, 오히려 타이밍 오차를 더 크게 유발하는 타이밍 이중 보정 (Double Correction) 현상이 발생할 수 있으며[2][3], 이는 상향링크 성능에 부정적 영향을 미칠 수 있다. 본 논문에서는 LEO (Low Earth Orbit) NTN 환경에서 GNSS Fix 에 의한 타이밍 이중 보정 현상을 모델링한다. 또한 전산 시뮬레이션을 통해 상향링크 PUSCH 블록 오류율(block error rate, BLER) 성능 평가를 수행하여 이중 보정 현상이 상향링크 성능에 미치는 영향을 확인한다.

II. 본론

NTN 환경에서의 상향링크 전파경로는 사용자 단말(User Equipment, UE)과 위성 간의 전파 경로인 Service link 와 위성과 기지국 간의 전파 경로인 Feeder link 로 이루어져 있다. 3GPP 5G NR NTN 표준에서는 상향링크 타이밍 동기화를 위해 Open-loop 제어와 Closed-loop 제어를 혼합해 수식 (1)과 같이 UE 가 상향링크 전송 시에 선보상해야 하는 timing advance(TA) 값인 T_{TA} 를 계산한다[2].

$$T_{TA} = (N_{TA} + N_{TA,offset}) \times T_c + (T_{TA,common} + T_{TA,UE-specific}) \quad (1)$$

Open-loop TA 는 전파 지연에 의한 타이밍 애러를 선보상한다. 네트워크를 통해서 하달되는 SIB19 (System Information Block 19) 내의 common TA 파라미터들을 이용해 $T_{TA,common}$ 을 계산하여 Feeder link 의 전파 지연을 보상하며, SIB19 내의 위성 궤도 정보와 UE 의 GNSS 위치 정보를 이용해 $T_{TA,UE-specific}$ 를 계산하여 Service link 의 전파 지연을 보상한다. Closed-loop TA는 5G NR 의 지상 네트워크에서도 사용되는 개념이며 수신 신호를 기준으로 측정된 실제 지연 값을 이용해 오차를 줄이는 방식으로 동작한다. Open-loop TA 계산 시에 특정 시간 간격으로 업데이트되는 UE 의 GNSS 좌표를 사용하는데, UE 의 움직임으로 인해 TA 계산에 사용하는 GNSS 좌표와 실제 UE 의 GNSS 좌표 간에 오차가 발생하며 이는 Open-loop TA 에 오차를 유발한다. 이러한 오차를 Closed-loop TA 로 보상하게 된다. 하지만 UE 의 GNSS 좌표를 업데이트하는 GNSS Fix 시점에는 업데이트된 UE 의 GNSS 좌표를 이용해 보다 정확한 Open-loop TA 를 사용하여 오차를 줄이게 되지만, GNSS Fix 이전부터 적용되던 Closed-loop TA 가 추가로 이를 보정하게 되어 이중 보정 현상이 발생하게 된다. 이와 같이 각각의 TA 가 동일한 전파 지연을 중복으로 보상하게 되는 경우에 오히려 더 큰 타이밍 오차를 유발하는 이중 보정 현상이 발생하게 되며, 상향링크 성능을 열화시킨다[2][3].

본 논문에서는 이중 보정 현상을 모델링하고 이를 적용한 PUSCH 전산 시뮬레이터를 통하여 BLER 성능을 확인한다. 이중 보정 현상 모델링에 대한 가정은 다음과 같다. UE 는 지표면 위에 위치하며 위성은 UE 의 수직 상공 600km 고도에 위치한다. UE 와 위성은 동일한 진행

방향으로 원궤도로 등속 원 운동하며 UE의 속도는 30m/s, 위성의 속도는 7562km/s이다. 상향링크 전송 주기는 10ms이며 UE의 GNSS Fix 주기는 5초, Closed-loop TA의 갱신 주기는 1초이다[3]. Feeder link 자연은 UE의 GNSS에 영향을 받지 않기 때문에 본 논문에서는 고려하지 않는다. 위와 같이 모델링한 Open-loop TA의 타이밍 에러, Closed-loop TA 값, 그리고 전체 타이밍 에러는 그림 1과 같다.

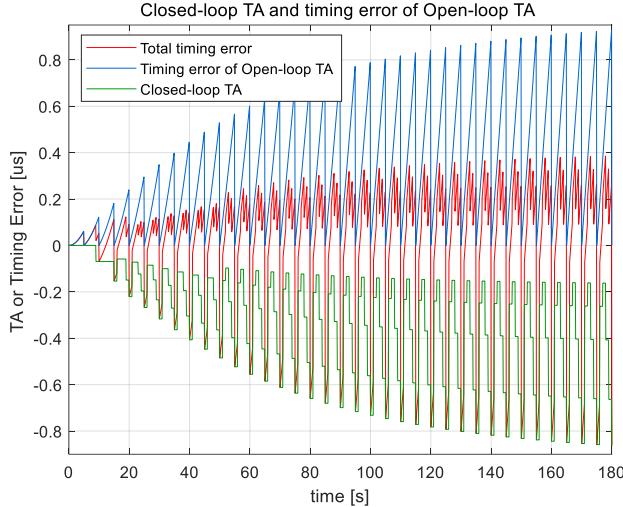


그림 1. Double correction 발생 시 타이밍 에러

Open-loop TA의 갱신 후 시간이 지남에 따라 Open-loop TA의 타이밍 오차는 증가하며 closed-loop TA가 이를 보정하고 있는 것을 확인할 수 있다. 그러나, 5초 주기의 GNSS Fix가 이루어지는 순간 Open-loop TA와 closed-loop TA의 보정이 동시에 이루어지므로 전체 타이밍 오차가 크게 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이중 보정 현상에 따른 상향링크 성능을 확인하기 위한 PUSCH 전송 시뮬레이터의 구조는 그림 2와 같으며 사용한 PUSCH 파라미터는 표 1과 같다.

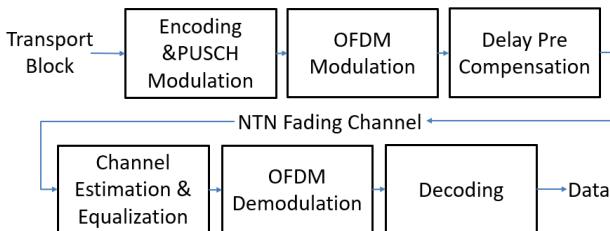


그림 2. PUSCH 전송 시뮬레이터 구조

표 1. PUSCH 시뮬레이션 파라미터

Parameter Name	Value
Center Frequency	30 GHz
Subcarrier Spacing	60 kHz
Number of Resource Block	66
FFT Size	1024
Sample Rate	61.44 Msps
Modulation Order	QPSK
Delay Profile	NTN-TDL-C
Delay Spread	30 ns
Code Rate	1/3

시뮬레이션은 UE의 수직 상공 600km 고도에 위성이 있을 때를 시작으로 하여 180초 동안 수행한다. 이중 보정 현상에 따른 성능과 함께 이중 보정 현상을 피하기 위한 방안을 적용한 경우의 성능을 비교한다. 이중 보정 현상을 피하기 위한 방식으로 GNSS Fix 시에 Closed-

loop TA를 초기화하거나, GNSS Fix를 수행하지 않고 최초 GNSS 좌표를 계속 사용하는 방식을 적용한다[4]. 시뮬레이션의 결과인 PUSCH BLER 성능은 그림 3과 같다. 이중 보정 현상이 발생하는 경우 비교적 큰 타이밍의 advance로 인해 성능 열화가 발생함을 알 수 있다. 이중 보정 현상을 피하기 위한 방식을 적용하여 이중 보정 현상에 따른 성능 열화를 완화할 수 있음을 알 수 있다. 또한, GNSS Fix 시점에 Closed-loop TA를 초기화하는 방식이 최초의 UE GNSS 좌표를 계속 사용하는 경우보다 근소한 성능 우위를 보인다.

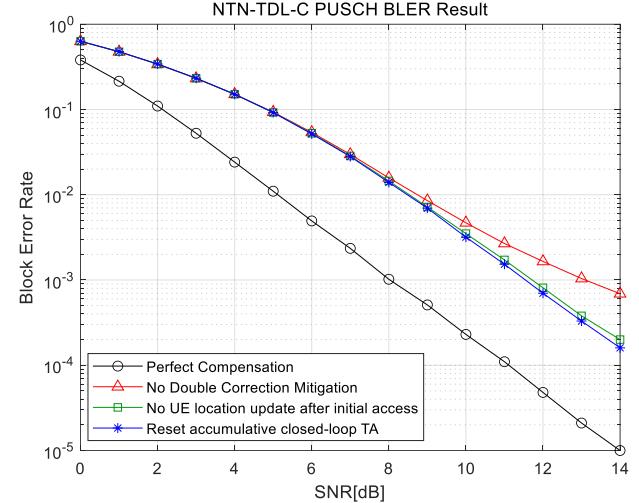


그림 3. PUSCH 전송 시뮬레이션 BLER 성능

III. 결론

본 논문에서는 NTN 환경에서 Open-loop 와 Closed-loop 제어를 동시에 적용하는 방식을 사용할 경우 GNSS Fix에 따른 이중 보정 현상을 모델링한 시뮬레이션을 통해 PUSCH BLER 성능을 평가하였다. 이중 보정 현상이 발생한 경우 큰 타이밍 오차로 인해 성능이 열화됨을 확인하였다. GNSS Fix 시점에 Closed-loop TA를 초기화하거나 GNSS Fix를 수행하지 않고 최초 GNSS 좌표를 계속 사용하는 방식을 사용함으로써 성능 열화를 극복할 수 있으나 여전히 성능 개선의 여지가 많이 남아 있음을 알 수 있다. 향후 3GPP NR NTN 표준에서 사용되는 이중 보정 완화 기법인 Slew rate control 방식을 적용하여 PUSCH BLER 성능을 평가하고 이중 보정에 의한 성능 열화를 더욱 완화할 수 있는 새로운 방법을 연구할 계획이다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 정보통신·방송 연구 개발 사업의 일환으로 하였음. [RS-2024-00348050, 3GPP 표준기반 저궤도 위성통신 단말 핵심기술 개발]

참고 문헌

- [1] 3GPP TR 38.821, Solutions for NR to Non-Terrestrial Networks (NTN), V16.2.0, Mar. 2023.
- [2] Qualcomm Inc., Timing requirements, R4-2203856, 3GPP RAN4 #102-e Electronic Meeting, Mar 2022
- [3] Qualcomm Inc., UL Time and Frequency Synchronization for NTN, R1-2107342, 3GPP RAN1 #106e-Meeting, Aug. 2021
- [4] Ma, L. Uplink Time Synchronization for Non-Terrestrial Networks. IEEE Communications Magazine, 61(7), 114–118. 2023