

높은 도플러를 갖는 저궤도 위성통신을 위한 랜덤엑세스 프리앰블 설계 기법

김영준, 최수정, 조용수*
중앙대학교

yjkim81@gmail.com, crystal98923@naver.com, yscho@cau.ac.kr

Random Access Preamble Design Technique for LEO Satellite Communication with High Doppler

Yeong Jun Kim, Su Jung Choi, Yong Soo Cho
Chung-Ang University

요 약

6G 이동통신 시스템에서는 Non-Terrestrial Network(NTN)를 활용하여 넓은 통신 커버리지를 확보할 예정이다. 본 논문에서는 NTN 기반 셀룰러 통신시스템에서 적은 전파 지연과 경로 손실로 주로 고려되고 있는 Low Earth Orbit (LEO)의 높은 도플러 천이를 고려한 랜덤엑세스 프리앰블 설계 기법을 제안한다. 모의 실험을 통하여 기존의 프리앰블 설계 기법과 성능을 비교하고, NTN 채널 환경에서 제안된 기법의 성능을 확인한다.

I. 서 론

최근 5G 기술이 상용화 되면서 6G 핵심기술에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. Non-Terrestrial Network(NTN)은 위성의 넓은 커버리지와 LOS 채널 환경을 갖는 장점으로 6G 핵심 기술로 최근 활발히 연구되고 있다[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 기존의 통신망과 다른 NTN 채널 환경에서 발생하는 긴 전파지연으로 인해 현재의 셀룰러 통신시스템의 표준에 수정이 이루어지고 있다. 특히 LEO의 빠른 위성 속도로 인해 지상 네트워크에 비해 매우 높은 도플러 천이가 발생하게 되어 사전 보상이 없는 경우에는 기존의 랜덤엑세스 프리앰블 방식을 그대로 사용하기에는 어려움이 있다[3].

본 논문에서는 기존의 랜덤엑세스 프리앰블로 널리 사용되는 Zadoff-Chu 시퀀스와 도플러에 강점이 있는 Linear Frequency Modulation(LFM) 파형을 변형하여 높은 도플러 천이에도 사용할 수 있는 프리앰블 기법을 제안한다. 또한, 이를 바탕으로 성능을 개선할 수 있는 프리앰블 설계기법을 제안한다. 마지막으로, 모의 실험을 통하여 제안된 프리앰블의 성능을 기존의 프리앰블과 비교하고, NTN 채널 환경에서 제안된 프리앰블의 성능을 확인한다.

II. 본 론

본 논문에서는 두 가지의 새로운 랜덤엑세스 프리앰블 기법을 제안한다. 두 새로운 시퀀스는 기존의 ZC 시퀀스에서 파생된 $[-N/2]$ 에서 $[N/2]$ 까지 0을 제외한 유리수인 root 인덱스를 가진 시퀀스로, short sequence의 합으로 구성되어 있다. 각 short sequence는 다음의 식으로 주어진다.

$$x_{r,m}(n) = e^{-j2\pi\rho_r(v_m+n)^2/N_r} \quad (1)$$

여기서 $r, m, n, \rho_r, N_r, v_m$ 은 각각 root 인덱스, short sequence의 인덱스, 시퀀스의 샘플 인덱스, $N_r/(N/r)$, $\lfloor N/r \rfloor \cdot \text{round}(m(N/r))$ 를 나타낸다.

여기서, 각 short sequence 사이에 간격 없이 이어지는 시퀀스를 'Proposed Sequence 1 (PS1)', short sequence 사이에 간격이 각 Cell ID 마다 다르게 주어지는 시퀀스를 'Proposed Sequence 2 (PS2)'라고 정의한다.

기존의 시스템에서 사용하는 프리앰블 시퀀스와는 다르게 PS1은 기존의 sequence를 여러 개의 short sequence를 결합(combining)하는 과정에서 도플러 효과가 감소하게 된다. 여기서 short sequence를 결합하는 과정은 도플러 천이로 인한 phase rotation 효과를 최소화하기 위하여 non-coherent 방식으로 진행된다. 그러나 PS1의 경우 수신단에서 correlation 연산을 진행하는 과정에서 각 subsequence의 correlation이 모두 더해지게 되면서 sidelobe의 크기가 커지게 된다. 이를 극복하기 위하여 제안한 프리앰블 시퀀스가 PS2이다.

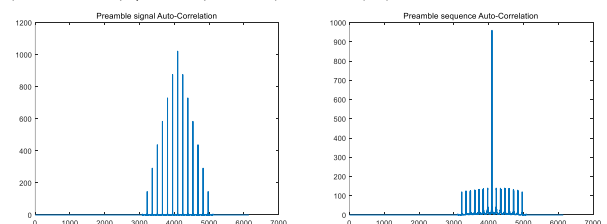


그림 1. PS1과 PS2의 자기상관함수

그림 1은 각각 PS1, PS2의 자기상관함수를 보여준다. 시퀀스의 총 길이가 1024이고 Cell ID가 8개 일 때,

PS1 은 root index 가 4 에서 11 까지이고, PS2 는 root index 가 8 일 때의 경우를 보여준다. 그림 1 좌측의 PS1 과는 다르게 우측의 PS2 의 sidelobe 는 현저히 작은 것을 알 수 있다. 따라서 PS2 는 잡음이 큰 환경에서 sidelobe 로 인한 간섭이 줄어들게 된다. PS1 과 PS2 의 자기상관 특성이 다른 것은 subsequence 사이의 timing offset 의 유무 차이이다. PS1 의 경우 각 subsequence 들이 바로 이어져 간격이 없는 반면에, PS2 의 경우 subsequence 의 간격에 차이를 두어 중첩을 피해 sidelobe 의 크기가 증가하는 것을 방지한다.

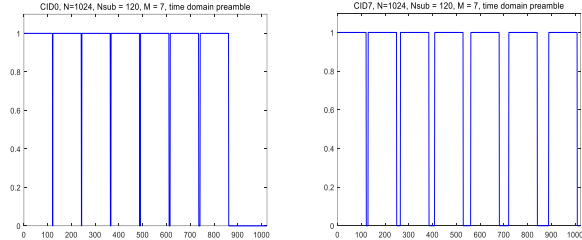


그림 2. PS2 의 시간영역 프리앰블 신호

그림 2 는 시간 영역에서 PS2 의 프리앰블 신호를 보여준다. 8 개의 Cell ID 상황에서 좌측은 첫번째 cell, 우측은 마지막 8 번째 cell 의 preamble 신호를 나타낸 것으로, subsequence 개수는 7 개로 설정하였다. 이 그림에 나타난 바와 같이 PS2 는 각 Cell ID 마다 subsequence 간의 간격이 달라지고, 한 프리앰블 시퀀스 안에서 간격이 증가하도록 설계하였다. 이와 같이 PS2 는 subsequence 간 timing offset 을 선형적으로 증가시켜 성능을 높인다.

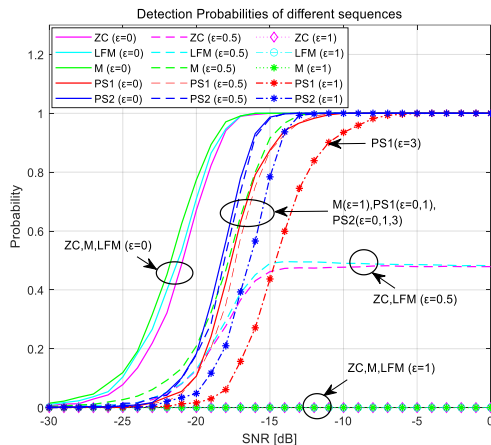


그림 3. 여러 프리앰블 시퀀스들의 검출 성능 비교

그림 3 은 본 논문에서 제안된 두 가지의 시퀀스를 기존의 4G/5G 에서 사용되는 여러 시퀀스들과 비교한 모의 실험 결과를 보여준다. 기존의 방식으로는 Zadoff-Chu(ZC), LFM, M sequence 를 사용하였고 AWGN 환경에서 모의실험 하였다. Cell ID 는 3 개로 설정하고, normalized CFO 값은 변경하면서 검출 성능을 측정하였으며, 성능은 Cell ID 와 peak timing 가 모두 올바르게 검출되는 검출 확률을 나타낸다. ZC 와 LFM 은 CFO 가 0.5 만 되더라도 검출 성능이 50%를 넘지 못하고 더 증가하면 검출이 불가능하며, M sequence 또한 CFO 가 1 일 때 검출이 불가능하다. 그러나 PS1 와 PS2 는 CFO 가 3 일 경우에도 검출 성능이 우수하다는 것을 확인할 수 있다. 또한 PS2 의 경우, CFO 가 증가하여도 열화되는 정도가 작기 때문에 다른 시퀀스들보다 높은 도플러 환경에 적합하다는 것을 알 수 있다.

그림 4 는 실제 NTN 채널 환경에서 제안된 프리앰블 설계 기법의 성능을 확인하기 위하여 3GPP TR 38.811 에 주어진 NTN-TDL-C, TDL-A 채널에서의 검출 성능을 보여준다. TDL-C 는 LOS 가 존재하는 채널로 AWGN 채널과 유사하여 큰 성능 저하 없이 잘 검출되지만, NLOS 채널인 TDL-A 의 경우 채널환경이 좋지 않아 두 시퀀스 모두 성능이 전체적으로 열화된다. PS1 의 경우 성능이 크게 열화되는 반면에 PS2 는 성능 열화가 적다.

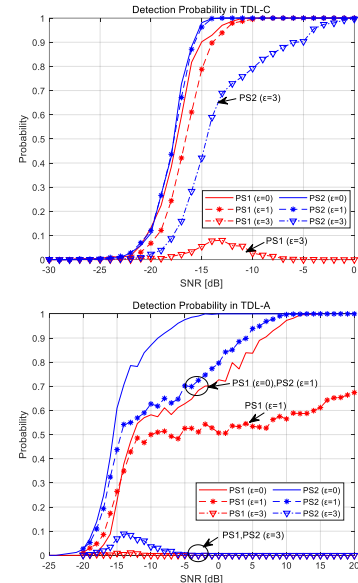


그림 4. NTN 채널 환경에서의 검출 성능 (TDL-C/TDL-A 채널)

III. 결론

본 논문에서는 높은 도플러 천이가 있는 NTN LEO 위성 환경에서 적용될 수 있는 랜덤액세스 프리앰블 기법을 제안하고 설계하였다. 제안된 기법은 기존의 프리앰블로 자주 사용되는 Zadoff-Chu sequence 를 기반으로 subsequence 를 이용하여 도플러 천이에 강한 프리앰블을 설계하였다. 또한 상관관계의 특성을 향상시키기 위하여 subsequence 간의 timing offset 을 고려하여 설계하였다. 모의실험을 통하여 여러 시퀀스들의 성능을 비교하였으며, PS2 가 높은 도플러 천이에도 높은 검출 능력을 갖는 것을 확인하였다.

ACKNOWLEDGMENT

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

참고 문헌

- [1] F. Rinaldi et. al., "Non-Terrestrial Networks in 5G & Beyond: A Survey," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 165178-165200, 2020
- [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] 3GPP Technical Specification Group Radio Access Network: *Solution for NR to Support Non-Terrestrial Networks(NTN)*, Document TR 38.821, Release 16, May 2021