

5G 비지상 네트워크에서 LEO 위성을 이용한 사용자 측위 기법

이예림, 염정선, 김중빈*, 정방철

충남대학교 전자공학과, †한국전자통신연구원

e-mail : yyy0587@o.cnu.ac.kr, jsyeom@cnu.ac.kr, jbkim777@etri.re.kr, bcjung@cnu.ac.kr

Wireless Positioning Technique with a Single LEO Satellite for 5G Non-Terrestrial Networks

Ye-Rim Lee, Jeong Seon Yeom, Jung-Bin Kim*, and Bang Chul Jung
Department of Electronics Engineering, Chungnam National University,
†Electronics and Telecommunications Research Institute

Abstract

In this paper, we simulate OTDOA (Observed Time Difference of Arrival) positioning technique with a single LEO (Low-Earth Orbit) satellite for 5G non-terrestrial networks. OTDOA using a single LEO satellite is one of the candidate techniques for 3GPP user positioning. A single LEO transmits multiple PRSs (Positioning Reference Signals) periodically for terrestrial users. For all PRS combinations, RSTD (Reference Signal Time Difference) is obtained by calculating the time difference of the correlation peak point at user. The equations of hyperboloid of two sheets are derived from the RSTDs for 3D OTDOA. Using the parallel hierarchical grid searching algorithm, we can determine user's location as a point with the minimum mean squared error.

I. 서론

현재 3GPP (The Third Generation Partnership Project)에서 고려하는 5세대 (Fifth Generation, 5G) 이동통신의 주요 목표 중 하나는 비지상 네트워크 (Non-Terrestrial Networks, NTN) 통신을 지원하는 것이다. NTN은 5G에서 요구하는 서비스 연속성 및 확장성, 가용성을 만족할 수 있는 이점을 가지고 있다^[1]. 이러한 서비스를 제공하기 위해서는 추가적으로 사용자의 위치를 확인하는 것이 중요하며 미국의 애플사에서 지원하는 위성을 이용한 사용자 위치 확인과 같이 오지에서 재난 상황으로 인한 사용자의 위치를 확인하는 것은 중요하다.

기존의 대표적인 측위 방식으로 중궤도 위성을 이용한 GNSS (Global Navigation Satellite System)가 있다. 하지만 GNSS 미탑재 단말의 경우 측위가 불가능하므로 GNSS가 아닌 범용적 통신 서비스를 이용한 사용자 측위 기술이 요구되고 있다. 그중 저궤도 위성은 5G NR (New Radio)-NTN 저궤도 (Low Earth Orbit, LEO) 위성을 사용하고자 한다. LEO 위성은 정궤도, 중궤도 위성보다 낮은 고도에 위치하여 신호 전송 지연 시간이 낮으며 광대역을 통한 높은 전송률, GNSS 대비 적은 제작 및 발사 비용으로 경제적 비용을 크게 절감할 수 있다는 이점이 있다. 그러므로 현재 저궤도 위성을 이용한 측위 기술에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있다^[2]. 본 논문에서는 3GPP에서

NTN 환경에서 표준으로 고려하고 있는 후보 기술 중 하나인 단일 위성 기반 OTDOA (Observed Time Difference of Arrival) 기술의 성능을 분석한다.

II. NTN 사용자 측위 기술 시스템 모델

본 논문의 시스템은 NTN 환경에서 NR을 이용하여 단일 위성이 시간에 따라 정해진 궤도를 이동하면서 주기적으로 OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 기반의 PRS (Positioning Reference Signal)를 전송하고, 다수의 PRS를 수신한 사용자가 PRS 간의 수신 시간 차이 (Reference Signal Time Difference, RSTD)를 계산하여 OTDOA 측위 기술을 기반으로 자신의 위치를 확인하는 시스템이다.

이때 LEO 위성이 전송하는 PRS는 부반송파 간격 (subcarrier spacing, SCS)이 15kHz인 경우에 대해서 하나의 OFDM 슬롯 (slot)에서 PRS 시퀀스를 전송한다. PRS는 다른 시퀀스와는 상관성이 거의 없는 좋은 상관성 특성을 갖는 길이-31의 골드 시퀀스 (Gold sequence)를 사용하여 생성된다. 위성은 전송 시간마다 다른 PRS 신호를 생성하여 전송하고, 전송주기는 인접 신호 간섭 (Inter-Symbol Interference, ISI)이 발생하는 시간보다 길게 설정한다. 위성의 안테나는 사용자 방향으로 지향되어 있어 송신 빔 최대이득으로 사용자에게 전송된다고 가정한다.

시스템 총 대역폭 (Bandwidth, BW)은 부반송파 간격과 OFDM 리소스 블록 (Resource Block, RB)의 수 그리고 OFDM 리소스 블록 내부 반송파 개수의 곱으로 구할 수 있으며 샘플링 속도 (sampling rate)는 오버 샘플링 없이 다음과 같이 주어진다.

$$BW = (SCS) \times (NRB) \times (\text{CarriersPerRB}, 12),$$
$$(\text{Sampling Rate}) = 1/BW \quad (1)$$

채널은 거리에 따른 전파 지연 (propagation delay)과 신호 경로 감쇄 효과만 고려한다. 사용자의 통신 환경은 위성과 가시선 링크가 존재한다고 가정하며 경로 손실 및 shadow fading 영향은 다음과 같은 수식으로 주어진다.

$$PL = PL_b + PL_o + PL_s + PL_e, \quad (2)$$

PL 은 전체 경로 감쇄, PL_b , PL_o , PL_s , PL_e 은 각각 자유 공간 경로 손실을 포함하는 기본적인 경로 손실, 대기 중 가스에 의한 손실, 전리층 섬광 혹은 대류권 섬광에 의한 손실, 건물 진입 손실에 의한 손실을 의미한다.

사용자는 RSTD를 구하기 위해서 수신 신호에 다수의 송신 PRS를 차례로 상관 연산을 취한다. 각 송신 PRS 별 상관 연산 결과의 최고점이 위치한 시간을 수신 시간으로 추정한다. 추정된 모든 PRS에 대해 위성의 이동 시간 (measurement time gap, MTG) 보상 후 상관 결과의 최고점의 시간 차이를 구한 것이 RSTD가 된다.

RSTD와 광속을 곱한 결과를 위성과 사용자 간 경로 차이로 고려하고 OTDOA에서 위성의 서로 다른 PRS 전송 위치를 초점으로 하여 다음과 같은 수식으로 3차원 쌍곡면 방정식을 유도할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\phi)\cos(\theta) & \sin(\phi)\cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta)\cos(\phi) & \sin(\theta)\sin(\phi) & \cos(\theta) \\ \sin(\phi) & -\cos(\phi) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$(x' - S_x)^2/a^2 - (y' - S_y)^2/b^2 - (z' - S_z)^2/b^2 = 1$$

이러한 쌍곡면이 3개 이상 존재한다면 쌍곡면들이 교차하는 하나의 점을 특정할 수 있다.

III. NTN 사용자 측위 기술 알고리즘

수학적 계산을 통해 쌍곡면들의 교차 지점을 닫힌 형태의 수식으로 구하는 것은 불가능하다. 따라서 지표면 상에 사용자가 존재할 수 있는 후보 지점을 격자 형태로 선정하고 다수의 쌍곡면으로부터 각 후보 지점까지의 평균 제곱 오차 (Mean Squared Error, MSE)가 가장 작은 지점을 사용자의 위치로 추정한다.

또한, 연산량을 줄이기 위해 병렬적 계층 격자 탐색 알고리즘을 적용한다. 해당 알고리즘은 먼저 낮은 해상도에서 탐색을 수행하고 MSE가 작은 후보 지점을 선택한 후 해당 지점을 중심으로 더 높은 해상도로 격자 후보 지점을 형성하며 병렬적으로 탐색한다. 최종적으로 MSE가 가장 작은 위치를 사용자의 위치로 추정한다.

IV. 시뮬레이션 결과 분석 및 결론

NR-NTN에서 단일 위성을 이용한 OTDOA 기술의 성능 분석을 위한 기본 시스템 파라미터는 표 1과 같다.

표 1 NR-NTN의 기본 시뮬레이션 파라미터

파라미터	설정값
반송파 주파수 (f_c)	2.4GHz
잡음 전력 스펙트럼 밀도	-174dBm/Hz
위성의 고도	629km
사용자의 PRS 수신 시간	[0:50:250]sec
위성 안테나 이득	29.37dB
사용자의 안테나 이득	0dB
사용자 환경	Dense Urban
OFDM 부반송파 간격	15,000Hz
PRS 신호 전송을 위해 할당된 RB의 개수	52
PRS 신호 comb 패턴의 개수	12
사용자 위치 후보 격자의 개수	15
병렬 탐색 범위	3
쌍곡면 근사 격자의 개수	1,000

그림 2는 다양한 시스템 파라미터에 따른 전송 전력 대비 사용자 위치 추정 알고리즘을 통해 추정된 사용자 위치의 평균 제곱근 오차 (Root Mean Squared Error, RMS

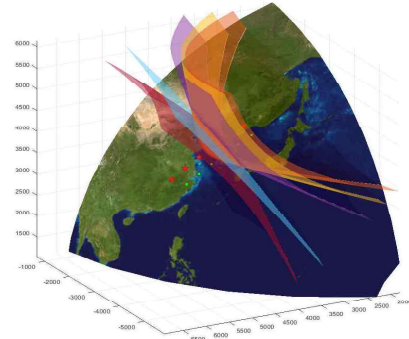


그림 1 LEO 위성의 6개 PRS에 의해 생성된 5개의 쌍곡면

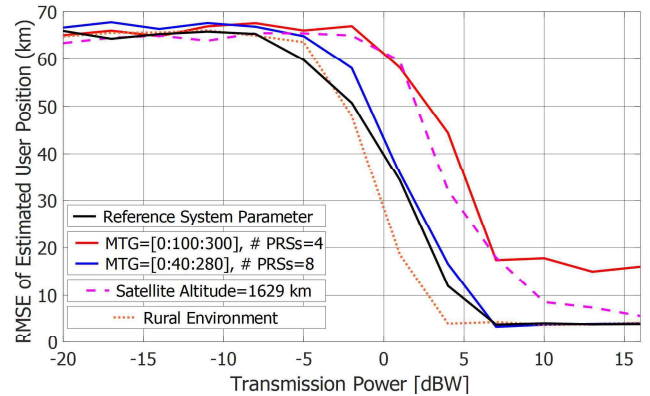


그림 2 시스템 파라미터에 따른 위성 전송 전력 대비 추정된 사용자 위치의 RMSE

E)를 보여준다. 기본 시뮬레이션 파라미터에서 MTG가 [0:100:300], [0:40:280]으로 각각 PRS를 4번, 8번 전송하는 경우와 위성의 고도가 1629km인 경우, 사용자가 도심의 지역에 있는 경우를 고려한다. 시뮬레이션 결과는 전송 전력이 증가할수록 사용자 측위 정확도가 5km 수준으로 증가하는 것을 확인할 수 있었다. PRS의 수가 증가할수록 성능이 향상될 것으로 예상했으나 잡음이 있는 시스템에서 유의미한 추정 결과 구간에서는 PRS의 수가 일정 수 이상이면 큰 성능 차이가 없는 것으로 확인되었다. 위성의 고도가 높은 경우 수신 신호의 전력이 감소하여 전체적으로 성능이 감소하며, 도심 외 지역에서 사용자 위치 추정을 하는 경우 가시선 채널의 shadow fading 영향이 감소하여 경로 손실이 줄어들어 수신 전력의 향상이 사용자 측위 성능이 향상된다.

Acknowledgement

이 논문은 2023년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2021-0-00847, 3차원 공간 위성통신 기술 개발)

참고문헌

- [1] X. Lin *et al*, "5G From Space: An Overview of 3G PP Non-Terrestrial Networks," *IEEE Commun. Stand. Mag.*, vol. 5, no. 4, pp. 147-53, Dec. 2021.
- [2] R. Morales-Ferre *et al*, "Is LEO-based Positioning with Mega-Constellations the Answer for Future Equal Access Localization?," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 1. 60, no. 6, pp. 40-46, Jun. 2022.