

<https://doi.org/10.7236/JIIBC.2024.24.6.51>

JIIBC 2024-6-8

VDOP 기반 가중치 적용을 통한 NLOS 환경에서의 GPS 고도 정확도 향상 연구

Research on Improvement of GPS Altitude Accuracy in NLOS Environment by Applying VDOP-Based Weighting

김경훈*, 이승우*, 황병선*, 선준호*, 김진욱*, 김정호*, 김수현*, 김진영**

Kyoung-Hun Kim*, Seongwoo Lee*, Byungsun Hwang*, Joonho Seon*,
Jinwook Kim*, Jeongho Kim*, Soo-Hyun Kim*, Jin-Young Kim**

요약 현대 사회에서 범지구위치결정시스템(Global Positioning System, GPS)은 항공기, 드론, 지리정보 시스템 등 다양한 응용 분야에서 필수적인 기술로 자리잡고 있다. 그러나 건물이나 산악 지형과 같은 장애물이 있는 비 가시거리 (Non-Line of Sight, NLOS) 환경에서 GPS 신호는 신호의 반사 및 산란으로 인해 위치 정밀도가 저하될 수 있다. 본 논문은 NLOS 환경에서 GPS의 고도 오차를 개선하기 위해 수직 정밀도의 희석(Vertical Dilution of Precision, VDOP) 정보를 활용하여 측정 잡음 공분산을 조정하는 방법인 개선된 고도 적응형 칼만 필터(Enhanced-Altitude Adaptive Kalman Filter, EAAKF)를 제안한다. EAAKF는 측정되는 VDOP의 값에 따라 적응 단계를 통해 측정 잡음 공분산 행렬을 조정한다. GPS 고도 측정을 통해 성능 비교 결과, 제안한 EAAKF는 기존 칼만 필터 대비 약 63.5%의 성능이 향상되었다. 이를 통해, 본 논문에서 제안한 EAAKF 모델이 GPS 신호를 이용한 고도 추정에 있어서 기존 칼만 필터보다 추정 정밀도가 개선되는 것을 확인하였다.

Abstract In modern society, the global positioning system (GPS) has become a cornerstone of numerous technological applications including aviation, drones, and geographic information systems (GIS). However, the accuracy of GPS signals can be adversely affected in non-line-of-sight (NLOS) environments due to signal reflection and scattering caused by obstacles such as buildings and mountainous terrain. This paper proposes the enhanced-altitude adaptive Kalman filter (EAAKF), which adjusts the measurement noise covariance using vertical dilution of precision (VDOP) information to mitigate altitude errors in GPS measurements in NLOS environments. By adjusting the measurement noise covariance based on the measured VDOP values, the EAAKF adapts to dynamic conditions. A performance comparison through GPS altitude measurements indicates that the proposed EAAKF improves performance by approximately 63.5% compared to the traditional Kalman filter. The results show that the EAAKF model proposed in this paper improves the estimation precision over the conventional Kalman filter for altitude estimation using GPS signals.

Key Words : Altitude, Enhanced-Altitude Adaptive Kalman Filter, GPS, Kalman Filter, Positioning, VDOP

*준회원, 광운대학교 전자융합공학과

**정회원, 광운대학교 전자융합공학과, 교신저자

접수일자 2024년 8월 16일, 수정완료 2024년 11월 3일

계재확정일자 2024년 12월 6일

Received: 16 August, 2024 / Revised: 3 November, 2024 /

Accepted: 6 December, 2024

**Corresponding Author: jinyoung@kw.ac.kr

Dept. of Electronic Convergence Engineering, Kwangwoon University, Korea

I. 서 론

범지구위치결정시스템(Global Positioning System, GPS)은 5G/6G 응용 서비스 중 하나인 정밀 측위 서비스를 제공하기 위한 필수적인 기술이다. 그러나 GPS 신호는 건물이나 산악 지형과 같은 장애물이 있는 비 가시 거리(Non-Line of Sight, NLOS) 환경에서 발생하는 신호의 반사 및 산란으로 인해 위치 정밀도가 저하될 수 있다. 이는 GPS 기반의 항공기, 드론, 지리정보 시스템 등에서는 부정확한 고도 정보로 인해 자율주행 시스템 등에 영향을 초래할 수 있다^[1]. 따라서 NLOS 환경에서 GPS 신호를 이용한 고도 측위를 정밀하게 보정할 수 있는 방법이 필요하며, 이를 위해 머신러닝과 다양한 필터링 방법들을 활용한 상태 추정과 오차 보정 연구가 활발히 진행 중이다^[2-9].

고도를 측정하기 위해서는 GPS 측위 환경 판단이 선행되어야 한다. GPS 측위 환경을 판정하기 위한 방법으로 GPS 수신 신호의 신호 대 잡음비(Signal-to-Noise Ratio, SNR)를 이용한 머신러닝 기반 상태 추정 방법이 제안되었으며, 이를 통해 GPS 신호 수신 위치가 가시거리(Line of Sight, LOS) 또는 NLOS 환경인지 판단할 수 있다고 제안되었다^[2, 3]. 측위 정밀도의 향상을 위해 NLOS 환경에서 GPS 측정 데이터와 칼만 필터를 이용하여 표적 위치 추정 방법이 제안되었다^[4, 5]. GPS 위성의 기하학적 공간 배열이 GPS 신호에 미치는 영향을 분석한 연구와 정밀도의 희석(Dilution of Precision, DOP)을 활용하여 칼만 필터를 통해 측위 성능을 개선하는 연구도 진행되었다^[6-9].

칼만 필터는 측정 데이터의 잡음을 줄이고 시스템의 상태를 예측 및 추정하는 알고리즘이다. 칼만 필터가 GPS의 오차를 추정하기 위해서 센서에 측정된 초기 측정 잡음 공분산을 기준으로 일정 범위의 추정 위치를 예측하고 업데이트를 진행한다. 이 때, 칼만 필터에 초기에 추정된 오차의 범위를 벗어난 이상 측정치가 입력되는 경우, 필터의 상태 추정 성능이 저하된다. 이를 해결하기 위한 방법으로, 동적 환경에서 변화하는 잡음 특성에 실시간으로 대응하는 적응 칼만 필터가 필요하다^[10].

본 논문에서는 NLOS 환경에서 GPS가 측정한 고도 정보를 보정하기 위한 방법으로 개선된 고도 적응 칼만 필터(Enhanced-Altitude Adaptive Kalman Filter, EAAKF)를 제안한다. EAAKF 모델은 수직 정밀도의 희석(Vertical Dilution of Precision, VDOP) 정보를 기반으로 실시간으로 측정 잡음 공분산을 추정한다. 또한,

본 논문에서 제안한 EAAKF 모델의 성능 검증을 위해 GPS 수신기가 구성된 모의 실험 환경에서 기존 칼만 필터와의 성능 비교를 수행하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 측위 보정 시스템 모델을 설명하고, III장에서는 제안하는 EAAKF 측위 보정 모델에 대한 설명을 진행한다. IV장에서는 제안한 모델을 실제 측위 환경에서의 실험을 통해 성능을 검증한다. 마지막으로 V장에서 결론을 짓는다.

II. 고도 측위 보정의 구성 요소

1. Dilution of Precision

DOP는 위성의 공간 배열 정보를 나타내며 위성의 위치와 사용자 수신기 간의 상대적인 기하학적 배열에 의해 결정된다.

표 1은 위성 배치 정도에 따른 DOP 계수와 위치 정확도의 정도를 나타낸다. 여기서 DOP는 기하학적 방향에 따라 여러 형태로 나뉘며, 그 중 VDOP는 수직 방향의 위치 정확도를 나타내는 지표이다^[11]. VDOP는 GPS 수신기의 고도 측정 정확도에 영향을 미치는 요소로, 계수가 낮을수록 고도 측정의 정확도가 높다.

2. 칼만 필터

칼만 필터는 재귀 필터로 잡음이 포함된 측정값을 기반으로 시스템 상태를 예측하고 추정하는 알고리즘이다. 칼만 필터는 시간에 따라 변화하는 시스템을 추적하고 예측하는데 효과적인 것으로 알려져 있다. 칼만 필터는 상태를 추정하기 위해 예측 단계와 갱신 단계로 나뉜다. 예측 단계는 현재 상태와 입력을 기반으로 다음 상태를 예측하고, 갱신 단계는 실제 측정값을 사용하여 예측된 상태를 갱신하고, 더 정확한 추정값을 제공한다.

표 1. DOP 계수의 의미.

Table 1. Meaning of DOP coefficient.

DOP	Accuracy
1 이하	Ideal
1 ~ 2	Excellent
2 ~ 5	Good
5 ~ 10	Moderate
10 이상	Poor

칼만 필터의 예측 단계는 다음과 같이 진행된다.

$$\hat{x}_k^- = A\hat{x}_{k-1}, \quad (1)$$

$$P_k^- = AP_{k-1}A^T + Q \quad (2)$$

여기서 \hat{x}_k^- 와 P_k^- 는 각각 예측된 상태와 오차 공분산을 의미하고, \hat{x}_{k-1} 은 k-1 번째 시점에서의 상태값, P_{k-1} 은 k-1 번째 시점에서의 오차 공분산 행렬을 의미한다. 또한, A 는 상태 전이 행렬, Q 는 프로세스 잡음 공분산 행렬이다. 칼만 필터의 갱신 단계는 다음과 같이 진행된다.

$$K_k = P_k H^T (H P_k H^T + R)^{-1}, \quad (3)$$

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k (z_k - H\hat{x}_k^-), \quad (4)$$

$$P_k = (I - K_k H) P_k^- \quad (5)$$

식 (3)은 칼만 이득 K_k 를 계산하고, 식 (4)와 식 (5)에서 계산한 칼만 이득을 통해 각각 상태와 오차 공분산을 갱신한다. 여기서 H 는 관측 행렬이고, z_k 는 k 시점에서의 측정 상태값, I 는 단위행렬, 그리고 R 은 측정 잡음 공분산 행렬을 의미한다.

III. EAAKF 기반 고도 측위 보정 모델

칼만 필터는 프로세스 잡음과 측정 잡음이 정적인 환경에서 효과적이지만, 측정 잡음의 오차가 큰 경우 보정된 데이터의 변동성도 비례하여 증가하게 된다. 동적인 환경에서 보정 데이터의 변동성을 완화시키기 위해 측정 잡음 공분산 R 을 실시간으로 조정하는 EAAKF 모델을 제안한다. 그림 1은 제안하는 EAAKF 보정 모델의 순서도를 나타낸다.

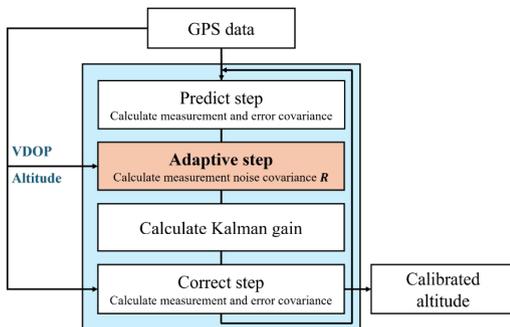


그림 1. 제안하는 EAAKF 보정 모델의 순서도.
 Fig. 1. Flowchart of proposed EAAKF calibration model.

$$R_k = R_0 \times (\eta \cdot (VDOP_k - 1) + \sigma_{alt}) \quad (6)$$

식 6은 EAAKF 모델에서 측정 잡음 공분산 업데이트 수식이다. R_0 는 초기 측정 잡음 공분산 행렬, σ_{alt} 는 시스템이 샘플링하는 고도 값의 표준 편차이고, η 는 입력된 데이터의 VDOP 특성을 반영하기 위한 가중치 계수이다. 본 논문에서 제안하는 EAAKF 모델의 적용 단계를 통해 칼만 필터는 환경 변화를 감지하여 잡음 특성을 실시간으로 조정하여 더 정확한 상태 추정이 가능하다.

IV. 모의실험

1. GPS 측위 실험 환경

GPS 측위 실험은 그림 2와 같이 서울시 노원구 광운대학교 근방의 우이천 강변공원에서 실시간 운동학적 위치(Real-Time Kinetic, RTK) 수신기를 이용하여 진행하였다. RTK는 위성 신호와 지상 기지국 기반 보정 신호를 동시에 사용하여 위치 정확도를 센티미터 수준까지 제공한다^[12]. 실험에 사용한 RTK 수신기는 u-blox의 ZED-F9P를 사용했다. 실험 환경은 국토지리정보원이 제공하는 해상 고도값을 기준으로 평지에서 진행하였으며, 실험 진행자가 GPS 장치를 소지하는 높이를 포함하여 기준 고도값을 22.8m로 가정한다.

2. 실험 데이터 분석

그림 2에서 초록색 점은 RTK를 이용하여 GPS 측정 실험을 진행한 경로이다. 이때, 다리 밑을 지나가는 NLOS 환경에서 측위 환경이 변화되어 고도 값에 큰 편차가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 그림 3은 RTK로 측정한 고도값과 측정된 VDOP를 시각화한 그림이다. 파란색 실선은 측정된 고도 값을 나타내고, 빨간색 점선은 VDOP를 나타낸다.



그림 2. GPS 측위 실험 진행 장소.
 Fig. 2. Location of GPS positioning experiment.

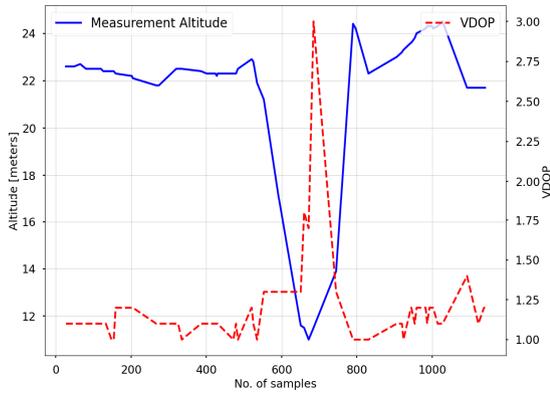


그림 3. GPS 측정 데이터의 고도 및 VDOP 그래프.
Fig. 3. Altitude and VDOP graphs of GPS measurement data.

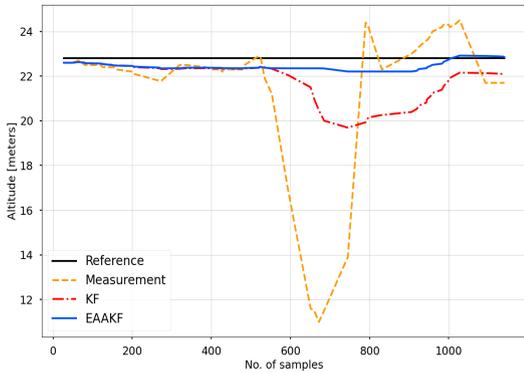


그림 4. 칼만 필터별 고도 보정 그래프 시뮬레이션 결과.
Fig. 4. Simulation results of altitude correction graphs by Kalman filter.

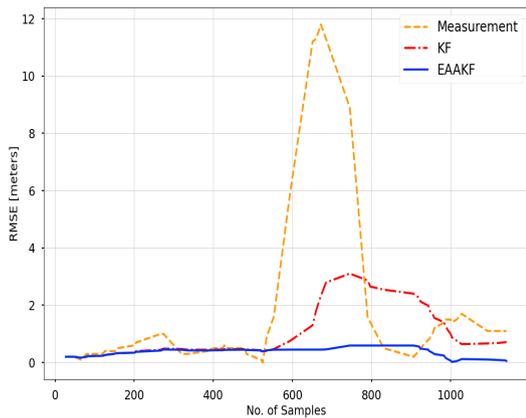


그림 5. RMSE 고도 오차 모의실험 결과.
Fig. 5. Simulation results of RMSE altitude error.

RTK는 LOS 환경에서 높은 정확도를 보여주나, 측정 환경에 의해 위성의 가시성이 변동되어 성능에 영향을 미치는 것을 그림 3을 통해 확인할 수 있다. 고도 데이터는 전반적으로 22m 근처에서 일정한 값을 유지하나, 약 600번 샘플 이후로 VDOP 계수가 3으로 변화하면서, 측정 고도가 약 12m까지 급격히 감소한 후 약 22m로 회복되었다. 데이터를 통해 VDOP 계수가 높은 구간은 GPS 측위의 신뢰도가 낮아지므로 측정되는 고도 데이터가 부정확할 가능성이 있음을 확인했다.

3. 제안하는 모델의 성능 및 분석

그림 4에는 Reference, Measurement, KF, EAAKF의 데이터가 포함되어 있다. Reference는 22.8m의 기준 고도이고, Measurement는 RTK로 측정된 고도 값, KF는 기본 칼만 필터로 보정된 고도 값, 그리고 EAAKF는 본 논문에서 제안한 EAAKF 보정 모델을 통해 보정된 고도 값을 나타낸다.

KF는 측정 데이터의 약 600번째 샘플 부근의 큰 변동을 완화했으나, 여전히 높은 오차가 존재하는 것을 확인할 수 있다. 반면, 제안한 EAAKF는 전 구간에서 안정적인 고도 값으로 보정한 것을 확인할 수 있다.

그림 5는 RTK 측정값, KF, EAAKF의 제공 평균 오차(Root Mean Square Error, RMSE) 값을 시각화하여 기준 고도와 비교한 그래프이며, 비교한 RMSE 값을 표 2에 정리하였다. 기준 고도와 RTK 측정 고도의 RMSE 오차는 약 1.667m이다. KF를 통한 보정 결과, RTK 측정 데이터 대비 약 43.3%의 RMSE 성능 향상을 보인다. 반면, 제안하는 EAAKF는 RTK 측정 데이터 대비 약 79.3%의 RMSE 성능 향상을 달성했다. EAAKF는 KF와 비교하여 약 63.5%의 RMSE 성능 향상을 보였다. 이는 EAAKF가 실시간으로 측정 잡음 공분산을 조정하여 GPS 측정 환경의 변화에도 적응할 수 있음을 보여준다.

표 2. RMSE 비교.

Table 2. RMSE Comparison.

RMSE	Value (m)
RTK Measurement	1.667
KF	0.945
EAAKF	0.345

V. 결 론

본 논문에서는 GPS 고도 측위 정밀도를 개선하기 위해 VDOP 정보를 활용한 EAAKF 보정 모델을 제안한다. 제안하는 EAAKF 모델은 실시간으로 측정 잡음 공분산을 조정하여 동적인 환경 변화에서 높은 고도 측위 정밀도를 얻을 수 있다. 서울시 노원구 광운대학교 근방에서 실시한 GPS 측위 실험을 통해 EAAKF 보정 모델의 성능을 검증하였다. 실험 결과, EAAKF 보정 알고리즘은 대표적인 NLOS 환경 중 하나인 다리 밑에서 안정적인 고도 보정 성능을 보이며, 기존 칼만 필터 대비 약 63.5%의 RMSE 성능 향상을 달성했다. 이는 제안하는 EAAKF 보정 알고리즘이 기존 칼만 필터보다 GPS 고도 측위 보정 성능과 신뢰성을 높일 수 있는 방법임을 시사한다. 제안하는 방법을 통해 UAV, 자율 주행 등의 잡음이 포함된 동적 환경에서 실시간 초정밀 고도 추정을 요구하는 분야에서 고도 추정의 정확도와 신뢰성을 크게 개선할 수 있을 것으로 기대된다.

References

- [1] S. Choi, "Eco-driving Method at Highway including Grade using GPS Altitude data", Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society, vol. 12, no. 1, pp. 19-25, Jan. 2011.
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2011.12.1.019>
- [2] S. Son, H. Choi, H. Cho, and Y. Baek, "Location Information Reliability-Based Precision Locating System Using NLOS Condition Estimation," The Journal of Korea Information and Communications Society, vol. 38C, no. 1, pp. 97-108, Jan. 2013.
DOI: <https://doi.org/10.7840/kics.2013.38C.1.97>
- [3] H. Xu, A. Angrisano, S. Gaglione, and L.-T. Hsu, "Machine learning based LOS/NLOS classifier and robust estimator for GNSS shadow matching," Satell Navig, vol. 1, no. 1, p. 15, Dec. 2020.
DOI: <https://doi.org/10.1186/s43020-020-00016-w>
- [4] Y. K. Lee, W. D. Cho and G. S. Ha, "A study of positioning compensation by using 2 Kalman Filters in GPS signal unavailability area," The Journal of Korean Institute of Next Generation Computing, vol. 10, no. 6, pp. 59-68, Jan. 2014.
- [5] H. Cho, "Target Localization Method based on Extended Kalman Filter using Multipath Time Difference of Arrival", Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society, vol. 22, no. 6, pp. 251-257, Jun. 2021.
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2021.22.6.251>
- [6] B. Pattanayak and L. Moharana, "Analyzing the Effect of Dilution of Precision on the Performance of GPS System," in 2021 1st Odisha International Conference on Electrical Power Engineering, Communication and Computing Technology(ODICON), Bhubaneswar, India: IEEE, pp. 1-5, Jan. 2021.
DOI: <https://doi.org/10.1109/ODICON50556.2021.9428982>
- [7] M. Taksin, S. Sultana, T. Reza, and M. Hossam-E-Haider, "Analysis of DOP and its preciseness in GNSS position estimation," in 2015 International Conference on Electrical Engineering and Information Communication Technology (ICEEICT), Savar, Dhaka, Bangladesh: IEEE, pp. 1-6, May 2015.
DOI: <https://doi.org/10.1109/ICEEICT.2015.7307445>
- [8] H. Kim, S. Baek, and Y. Cho, "Improving INS/GPS Integrated System Position Error using Dilution of Precision," Journal of Advanced Navigation Technology, vol. 21, no. 1, pp. 138-144, Feb. 2017.
DOI: <https://doi.org/10.12673/JANT.2017.21.1.138>
- [9] A. El Abbous, N. Raissouni, A. Azyat, and N. Samama, "A software post-processing method for GPS receiver's accuracy characterization," in 2015 International Conference on Electrical and Information Technologies (ICEIT), Marrakech, Morocco: IEEE, pp. 154-159, Mar. 2015.
DOI: <https://doi.org/10.1109/EITech.2015.7162995>
- [10] M. Yu, "INS/GPS Integration System Using Adaptive Filter with Estimating Measurement Noise Variance", Journal of Institute of Control, Robotics and Systems, vol. 13, no. 7, pp. 688-693, July. 2007.
DOI: <http://doi.org/10.5302/J.ICROS.2007.13.7.688>
- [11] O. K. Isik, J. Hong, I. Petrunin, and A. Tsourdos, "Integrity Analysis for GPS-Based Navigation of UAVs in Urban Environment," Robotics, vol. 9, no. 3, p. 66, Aug. 2020.
DOI: <https://doi.org/10.3390/robotics9030066>
- [12] X. Li, B. Wang, X. Li, J. Huang, H. Lyu, and X. Han, "Principle and performance of multi-frequency and multi-GNSS PPP-RTK," Satellite Navigation, vol. 3, no. 1, p. 7, Dec. 2022.
DOI: <https://doi.org/10.1186/s43020-022-00068-0>

저 자 소 개

김 경 훈(준회원)



- 2024년 2월 : 광운대학교 전자융합공학 학사 졸업
- 2024년 3월 ~ 현재 : 광운대학교 전자융합공학과 석박사통합과정
- 관심분야 : 딥러닝, 강화학습, 자율주행, 측위 시스템

이 승 우(준회원)



- 2021년 2월 : 광운대학교 전자융합공학 학사 졸업
- 2021년 3월 ~ 현재 : 광운대학교 전자융합공학과 석박사통합과정
- 관심분야 : 에너지인터넷, 인공지능, 스마트 그리드, 측위 시스템, 무선통신시스템

황 병 선(준회원)



- 2023년 2월 : 광운대학교 전자융합공학 학사 졸업
- 2023년 3월 ~ 현재 : 광운대학교 전자융합공학과 석박사통합과정
- 관심분야 : 측위 시스템, 인공지능, 무선통신시스템

선 준 호(준회원)



- 2021년 2월 : 광운대학교 전자융합공학 학사 졸업
- 2021년 3월 ~ 현재 : 광운대학교 전자융합공학과 석박사통합과정
- 관심분야 : 딥러닝, 이상 탐지, 스마트 그리드, 위성통신

김 정 호(준회원)



- 2023년 2월 : 광운대학교 전자융합공학 학사 졸업
- 2023년 3월 ~ 현재 : 광운대학교 전자융합공학과 석박사통합과정
- 관심분야 : 인공지능, 무선통신시스템

김 진 욱(준회원)



- 2023년 2월 : 광운대학교 전자융합공학 학사 졸업
- 2023년 3월 ~ 현재 : 광운대학교 전자융합공학과 석박사통합과정
- 관심분야 : 딥러닝, 무선통신시스템, 시맨틱통신시스템

김 수 현(준회원)



- 2019년 2월 : 광운대학교 전자융합공학과 졸업
- 2019년 3월 ~ 현재 : 광운대학교 전자융합공학과 석박사통합과정
- 관심분야 : 차세대이동통신, 인공지능, 스마트 그리드

김 진 영(정회원)



- 1998년 2월 : 서울대학교 전자공학과 공학박사
- 2001년 2월 : SK텔레콤 네트워크 연구소 책임연구원
- 2001년 3월 ~ 현재 : 광운대학교 전자융합공학과 교수
- 관심분야 : 인공지능, 차세대이동통신, 전력선통신, 가시광통신, 무선 측위 시스템

※ 이 논문은 2022년도 정부(방위사업청)의 재원으로 국방기술진흥연구소의 지원을 받아 수행된 연구임
(No. 20-302-H00-002(KRIT-CT-22-070), 비례저지 기반 차세대 마일즈 개발)