

LTE 신호의 CRS를 이용한 TOA 기반 거리 측정 방법

TOA-Based Ranging Method using CRS in LTE Signals

강 태 원^{1,2} · 이 하 림^{1,2} · 서 지 원^{1,2*}

¹연세대학교 글로벌융합공학부

²연세대학교 글로벌융합기술원

Taewon Kang^{1,2} · Halim Lee^{1,2} · Jiwon Seo^{1,2*}

¹School of Integrated Technology, Yonsei University, Incheon 21983, Korea

²Yonsei Institute of Convergence Technology, Yonsei University, Incheon 21983, Korea

[요 약]

본 논문에서는 LTE 기지국 (BS; base station)과 단말기 (UE; user equipment) 간의 거리를 신호 도달 시간 (TOA; time-of-arrival)을 이용해 계산하는 알고리즘을 소개하였다. 먼저, 수신된 신호를 발신한 기지국을 판별하기 위해 primary synchronization signal (PSS)와 secondary synchronization signal (SSS)를 이용하여 셀 아이디를 취득하였다. 제시된 알고리즘에서는 상용 LTE 신호에 포함된 기준 시퀀스인 cell-specific reference signal (CRS)를 구축된 자원 그리드에서의 2차원 상호 상관을 통해 지연 시간을 계산하였다. 지연 시간의 변화는 신호 도달 시간의 변화로 계산되어 알려진 BS의 위치로부터 UE와의 거리를 계산하는 과정에 사용할 수 있다. 제시된 알고리즘의 성능은 실제 환경에서의 상용 LTE 신호를 이용한 거리 계산 실험에 사용되어 평가되었다.

[Abstract]

In this paper, a new algorithm for the calculation of the range between an LTE base station (BS) and a user equipment (UE) using time-of-arrival (TOA) measurements of LTE signals is proposed. First, the cell identity (cell ID) of the received signal is acquired using the primary synchronization signal (PSS) and secondary synchronization signal (SSS) to identify the BS transmitted the signal. The proposed algorithm exploits the cell-specific reference signal (CRS), the reference sequence inserted in commercial LTE signals, to estimate the time delay using 2D cross-correlation. The obtained TOA estimations can be used to calculate the range employed from the known BS location. The performance of the proposed algorithm is evaluated with the experiment performed using real LTE signals transmitted from the commercial BS.

Key word : LTE, Signals of opportunity, Resilient PNT, Time-of-arrival (TOA), Ranging.

<https://doi.org/10.12673/jant.2019.23.5.437>



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Received 25 September 2019; Revised 4 October 2019

Accepted (Publication) 24 October 2019 (30 October 2019)

*Corresponding Author : Jiwon Seo

Tel: +82-32-749-5833

E-mail: jiwon.seo@yonsei.ac.kr

I. 서론

최근 위성항법시스템 (GNSS; global navigation satellite system)[1]-[3]의 신호 수신 저하로 인한 측위 불능 및 성능 저하 상황[4]-[7]에 대한 대비책으로 대체 항법에 대한 많은 연구들이 진행 중이다[8]-[11]. 특히, 기회 신호 (SOP; signals of opportunity)를 이용한 대체 항법이 많은 관심을 받고 있다. 기회 신호란 Wi-Fi, TV, 라디오나 휴대 전화 신호와 같이 측위 목적이 아닌 무선 신호를 통칭하는 용어로, 신호의 수신 세기와 커버리지가 GNSS 신호에 비해 우수하기 때문에 GNSS를 사용할 수 없는 실내 혹은 도심 환경에서 GNSS를 뒷받침할 수 있는 측위 시스템의 목적으로 활발히 연구되고 있다[12]-[15].

LTE (long-term evolution)는 4세대 무선 통신 시스템의 기준으로 최근 측위에 사용할 수 있는 기회 신호 중 하나로 크게 주목받는 신호이다. LTE 신호의 높은 정보 전송률, 전파 대역폭 및 커버리지는 측위에 적합한 장점으로 여겨지고 있다[16].

LTE 신호를 이용한 측위에는 기존의 3GPP (3rd generation partnership project)의 Release 9에서 소개된 PRS (positioning reference signal)를 사용할 수 있으나, PRS의 수신으로 신호를 수신한 단말기 (UE; user equipment)의 위치가 네트워크에 알려짐으로 인한 보안 문제가 야기될 수 있고[17], PRS를 제공하는 것은 통신사의 선택이기 때문에 많은 통신사들이 추가적인 전파 대역을 필요로 하는 PRS 신호를 제공하지 않고 있기 때문에 실제 PRS를 이용한 측위에는 어려움이 있다.

수신된 LTE 신호에는 측위에 사용할 수 있는 세 가지 종류의 기준 시퀀스 (reference sequence)가 존재한다. 이 기준 시퀀스들은 PRS와 다르게 모든 상용 LTE 신호에 존재하는 시퀀스이다. 먼저 PSS (primary synchronization signal)는 3개의 서로 다른 시퀀스 중 하나로 표현되며, 신호가 발신된 기지국 (BS; base station 혹은 eNodeB)의 섹터를 구분하는 데 쓰인다. SSS (secondary synchronization signal)는 168개의 서로 다른 시퀀스 중 하나로 표현되며, LTE 무선 통신 서비스 영역인 셀의 그룹 ID를 표현하는 데 쓰인다. PSS와 SSS의 전파 대역폭은 930 kHz로, GNSS 중 대표 격인 GPS (global positioning system)의 C/A (coarse acquisition) 코드의 대역폭인 1.023 MHz와 비슷한 수준이다. 수신된 LTE 신호에 대해 시간 영역에서 PSS나 SSS의 시퀀스를 상호 상관 (cross-correlation)을 통해 찾아내고 시간 지연을 계산하여 의사 거리 (pseudorange)를 도출해 낼 수 있다 [18]-[19]. 그러나 이 방법은 GPS와 유사하게 다중 경로 (multipath)에 취약하다는 단점이 있다[20]. 위 단점을 해결하기 위해 세 번째 기준 시퀀스인 CRS (cell-specific reference signal)를 사용할 수 있다. CRS는 BS와 UE 간 채널 추정 (channel estimation)을 위해 쓰이는데, PSS와 SSS보다 높은 전파 대역폭을 가져서 다중 경로에 좀 더 강인하다[21]-[22]. CRS는 PSS나 SSS와 달리 시간과 주파수 영역 모두에 산개되어 있어 2차원 상호 상관을 통해 지연 시간 (time delay)을 도출할 수 있다 [23]-[24]. 본 논문에서는 CRS를 통해 거리를 측정하는 방법에

집중하였다.

본 논문에서는 수신된 LTE 신호를 자원 그리드에 표현하여 CRS를 2차원 상호 상관 분석하여 BS와 고정된 위치의 UE 간 거리를 연속적으로 계산하는 알고리즘을 제시하였다. 제시된 알고리즘을 이용하여 실제 LTE 신호를 수집하여 거리를 측정 한 실험 결과 또한 제시되었다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 1장 서론에 이어 2장에서는 LTE 시스템 모델에 대해 간략히 설명한다. 3장에서는 수신된 LTE 구조에서 지연 시간과 BS-UE 간 거리를 계산하는 알고리즘을 설명하였다. 4장에서는 3장에서 설명한 알고리즘을 이용한 실제 실험 결과를 설명하였다. 마지막 5장에서는 본 논문을 요약하며 결론을 맺었다.

II. LTE 시스템 모델

2장에서는 LTE의 프레임 구조와 PSS와 SSS로부터 셀 ID를 취득하는 과정을 설명한다.

2-1 LTE 프레임 구조

그림 1은 LTE 신호의 기본 구조[25]를 나타낸 그림이다. LTE 신호는 주파수와 시간 두 영역에 따라 격자화된 구조를 가지는데, 이를 자원 그리드 (resource grid)라 한다. 자원 그리드는 신호의 스케줄링 기본 단위인 자원 블록 (resource block)의 집합으로 구성된다. LTE 신호의 시간 축은 10 ms 마다 하나의 프레임 (frame)으로 구분된다. 하나의 프레임은 10 개의 동일 길이의 부프레임 (subframe)으로 나뉘며, 하나의 부프레임은 두 개의 동일 길이의 슬롯으로 나뉜다. 또한 자원 블록에는 12 개의 동일 주파수 크기의 부반송파 (subcarrier)가 있으며, 각 부반송파의 크기는 15 kHz이다.

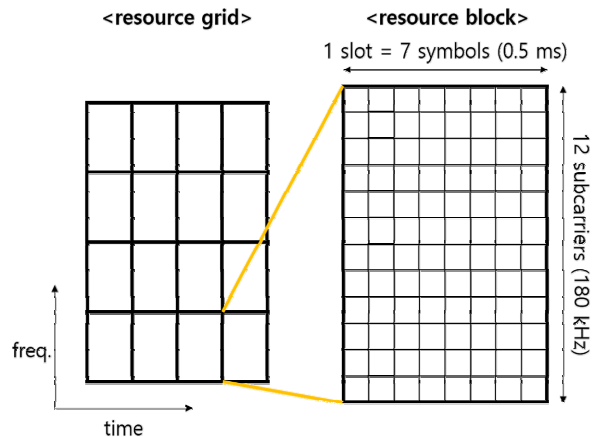


그림 1. LTE 신호의 기본 구조.

Fig. 1. Basic structure of the LTE signal.

UE는 수신된 LTE 신호의 프레임 시작 시각을 추정하기 위해 매 프레임의 특정 시간에 삽입된 PSS와 SSS 두 동기화 신호를 이용한다. PSS는 Zadoff-Chu 시퀀스 기반의 기준 시퀀스로 슬롯 0과 10의 마지막 심볼에 담겨 전송된다. PSS는 3개의 서로 다른 시퀀스 중 하나로 표현되며, 각각의 시퀀스는 $N_{ID}^{PSS} \in \{0, 1, 2\}$ 중 하나로 지정되어 있다. SSS는 최장 수열 (m-sequence; maximum length sequence) 기반 기준 시퀀스로 PSS와 마찬가지로 슬롯 0과 10에 존재하며, PSS가 담긴 심볼 바로 이전의 심볼에 담겨 전송된다. SSS는 168개의 서로 다른 시퀀스 중 하나로 표현되며, 각각의 시퀀스는 $N_{ID}^{SSS} \in \{0, 1, \dots, 167\}$ 중 하나로 지정되어 있다.

2-2 셀 ID 취득

그림 2는 수신된 LTE 신호로부터 셀 ID를 취득하는 과정 [26]을 설명하고 있다. 셀 ID는 신호가 발신된 BS마다 서로 다른 값을 가지고 각 셀 ID는 하나의 특정한 하향링크 (downlink) LTE 신호와 대응되기 때문에, UE 주변에 설치된 BS의 위치와 BS에서 발신하는 신호의 셀 ID를 알고 있다면 신호에서 셀 ID를 취득하는 것으로 신호의 발신 위치를 알 수 있다. 앞서 설명한 N_{ID}^{PSS} 와 N_{ID}^{SSS} 로 셀 ID N_{ID}^{Cell} 를 계산하기 때문에 셀 ID 계산을 위해서 PSS와 SSS 검출이 선행되어야 한다. PSS와 SSS는 프레임 내 위치가 인접해 있기 때문에 먼저 수신된 신호의 한 프레임 길이에 대해 PSS를 먼저 검출한 뒤 SSS의 위치를 예측한다.

PSS를 검출하기 위해 UE는 세 가지의 서로 다른 PSS 시퀀스를 생성하여 수신된 신호에 대해 상관한다. 이를 수식으로 표현하면,

$$Corr(r, s_{PSS})[n] = \sum_{n=0}^{N-1} r(n) s_{PSS}^*(n+m)_N \quad (1)$$

$$= r(m) \otimes_N s_{PSS}(-m)_N$$

이 된다[27]. 이 때 r 은 수신된 신호를, s_{PSS} 는 UE가 생성한 시간 영역에서의 PSS를, N 은 한 프레임 안의 샘플 수, $(\cdot)^*$ 은 켈레 복소수를, $(\cdot)_N$ 은 모듈로 N 연산을, 그리고 \otimes_N 은 N -point circular convolution을 의미한다. 이 과정을 주파수 영역에서 진행하기 위해, (1)에 고속 푸리에 변환 (FFT; fast Fourier transform)과 고속 푸리에 역변환 (IFFT; inverse fast Fourier transform)을 취하면,

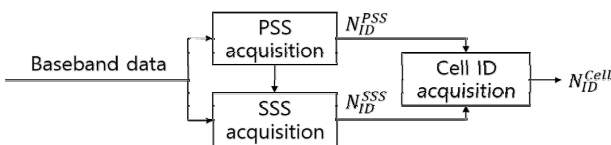


그림 2. LTE 셀 아이디 취득 과정
Fig. 2. LTE Cell ID acquisition process.

$$Corr(r, s_{PSS}) = IFFT\{RS_{PSS}^*\}, \quad (2)$$

이 된다. 이 때 $R := FFT\{r\}$ 이고 $S_{PSS}^* := FFT\{s_{PSS}^*\}$ 이다. PSS는 신호의 시간 영역 내 correlation peak value를 띠는 위치에서 검출되며, SSS는 PSS가 검출된 바로 직전 위치에 168 가지의 서로 다른 SSS 시퀀스를 상관하여 검출한다. SSS의 상관 및 검출은 PSS와 같은 방법으로 이루어진다.

PSS와 SSS가 수신된 신호로부터 모두 검출된 후, 각각의 시퀀스는 미리 지정된 N_{ID}^{PSS} 와 N_{ID}^{SSS} 로 표현된다. 셀 ID는

$$N_{ID}^{Cell} = N_{ID}^{PSS} + 3N_{ID}^{SSS}, \quad (3)$$

로 계산된다. 이 때 $N_{ID}^{Cell} \in \{0, 1, \dots, 503\}$ 이다.

III. 지연 시간 및 거리 계산 알고리즘

수신된 LTE 신호의 지연 시간을 구하기 위해 CRS를 이용하였다. 3장에서는 고정된 위치의 UE에서 지연 시간을 연속적으로 계산하고 이로부터 BS와 UE 간 거리를 계산하였다.

앞선 2장에서 얻은 PSS와 SSS 위치로부터 수신된 신호의 프레임 시작 시각 및 프레임 구조를 얻을 수 있었다. CRS 역시 PSS와 SSS와 마찬가지로 프레임 내 특정 위치에 존재하나, 시간 영역 뿐만이 아니라 주파수 영역에도 산개되어 있다는 차이가 있다. 그림 3에서는 안테나 포트에 따른 normal cyclic prefix 자원 그리드 내 CRS 위치를 표현하였다.

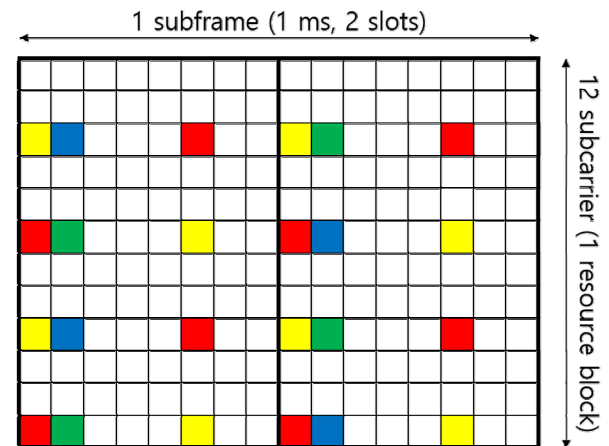


그림 3. Normal cyclic prefix 자원 그리드 내 CRS의 위치. 색칠된 위치가 CRS가 위치한 자원 요소이며, 빨강/노랑/파랑/초록은 각각 안테나 포트 0/1/2/3에서 발신된 CRS임을 의미한다.

Fig. 3. CRS position in a normal cyclic prefix resource grid. Red/yellow/blue/green respectively depicts CRS sent over antenna port 0/1/2/3.

수신된 신호의 안테나 포트를 알기 위하여 이전의 프레임 구조에서 MIB (master information block)를 디코딩해야 한다. MIB는 1 프레임 (10 ms)에 한 번 송신되고 4 프레임 (40 ms)에 한 번 갱신되는 신호로 다운링크 신호의 전파 대역폭, 안테나 포트 번호 등의 정보를 담고 있다. MIB 디코딩을 통해 안테나 포트 번호를 취득하면 수신된 신호를 자원 그리드 형태의 2차원 행렬로 재구성한다. 재구성된 이 행렬을 수신된 신호의 안테나 포트에 맞는 CRS와 상관하여 시간 영역 내 correlation peak value를 띄는 위치를 지연 시간으로 계산한다. UE가 알려진 고정된 위치에 있다고 가정할 때, 계산된 첫 번째 지연 시간을 기준으로 지연 시간의 변화는 TOA의 변화로 계산되며, 이를 바탕으로 고정된 위치에서의 거리를 연속적으로 계산할 수 있다. 그림 4에서 CRS를 이용한 지연 시간 및 거리 계산 과정을 설명하였다.

IV. 실험 결과

4-1 LTE 신호 수신 실험 환경

그림 5는 LTE 신호 수신을 위한 실험 환경 사진이다. LTE 신호 수신을 위해 상용 안테나에 연결된 Analog Device 사(社)의 ADI AD9361 시스템 온 모듈 (SOM; system-on-module) 소프트웨어 기반 수신기가 사용되었다. 신호 수집은 인천 연세대학교 국제캠퍼스 교내에서 진행되었으며, 교내의 수신 가능한 신호를 발신하는 BS들의 위치와 각각의 BS들이 발신하는 신호의 셀 ID는 실험 이전에 실시간 이동측위 (RTK; real time kinematic)를 이용해 센티미터 오차 수준의 정확도로 측정 및 조사되었다. UE의 실험 위치는 GPS를 통해 측정되었다.

수신된 신호는 889 MHz 중심 주파수 신호이다. 수집된 신호는 자체 개발된 MATLAB 코드를 통해 셀 ID 및 지연 시간을 취득하고 이로부터 거리를 계산하였다. 수신된 신호 후처리 단계에서 셀 ID 59를 검출하였고, 셀 ID 59를 발신하는 BS와 UE와의 직선 거리는 약 92.19 m 였다. 거리에는 BS와 UE의 수직 및 수평 거리 모두 고려되었다. 표 1은 수신된 LTE 신호에 대한 자세한 정보이다.

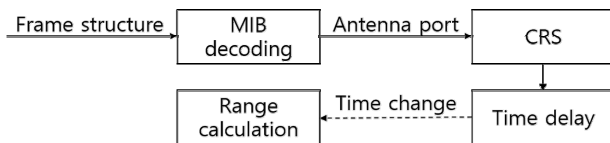


그림 4. CRS를 이용한 지연 시간 및 거리 계산 과정
 Fig. 4. Time delay and range calculation process using CRS.

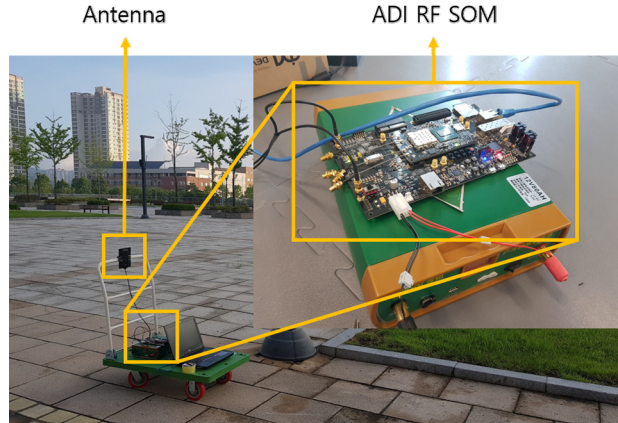


그림 5. 안테나에 연결된 ADI AD9361를 비롯한 LTE 수신 실험 환경
 Fig. 5. Experimental setup of LTE signal acquisition showing ADI AD9361 connected with an antenna.

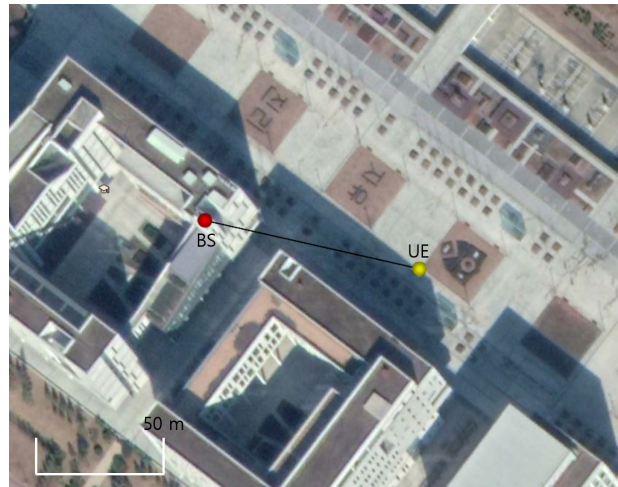


그림 6. BS와 UE의 실험 장소.
 Fig. 6. Locations of the BS and UE for the experiment.

표 1. 수신된 LTE 신호 정보
 Table 1. Information of the received LTE signal.

Cyclic prefix	Normal
Division duplex	FDD
Frequency spacing between the subcarriers	15 (kHz)
Center frequency	889 (MHz)
Transmission bandwidth	10 (MHz)
Sampling frequency	15.92 (MHz)
FFT size	1024
N_{ID}^{Cell}	59

4-2 실험 결과

그림 7과 그림 8은 각각 셀 ID 59의 신호로부터 계산한 시간

에 따른 LTE 신호 기반 거리측정 오차와 거리 오차의 누적 확률 분포 함수를 그린 그래프이다. 지연 시간 계산은 1 프레임 (10 ms)마다 이루어졌으며 연속적인 5 프레임 (50 ms)마다 지연 시간 변화의 평균을 계산하여 거리로 환산하였다. 본 실험에서는 5 초 동안 수집한 LTE 신호 안에서 100 회의 연속적인 거리 계산이 이루어졌다. 표 2는 거리 계산 결과의 평균 제곱근 오차와 표준편차, 최대 오차를 계산한 결과이다.

본 논문에서 보인 거리 오차 정확도인 약 20 m는 PRS의 측위 정확도인 약 50 m[28], TOA를 구하기 위해 채널 임펄스 응답을 이용한 결과인 약 43 m[29]보다 좋으며, 채널 추정이나 신호 추적 (tracking), 추가적인 SIB (signal information block) 디코딩[27]의 필요 없이 좋은 성능의 거리 계산이 가능함을 확인하였다.

V. 결론

본 논문에서는 실제 상용 LTE 신호로 거리 측정을 할 수 있는 알고리즘에 대해 소개하고 알고리즘을 이용해 실제 LTE 신호를 수신하여 거리를 계산하였다. 논문에서 연구된 알고리즘

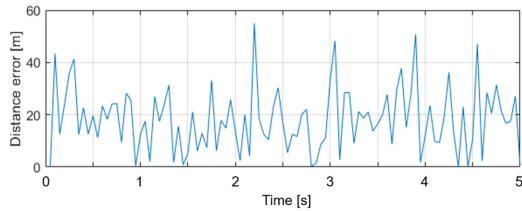


그림 7. 실험 시간 동안의 거리 오차
Fig. 7. Distance error during the experiment.

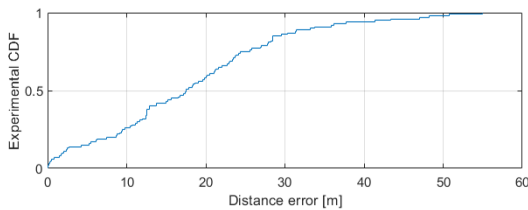


그림 8. 거리 오차의 누적 확률 분포 함수
Fig. 8. Experimental CDF of the distance error.

표 2. BS와 UE 간 거리 계산 결과
Table 2. Calculation result of the range between BS and UE.

Root-mean-square-error	20.05 (m)
Standard deviation	14.59 (m)
Maximum error	55.92 (m)

은 LTE 신호 내의 자원 그리드를 구성하여 그 안의 CRS와 2차원 상호 상관을 통해 지연 시간 및 거리를 계산하였다. 제안된 알고리즘에는 복잡한 채널 추정과 필터링 과정이 포함되어 있지 않아 연속적인 거리 계산에 유리하다. 본 논문의 알고리즘을 사용한 실험에서 연속적인 거리측정 오차 약 20 m를 달성하였으며, PRS나 채널 추정 기법을 활용한 결과보다 높은 성능을 보임을 확인하였다.

Acknowledgments

본 연구는 국토교통부 국토교통기술촉진연구사업의 연구비 지원(18CTAP-C143427-01)에 의해 수행되었습니다.

References

- [1] P. Misra and P. Enge, *Global Positioning System: Signals, Measurements, and Performance*, Revised 2nd ed. Lincoln, MA: Ganga-Jamuna Press, 2011.
- [2] M. Kim, J. Seo, and J. Lee, "A comprehensive method for GNSS data quality determination to improve ionospheric data analysis," *Sensors*, Vol. 14, No. 8, pp. 14971-14993, Aug. 2014.
- [3] J. Seo and T. Walter, "Future dual-frequency GPS navigation system for intelligent air transportation under strong ionospheric scintillation," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 15, No. 5, pp. 2224-2236, Apr. 2014.
- [4] J. Seo, T. Walter, T. Y. Chiou, J. Blanch, and P. Enge, "Evaluation of deep signal fading effects due to ionospheric scintillation on GPS aviation receivers," in *Proceedings of the ION GNSS 2008*, Savannah: GA, pp. 2397-2404, Sep. 2008.
- [5] T.-Y. Chiou, J. Seo, T. Walter, and P. Enge, "Performance of a Doppler-aided GPS navigation system for aviation applications under ionospheric scintillation," in *Proceedings of the ION GNSS 2008*, Savannah: GA, pp. 490-498, Sep. 2008.
- [6] T. Kos, I. Markezic, and J. Pokrajcic, "Effects of multipath reception on GPS positioning performance," in *Proceedings of the ELMAR-2010*, Zadar, Croatia, pp. 399-402, Sep. 2010.
- [7] K. Park, D. Lee, and J. Seo, "Dual-polarized GPS antenna array algorithm to adaptively mitigate a large number of interference signals," *Aerospace Science and Technology*, Vol. 78, pp. 387-396, Jul. 2018.
- [8] E. Kim and J. Seo, "SFOL pulse: A high accuracy DME

- pulse for alternative aircraft position and navigation,” *Sensors*, Vol. 17, No. 10, pp. 2183-2196, Sep. 2017.
- [9] F. Cappello, S. Ramasamy, and R. Sabatini, “A low-cost and high performance navigation system for small RPAS applications,” *Aerospace Science and Technology*, Vol. 58, pp. 529-545, Nov. 2016.
- [10] P. W. Son, J. H. Rhee, J. Hwang, and J. Seo, “Universal kriging for Loran ASF map generation,” *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 55, No. 4, pp. 1828-1842, Oct. 2018.
- [11] P. W. Son, J. H. Rhee, and J. Seo, “Novel multichain-based Loran positioning algorithm for resilient navigation,” *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 54, No. 2, pp. 666-679, Apr. 2018.
- [12] V. Moghtadaiee, S. Lim, and A. G. Dempster, “System-level considerations for signal-of-opportunity positioning,” in *Proceedings of the International Symposium on GPS/GNSS*, Taipei: Taiwan, Oct. 2010.
- [13] A. R. Jimenez, F. Zampella, and F. Seco, “Lightmatching: A new signal of opportunity for pedestrian indoor navigation,” in *Proceedings of the International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation*, Montbeliard-Belfort: France, pp. 1-10, Oct. 2013.
- [14] J. Raquet and R. K. Martin, “Non-GNSS radio frequency navigation,” in *Proceedings of IEEE Int. Conf. Acoust., Speech Signal Processing*, Las Vegas: NV, pp. 5308-5311, Apr 2008.
- [15] L. Merry, R. Faragher, and S. Schedin, “Comparison of opportunistic signals for localisation,” in *Proceedings of the 7th IFAC Symp. Intelli. Auto. Vehicles*, Lecce: Italy, pp. 109-114, Jan. 2010
- [16] J. A. del Peral-Rosado, J. A. López-Salcedo, G. Seco-Granados, F. Zanier and M. Crisci, “Achievable localization accuracy of the positioning reference signal of 3GPP LTE,” in *Proceedings of the 2012 International Conference on Localization and GNSS*, Starnberg: Germany, pp. 1-6, Jun. 2012.
- [17] P. Thevenon, D. Serant, O. Julien, C. Macabiau, M. Bousquet, L. Ries, and S. Corazza, “Positioning using mobile TV based on the DVB-SH standard,” *Navigation*, Vol. 58, No. 2, pp. 71-90, Jun. 2011.
- [18] J. I. Kim, J. S. Han, H. J. Roh, and H. J. Choi, “SSS detection method for initial cell search in 3GPP LTE FDD/TDD dual mode receiver,” in *Proceedings of the 9th International Symposium on Communications and Information Technology*, Incheon: Korea, pp. 199-203, 2009.
- [19] T. Kang and J. Seo, “Simulation study on the limited number of received signals for LTE-based positioning,” in *Proceedings of the 2018 KONI Conference*, Seoul: Korea, pp. 152-154, Nov. 2018
- [20] K. Shamaei, J. Khalife, and Z. M. Kassas, “Comparative results for positioning with secondary synchronization signal versus cell specific reference signal in LTE systems,” in *Proceedings of ION ITM Conference*, San Diego: CA, pp. 1-13, Jan. 2017.
- [21] M. Driusso, C. Marshall, M. Sabathy, F. Knutti, H. Mathis, and F. Babich, “Vehicular position tracking using LTE signals,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 66, No. 4, pp. 3376-3391, Apr. 2017.
- [22] M. Ulmschneider and C. Gentner, “Multipath assisted positioning for pedestrians using LTE signals,” in *Proceedings of IEEE/ION Position, Location, Navigation Symposium*, Savannah: GA, pp. 386-392, Apr. 2016.
- [23] J. A. del Peral-Rosado, J. A. López-Salcedo, G. Seco-Granados, F. Zanier, P. Crosta, R. Ioannides and M. Crisci, “Software-defined radio LTE positioning receiver towards future hybrid localization systems,” in *Proceedings of the 31st AIAA International Communications Satellite Systems Conference*, Florence: Italy, pp. 14-17, Oct. 2013.
- [24] J. A. del Peral-Rosado, J. M. Parro-Jiménez, J. A. López-Salcedo, G. Seco-Granados, P. Crosta, F. Zanier and M. Crisci, “Comparative results analysis on positioning with real LTE signals and low-cost hardware platforms,” in *Proceedings of the 7th ESA Satellite Navigation Technologies and European Workshop on GNSS Signals and Signal Processing (NAVITEC)*, Noordwijk: The Netherlands, pp. 1-8, Dec. 2014.
- [25] Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) (2011, January). Physical Channels and Modulation, document TS 36.211, *3rd Generation Partnership Project* [Online]. Available: <http://www.3gpp.org/ftp/Specs/html-info/36211.htm>
- [26] T. Kang, H. Lee, and J. Seo, “Analysis of the maximum correlation peak value and RSRQ in LTE signals according to frequency bands and sampling frequencies,” in *Proceedings of 19th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS 2019)*, Jeju: Korea, Oct. 2019.
- [27] K. Shamaei, J. Khalife, and Z. M. Kassas, “Exploiting LTE signals for navigation: Theory to implementation,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Vol. 17, pp. 2173-2189, Jan. 2018.
- [28] S. Fischer, Observed time difference of arrival (OTDOA) positioning in 3GPP LTE, Qualcomm, San Diego: CA, USA, White Paper, Jun. 2014.

[29] F. Knutti, M. Sabathy, M. Driusso, H. Mathis, and C. Marshall, "Positioning using LTE signals," in *Proceedings of Navigation Conference in Europe*, Bordeaux: France, pp. 1-8, Apr. 2015.



강 태 원 (Taewon Kang)

2016년 2월 : 연세대학교 글로벌융합공학부 (공학사)
2016년 9월 ~ 현재 : 연세대학교 글로벌융합공학부 석박사통합과정
※ 관심분야 : 대체항법시스템, 위성항법시스템



이 하 림 (Halim Lee)

2019년 2월 : 연세대학교 글로벌융합공학부 (공학사)
2019년 2월 ~ 현재 : 연세대학교 글로벌융합공학부 석박사통합과정
※ 관심분야 : 항법시스템, LTE 등 기회신호 기반 측위



서 지 원 (Jiwon Seo)

2002년 2월 : 한국과학기술원 기계공학과 항공우주공학전공 (공학사)
2004년 9월 : Stanford University 항공우주공학과 (공학석사)
2008년 6월 : Stanford University 전기공학과 (공학석사)
2010년 6월 : Stanford University 항공우주공학과 (공학박사)
2010년 7월 ~ 2012년 1월 : Stanford University 항공우주공학과 (박사후연구원)
2012년 3월 ~ 현재 : 연세대학교 글로벌융합공학부 (부교수)
※ 관심분야 : 항법시스템, 지능형무인시스템