

5G NR NTN 기반 저궤도 위성통신에서 Timing Advance 과보상 상황 시 PRACH 탐지 성능에 관한 연구

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

kimmingyu01@g.kmou.ac.kr, dudco3050@g.kmou.ac.kr, badeko8065@g.kmou.ac.kr,
jchkim@kmou.ac.kr, paskim@etri.re.kr, jaeyl@etri.re.kr

A Study on PRACH Detection under Timing Advance Overcompensation in 5G NR NTN LEO Satellite Communications

Min-gyu Kim, Yeongchae Noh, Seokhyeon No 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

요 약

3GPP 5G NR NTN(Non-Terrestrial Network) 기반 저궤도 위성통신 환경에서는 위성과 사용자 단말(User Equipment, UE) 간 거리가 가까워질 때 발생하는 TA(Timing Advance) 과보상 상황이 발생할 수 있으며, 이에 따라 PRACH 탐지 과정에서 오경보가 발생할 수 있다. 본 논문에서는 TA 과보상 상황에서 PRACH 탐지 방식별 TA 과보상 상황에서의 탐지 성능을 평가한다.

I. 서론

3GPP는 Release 17부터 저궤도 위성 Low Earth Orbit, LEO)을 포함한 비지상 네트워크(Non-Terrestrial Network, NTN) 통신 규격을 표준에 추가하였다[1]. 이에 따라 위성 통신 기술은 지상 통신망이 미치지 못하는 지역에서의 서비스 확장과 글로벌 커버리지를 제공할 수 있는 핵심 기술로 주목받고 있다[2]. 그러나 저궤도 위성 환경에서는 위성과 사용자 단말 (User Equipment, UE) 간의 상대적 이동에 따라 전파 지연이 동적으로 변화하며, 이에 따라 Timing Advance(TA) 보정 과정에서 부족 보상 및 과보상 문제가 발생할 수 있다. 특히, 위성이 UE에 접근하는 경우 실제 전파 지연보다 더 큰 TA가 적용될 경우 과보상으로 인하여 PRACH(Physical Random Access Channel) 탐지 성능이 크게 저하될 수 있다. 본 논문에서는 이러한 TA 과보상 상황을 모델링하고 다양한 PRACH 탐지 방식에 대해 탐지(detection) 및 오경보(false alarm) 확률을 평가함으로써 저궤도 위성 기반 5G NR NTN 환경에서의 PRACH 검출 성능을 분석한다.

II. 본론

NTN 통신 환경에서 전파 지연은 기지국과 위성 간의 Feeder Link 지연 및 UE와 위성 간의 Service Link 지연으로 구분된다[3]. 이러한 지연을 보상하기 위해 기지국은 하향링크를 통해 System Information Block 19 (SIB19)를 전송하여 TA 관련 파라미터와 위성 궤도 정보를 UE에 주기적으로 제공한다. UE는 이를 활용하여, 선 보상을 TA 값을 산출하고 상향링크 신호를 전송할 때 선 보상을 수행한다[4]. 그러나 위성이 고속으로 이동하는 동안 UE가 새로운 SIB19 갱신 전까지는 이전 정보를 사용할 수밖에 없으며, 이는 실제 전파 지연과 선 보상을 위해 계산되는 TA 값 사이의 오차를 유발해

결과적으로 상향링크 타이밍 오차로 이어질 수 있다. 수신기에서 PRACH 검출을 위하여 윈도우 기반 검출 방식을 사용할 수 있다. 이 방식은 주파수 영역 수신 신호에 preamble로 사용되는 Zadoff-Chu(ZC) 시퀀스를 곱한 후 시간영역 신호로 변환하여 얻은 Power Delay Profile(PDP)에 대해 PRACH 생성 시 사용되는 Cyclic Shift(CS) 단위로 windowing을 적용하고, PDP에서 최댓값을 갖는 윈도우를 찾아 주어진 임계값을 초과하는 경우 해당하는 preamble이 존재하는 것으로 판정한다. 또한, 해당 윈도우 내부에서 최대 피크가 위치한 샘플 인덱스를 사용하여 타이밍 오차를 계산한다. 하지만 위성이 UE에 접근할 때, 실제 전파 지연보다 선 보상을 TA 값이 더 커져서 TA 과보상이 발생할 수 있다. 이 경우 계산된 PDP의 피크가 원래 속해야 할 윈도우 경계 밖으로 이동하여 수신기는 잘못된 CS를 선택하게 되어 오경보 가능성이 증가한다. 따라서 CS 결정 구간 설정에 따라 NTN 환경에서의 PRACH 검출 성능이 크게 달라질 수 있다. 본 논문에서는 선행 연구에서 사용한 MATLAB 기반 PRACH 송수신 시뮬레이터를 활용하여 최초 SIB19 업데이트 이후 다음 업데이트 주기에 도달하기 전에 위성이 UE로 가까워지는 상황에서의 CS 결정 구간 설정 방법에 따른 PRACH 검출 및 오경보 확률 성능을 비교한다[5]. 시뮬레이터에서 사용한 PRACH 송수신 파라미터는 표 1과 같으며 이러한 파라미터를 바탕으로 그림 1과 같이 CS 결정 구간을 설정하였다[1]. 본 시뮬레이션은 SIB19 업데이트 이후 그 다음 업데이트 전까지 누적되는 전파 지연에 따른 영향을 비교하기 위한 것으로서 전파 지연을 제외한 페이딩은 고려하지 않았다. 또한, 전파 지연은 최초 SIB19 업데이트 시점에 완벽하게 보상되었고 가정하며, 시간이 지남에 따라 전파 지연이 누적된다.

표 1. PRACH 송수신 시뮬레이션 파라미터 설정

PARAMETER NAME	VALUE
PRACH Format	B4
Zero Correlation Zone	15
Root sequence index	1
Root sequence Length	139
Subcarrier Spacing	120kHz
FFT size	4096

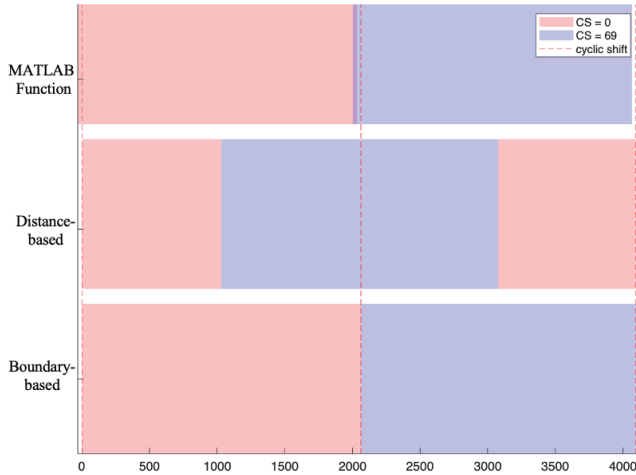


그림 1. Cyclic Shift 결정 구간

MATLAB에서 제공하는 PRACH 검출 함수는 CS 값인 N_{cs} 를 기준으로 구간을 설정하고 인접 구간 사이에 겹치는 영역인 dead zone을 두어 경계 부근에서 발생하는 불확실한 피크를 무시한다. 또한, dead zone 크기만큼 advance delay를 허용하여 신호가 원래의 타이밍보다 advance되어 수신되는 상황을 고려하였다. 그러나 주어진 dead zone으로도 커버할 수 없을 정도로 과보상 값이 커지는 경우 검출 성능 열화가 발생할 수 있다. 본 논문에서는 dead zone을 사용하지 않는 거리와 경계 기반의 CS 결정 구간 설정 방식을 제시하고 성능을 비교한다. 먼저 거리 기반(Distance-based) 방식은 PDP 피크와 인접 CS 경계 간 거리를 계산하여 더 가까운 CS를 선택하는 방식이다. 이 경우 인접 CS와의 중간 지점이 윈도우의 경계가 된다. 두 번째로 경계 기반(Boundary-based) 방식은 각 CS 값을 윈도우의 경계로 설정하여 PDP 피크가 속하는 영역을 판정한다.

그림 2는 위성이 UE에 접근하는 상황에서 SIB19 업데이트 이후 업데이트 주기에 도달하기 전에 각 CS 결정 구간 설정 방법별 PRACH 검출 및 오경보 확률 성능을 나타낸다. 거리 기반 방식은 $SNR = -14dB$ 이상에서 99% 이상의 검출 확률을 보였으며, 오경보는 발생하지 않았다. 반면 MATLAB에서 제공하는 함수를 사용했을 때, 동일한 조건에서 31% 검출 확률과 68%의 오경보율을 보였고, 경계 기반 방식은 3%의 검출 확률과 97%의 오경보율이 나타났다. 이러한 성능 차이는 CS 결정 구간 설정 방식의 차이에서 비롯된다. 거리 기반 방식은 advance delay를 고려하여 일정 범위 내의 TA 과보상 상황에서도 효과적으로 PRACH 탐지가 가능하다. 반면, MATLAB에서 제공하는 함수는 dead zone 크기만큼만 advanced delay를 허용하기 때문에 그 범위를 초과하는 과보상 신호는 검출하지 못한다. 또한, 경계 기반 방식은 advance delay에 대한 고려가 전혀 없이 단순히 구간을 분할하는 구조이기 때문에 TA 과보상 상황에서 효과적인 PRACH 탐지가 어렵다.

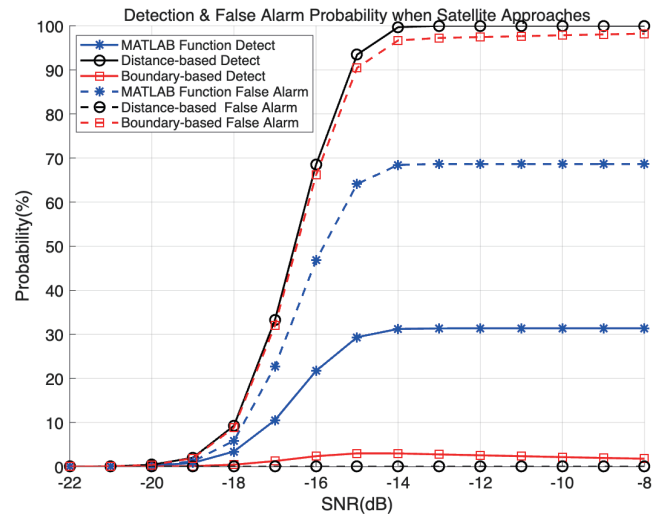


그림 2. CS 결정 구간 설정 방법별 탐지 및 오경보 확률 성능

III. 결 론

본 논문에서는 5G NR 기반 저궤도 위성통신 환경에서 TA 과보상 상황을 고려하여, 서로 다른 CS 결정 구간 설정 방법에 따른 PRACH 검출 및 오경보 확률 성능을 비교하였다. 시뮬레이션 결과, 커버 가능한 advance delay가 가장 넓은 거리 기반 방식이 가장 우수한 성능을 보였으며 TA 과보상 상황에서 CS 결정 구간 설정 방법에 따라 성능 차이가 크게 발생함을 확인하였다. 이러한 결과는 CS 결정 구간이 TA 과보상 환경에서 PRACH 탐지 결과에 영향을 준다는 것을 보여준다. 향후 연구에서는 위성의 위치와 이동 방향에 따라 CS 결정 구간을 능동적으로 조정하는 기법을 적용하고, 이에 따라 PRACH 검출 성능을 평가할 예정이다.

ACKNOWLEDGMENT

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

참 고 문 헌

- [1] 3GPP TS 38.211, "NR; Physical channels and modulation," TS 38.211, v17.2.0, Dec. 2022.
- [2] 김판수, 유준규, & 변우진. (2020). Research Trends in Global Wireless Communication Technology Based on the LEO Satellite Communication Network. Electronics and Telecommunications Trends, 35 (5), 83- 91.
- [3] Liu, W. (2022, Jun). Uplink Time Synchronization Method and Procedure in Release-17 NR NTN. 2022 IEEE 95th Vehicular Technology Conference
- [4] 3GPP TS 38.331, "NR; Radio Resource Control (RRC); Protocol specification (Release 17)," v17.10.0, Oct. 2024
- [5] 노영채, 노석현, 김민규, 김정창, 김판수, 이재영. (2025-02-05). 5G NR NTN 기반 저궤도 위성통신 환경에서의 상향링크 PRACH 검출 성능에 대한 연구. 한국통신학회 학술대회논문집, 강원.