

TLM 시각 동기 신호를 이용한 고속 이동체의 위치 추정

Position Estimation Technique of High Speed Vehicle Using TLM Timing Synchronization Signal

진미현 · 구떼올라 · 김복기*

단암시스템즈 기술연구소

Mi-Hyun Jin · Ddeo-Ol-Ra Koo · Bok-Ki Kim*

R&D Center, DANAM Systems, Gyeonggi-do 13930, Korea

[요 약]

항법 장치가 존재하지 않거나 전파 방해가 발생할 경우, 고속 이동체의 전파 항법은 불가능해진다. 그럼에도 불구하고, 다수의 지상국이 존재하며 고속 이동체와 지상국간의 정밀 거리 측정치를 확보할 수 있다면 이동체의 위치 추정이 가능하다. 본 논문에서는 텔레메트리(TLM; telemetry) 신호를 사용하여 생성한 고정밀 TDOA (time difference of arrival) 측정치를 이용한 위치 추정 방식을 제안한다. 제안한 방식에서는 TDOA 측정치를 사용하여 이동체의 공통 오차를 제거하였다. 또한 SOQPSK (shaped offset quadrature phase shift keying) PN (pseudo random noise) 심볼을 포함하여 정밀 시각 동기 및 측정이 가능한 TLM 신호를 기반으로 한 측정치를 사용하였다. 따라서 시스템 내 정밀 시각 동기가 이뤄진 상태이므로 지상국간의 시각 동기 오차가 매우 작은 값을 가진다. 이는 측정치의 정밀도를 높여 위치 추정 성능을 향상시킨다. 제안한 방식은 소프트웨어 기반의 시뮬레이션을 통해 검증되었으며, 고속 이동체의 위치 추정 성능이 목표했던 성능을 만족함을 확인하였다.

[Abstract]

If radio interference occurs or there is no navigation device, radio navigation of high-speed moving object becomes impossible. Nevertheless, if there are multiple ground stations and precise range measurement between the high-speed moving object and the ground station can be secured, it is possible to estimate the position of moving object. This paper proposes a position estimation method using high-precision TDOA measurement generated using TLM signal. In the proposed method, a common error of moving object is removed using the TDOA measurements. The measurements is generated based on TLM signal including SOQPSK PN symbol capable of precise timing synchronization. Therefore, since precise timing synchronization of the system has been performed, the timing error between ground stations has a very small value. This improved the position estimation performance by increasing the accuracy of the measured values. The proposed method is verified through software-based simulation, and the performance of estimated position satisfies the target performance.

Key word : TDOA, Positioning system, Telemetry, Precise timing measurement, Range measurement.

<https://doi.org/10.12673/jant.2022.26.5.319>



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 16 September 2022; Revised 5 October 2022
Accepted (Publication) 21 October 2022 (30 October 2022)

*Corresponding Author; Bok-Ki Kim

Tel: +82-31-538-6008

E-mail: bokki@danam.co.kr

I. 서론

무인기, 유도 무기, 고속 열차 등 고속 이동체는 자기 자신의 위치를 지속적으로 확인할 필요가 있다. 그러나 위성 항법 장치 (GPS; global positioning system) 혹은 관성 항법 장치 (INS; Inertial navigation system) 등의 항법 장치가 없거나, 결합이 발생하거나, 재밍 등의 전파 방해로 전파 항법이 불가능해지는 상황이 발생할 수 있다. 한편 대부분의 이동체는 근방에 위치한 다수의 지상국과 무선 신호를 송수신하고 있으며, 이를 활용하여 무선 거리 측정치를 획득한다면 대상 이동체의 위치 추정이 가능하다. 특히 인프라가 확장되어 높은 위치 추정 성능이 요구되며 다양한 기법을 통한 정밀 거리 측정치 획득이 조명 받고 있다.

고정밀 측정치 획득을 위한 기존 진행 연구에서, PN (pseudo random noise) 시퀀스를 사용한 고정밀 측정치 생성 방식이 제안된 바 있다[1,2]. 이 기법은 이동체가 PN 시퀀스에 의해 확산된 신호를 지속적으로 송신하고, 상대 시스템이 재전송한 신호를 수신한 후 왕복 시간을 계산하여 거리 측정치를 얻는다. 그러나 이 기법은 PN 시퀀스의 길이, 전송 속도, 신호 세기에 영향을 크게 받으므로 안정적인 정밀도를 보장하지 못하는 단점이 존재한다. 한편 OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) 변조 신호를 사용하여 거리 측정치를 생성하는 방안도 제안되었다[3,4]. 이 방식은 시간 영역과 주파수 영역에서 동시에 시간 지연을 측정함으로써 샘플 단위 이하의 시간 지연을 추정하는 방식이다. 낮은 전력에서의 측정 성능이 앞선 방식보다 우수하지만, OFDM 변조 기법의 특징에 의해 송수신단 간 주파수 오프셋이 존재할 경우 신호 대 잡음비 (SNR; signal per noise ratio)가 크게 감소할 수 있다. 즉 주파수 오프셋이 발생하지 않도록 수신단에 별도의 알고리즘이 요구된다는 단점을 갖는다. 이 경우 주파수에 상관 없이 일정 진폭 특성을 유지하도록 하는 CAZAC (constant amplitude zero auto-correlation) 시퀀스를 이용한 변조가 강제된다.

이후 이를 개선하기 위하여 PN 심볼로 구성된 모뎀 수신부 시각 동기 신호를 사용하여 IEEE 1588 PTP 방식으로 고정밀 거리 측정치를 획득하는 방안이 제안되었다[5,6]. 대역 및 전력 제한이 있으면서, 데이터를 포함하는 패킷을 불연속적으로 송신하는 시스템은 CAZAC 시퀀스를 이용한 변조를 모든 신호에 적용할 수 없다. 따라서 신호에 SRC (squa-root raised cosine) 펄스 정형을 적용하였으며, 데이터 패킷의 프리앰블에서 시각 지연 정보를 획득하여 정밀 측정치를 생성할 수 있다.

한편 고정밀 거리 측정치에는 항체 내에서 발생하는 바이어스 오차와, 각 기준국이 갖고 있는 시각 오차 및 기타 경로 오차가 존재한다. 기존 연구에서는 이에 따른 영향을 회피하기 위하여 각도 측정치만을 이용하거나 수신 신호 강도와 신호의 도달 각도 측정치를 결합하는 방식 등이 제안된 바 있다[7][8]. 그러나 측정치 성능에 의해 정확도가 변화하거나, 복잡한 알고리즘으로 인하여 높은 연산량을 요구한다. 만약 위치 추정을 위해

기준국 간 TDOA (time difference of arrival) 측정치를 이용한다면, 공통 오차인 이동체의 바이어스 오차가 제거될 수 있다[9]. 그러나 각 기준국의 시각 오차는 차분될 뿐 제거되지 않는다. 이때 이동체가 클럭 동기 기준이 되고, 기준국의 위치가 알려져 있으며 SOQPSK (shaped offset quadrature phase shift keying)를 사용하는 텔레메트리 (TLM; telemetry) 신호에 포함된 PN 동기신호 등을 이용하여 이동체와 기준국과의 클럭 동기가 가능하다면 다수의 기준국 간 클럭 동기 역시 이뤄진다[10]. 따라서 기준국의 시각 오차가 수십 ns의 매우 작은 값을 가지므로 이로 인한 정밀도 하락 역시 매우 작은 영향을 미친다.

따라서 본 논문에서는 PN 심볼을 포함한 TLM 송신 신호를 사용하여 고정밀 TDOA 측정치를 얻고, IEEE 1588 PTP 방식으로 정밀 시각 동기된 기준국을 통한 저속 및 고속 이동체의 위치 추정 방법 및 그 결과를 제시한다. 이동체는 지속적으로 TLM 신호를 기준국들로 송신하며, 기준국에서는 수신한 TLM 신호를 이용하여 거리 측정치를 획득하고 중심이 되는 기준국에서 다른 기준국의 측정치를 이용하여 TDOA 측정치를 생성한다. TDOA 측정치를 이용하여 계산된 위치 결과는 시각을 비롯한 항체의 내부 바이어스 오차에 영향을 받지 않으며, 매우 작은 기준국 간 시각 동기 오차에 의한 고정밀 측정치를 사용하였기 때문에 목표 성능을 만족한다. 제안한 방안을 검증하기 위하여 소프트웨어 기반의 시뮬레이터를 구현하였으며, 지상 및 공중의 이동체 궤적을 모델링하여 생성한 후 기준국들을 배치하여 위치 추정 성능을 확인하였다.

II. 본론

2-1 TLM 기반의 고정밀 거리 측정치

TLM 신호는 대상에게서 다양한 관측 신호를 수집하고 이를 가공하여 관측자에게 송신하기 위한 신호이다. 정확한 정보를 생성하기 위해서는 계측기간 정밀 시각 동기가 필수적이며, IEEE 1588 PTP 방식을 이용하여 정밀 시각 동기를 수행할 수 있다. IEEE 1588 PTP은 시스템 내의 동기화된 타임스탬프를 생성하기 위해 장치의 클럭을 동기화하는 기술이다. 시스템 A와 시스템 B가 있을 때, A에서 B로 신호를 송신한 후 B에서 신호를 수신한다. 이후 B에서 신호 수신 후 재송신하기까지 걸린 시간을 포함하여 신호를 되돌려 보내면 정확한 경로 지연을 산출할 수 있다. A의 송신 시각에서 경로 지연을 더하면 B의 정확한 수신 시각이 되며, 만약 B가 인지한 자신의 수신 시각과 계산된 값이 다를 경우 이 차이를 클럭 오프셋으로 가정하고 보정할 수 있다[8]. 이 과정에서 생성된 경로 지연은 곧 항법을 위한 거리 측정치로 이용할 수 있다.

이동체가 정지해 있을 때, IEEE 1588 PTP에 기반한 정밀 시각 동기가 사전에 수행되었다면 거리 측정치는 TLM 신호에 포함된 모뎀 수신부 시각 동기 신호의 단방향 송수신을 통해 즉각적으로 얻을 수 있다.

표 1. 거리 측정치의 정밀도

Table 1. Precision of range measurement.

Preamble Length	Precision [chip]	Precision [m]
63	3.79e-3	1.14
127	2.69e-3	0.81
255	1.92e-3	0.58

앞선 연구에서는 거리 측정치를 생성하기 위하여 SRC 필터를 통과한 신호에 포함된 프리앰블 신호의 교차 상관을 수행하였으며, ADC의 샘플 타이밍 오류를 보정함으로써 매우 정밀한 거리 측정치를 생성하였다. TLM 클럭이 TCXO (temperature compensated crystal oscillator)의 성능에 의해 수 ppm의 정밀도를 가질 때, 신호의 SNR이 30dB, 데이터 전송률이 1Mbps라면 거리 측정치의 정확도는 고정밀 위치 추정이 가능한 수준이며 표 1과 같다[6].

2-2 TDOA 위치 추정 기법

시각 동기 신호 송신부인 이동체가 출력하는 k번째 동기 신호가 시각 동기 신호 수신부인 지상국 i에 도착하는 경로 지연은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$t_i(k) - t_i(k) = -\frac{\|\mathbf{x}_t(k) - \mathbf{x}_i + \mathbf{e}_i\|}{c} + \frac{(\Omega_t - \Omega_i)}{T_s} + \epsilon_i(k) \quad (1)$$

여기서 T_s 는 동기 신호인 프리앰블의 전송 주기, \mathbf{x} 는 이동체 및 지상국의 위치, \mathbf{e} 는 지상국의 위치 오차를 의미한다. 또한 Ω_t 와 Ω_i 는 각각 이동체와 지상국의 클럭 주파수 오프셋으로 인한 오차를 뜻하며, ϵ_i 는 모델링이 불가능하여 불규칙하게 발생하는 측정치 오차를 의미한다. TDOA 측정치는 각 지상국에서 획득한 경로 지연을 차분하여 얻을 수 있으며 i번째 지상국과 j번째 지상국간의 경로 지연 차 및 TDOA 측정치는 식 (2) 및 식 (3)과 같다.

$$t_{i,j}(k) = \frac{\|\mathbf{x}_t(k) - \mathbf{x}_i + \mathbf{e}_i\| - \|\mathbf{x}_t(k) - \mathbf{x}_j + \mathbf{e}_j\|}{c} + \frac{(\Omega_j - \Omega_i)}{T_s} + \epsilon_i(k) - \epsilon_j(k) \quad (2)$$

$$l_{i,j}(k) = \|\mathbf{x}_0(k) - \mathbf{x}_i + \mathbf{e}_i\| - \|\mathbf{x}_0(k) - \mathbf{x}_j + \mathbf{e}_j\| + \frac{c(\Omega_j - \Omega_i)}{T_s} + n_i(k) - n_j(k) \quad (3)$$

시각 동기 신호에 기반한 정밀 시각 동기가 이뤄질 경우 식 (3)의 클럭 오프셋 오차 ($\Omega_j - \Omega_i$)는 수십 ns의 매우 작은 값을 갖는다. 표 1에 제시된 측정치의 정확도에는 이 값으로 인한 거리 오차와 랜덤한 측정치 오차 ($n_i(k) - n_j(k)$)가 포함되어 있으므로, 보수적으로 접근할 경우 식 (3)의 TDOA 측정치가 표 1

의 2배에 해당하는 오차를 갖는다고 가정할 수 있다.

한편 지상국이 N개 존재할 때 N-1개의 TDOA 측정치가 존재할 수 있으며, 본 논문에서는 이동체의 위치를 추정하기 위하여 확장 칼만 필터 (EKF, extended Kalman filter)를 구성하였다. 상태 벡터 \mathbf{x} 의 예측 방정식은 식 (4)와 같이 구성된다.

$$\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} = \mathbf{F}\hat{\mathbf{x}}_{k-1|k-1} + \mathbf{w}_k$$

$$= k \begin{bmatrix} 1 & \Delta & 0.5\Delta^2 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \Delta & 0 & \dots & 0 & 0 \\ & 0 & 1 & 0 & & & \\ & & 0 & 1 & \Delta & 0.5\Delta^2 & 0 & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & & 0 & 1 & \Delta & 0 & & \\ & & & & 0 & 1 & 0 & & \\ & & & & & 0 & 1 & \Delta & 0.5\Delta^2 \\ 0 & 0 & \dots & & & 0 & 1 & \Delta \\ 0 & 0 & \dots & & & 0 & 1 & \Delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ \ddot{x} \\ y \\ \dot{y} \\ \ddot{y} \end{bmatrix} \quad (4)$$

이때 상태 천이 행렬 \mathbf{F} 는 이동체의 동특성에 따른 상수 k 와 샘플링 주기 $\Delta = T_s$ 로 구성된다. 상태 벡터 \mathbf{x} 와 측정치 벡터 \mathbf{z} 의 관계와 근사식은 다음과 같다.

$$\mathbf{z}_k = h(\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}) + \eta_k = \begin{bmatrix} l_{1,2}(k) \\ \vdots \\ l_{1,N}(k) \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\tilde{\mathbf{y}}_k = \mathbf{z}_k - \mathbf{H}_k \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}$$

신호원인 이동체가 움직일 경우 상태 변환 함수 h 는 선형적이지 않다. 이동체 및 지상국들의 위치를 이용하여 매 k 마다의 관측 행렬 \mathbf{H}_k 를 식 (6)과 같이 모델링할 수 있으며, Taylor 전개를 이용하여 2차 항을 생략함으로써 선형 근사를 수행하였다. 이때 ($x_1 \sim N, y_1 \sim N, z_1 \sim N$)는 각 기준국의 위치, $r_1 \sim N$ 은 각 기준국과 이동체의 이전 예측 위치 $\hat{\mathbf{x}}_{k-1}$ 간의 거리를 의미한다.

$$\mathbf{H}_k = \begin{bmatrix} a_x - \frac{(x_k - x_2)}{r_2} \dots a_y - \frac{(y_k - y_2)}{r_2} \dots a_z - \frac{(z_k - z_2)}{r_2} \dots \\ \vdots \\ a_x - \frac{(x_k - x_N)}{r_2} \dots a_y - \frac{(y_k - y_N)}{r_2} \dots a_z - \frac{(z_k - z_N)}{r_2} \dots \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$a_x = \frac{(x_k - x_1)}{r_1}, a_y = \frac{(y_k - y_1)}{r_1}, a_z = \frac{(z_k - z_1)}{r_1}$$

최적 칼만 이득을 얻기 위해서는 오차 공분산 행렬 \mathbf{P} 의 예측 결과가 필요하다. 이 값은 상태 천이 행렬 \mathbf{F} 와 잡음 공분산 \mathbf{Q} 를 이용하여 식 (7)과 같이 구할 수 있다.

$$\mathbf{P}_{k|k-1} = \mathbf{F}\mathbf{P}_{k-1}\mathbf{F}^T + \mathbf{Q} = \mathbf{F}\mathbf{P}_{k-1}\mathbf{F}^T + \sigma_a^2 \mathbf{B}\mathbf{B}^T \quad (7)$$

$$\mathbf{B}^T = \begin{bmatrix} T_s^3 & T_s^2 & T_s \\ 6 & 2 & 1 \end{bmatrix}$$

식 (4)에서부터 식 (7)에 기반하여, 칼만 이득 K 와 추정된 이동체의 위치에 해당하는 상태 벡터 \hat{x} , 오차 공분산 P 는 다음과 같이 갱신할 수 있다.

$$K_k = P_{k|k-1} H_k^T (H_k P_{k|k-1} H_k^T + R_k)^{-1}$$

$$\hat{x}_{k|k} = F \hat{x}_{k-1|k-1} + K_k \tilde{y}_k \tag{8}$$

$$P_{k|k} = P_{k|k-1} - K_k H_k P_{k|k-1}$$

이때 시각 동기 신호가 SOQPSK를 사용하고, 63비트 이상의 PN 동기신호를 포함한다고 가정할 경우 측정 오차의 공분산 R 은 표 1을 참고하여 정의할 수 있다. EKF의 경우 상태 벡터의 초기 값이 실제와 크게 다를 경우 발산할 가능성이 높아진다는 단점이 있다. 따라서 발산 가능성을 감소시키기 위하여 적절한 초기 위치가 주어지는 것이 바람직하며, 이를 위해 최초의 TDOA 측정치를 LSE (least-square error) 알고리즘에 대입하여 획득한 위치를 EKF의 초기 위치로 가정하였다.

2-3 위치 추정 시뮬레이션

2.1절의 측정치와 2.2절의 EKF에 기반한 위치 추정 성능을 확인하기 위하여 고속 및 저속으로 이동하는 대표적 이동체의 이동 경로를 파이썬 기반의 시뮬레이터로 구현하였다. 이동체의 유형으로는 차량, 기차, 드론, 포탄을 고려하였으며 전체 경로 및 각 경로의 세부 특징은 그림 1 및 표 2와 같다. 다만 그림 1에서는 이동체의 경로와 기준국의 배치를 상대적으로 확인할 수 있을 뿐이며, 이동 경로가 시각에 따라 표현되어 있지 않다. 따라서 성능 확인을 위한 그래프에서는 시각에 따른 경로를 참값으로 별도로 표현하거나 추정값의 참값에 대한 오차 성분만을 도시하였다.

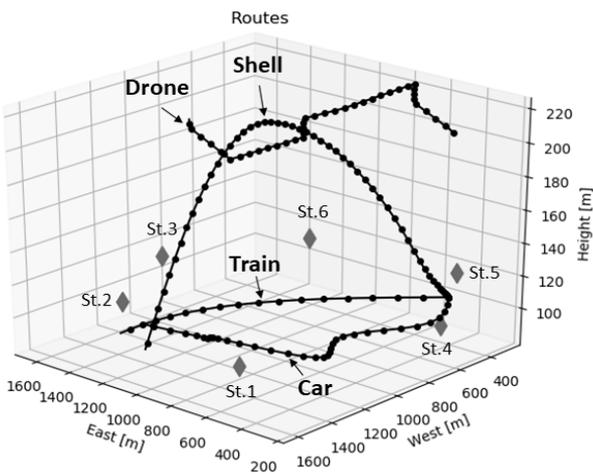


그림 1. 이동체 유형에 따른 이동 경로
Fig. 1. Moving path by object type.

표 2. 각 이동 경로의 최대 고도 및 속도

Table 2. Max height and velocity of each moving scenario.

Object type	Max height [m]	Max vel. [m/s]
Type 1 (Car)	100	49.29
Type 2 (Train)	100	99.71
Type 3 (Drone)	400	22.23
Type 4 (Shell)	223	209.1

위치 추정을 위하여 위치와 고도가 다른 지상국 6개를 배치 하였으며, 초기 위치에서 HDOP (horizontal dilution of precision) 및 VDOP (vertical dilution of precision)은 각각 0.7 ~ 2.1 및 3.3 ~ 8의 범위를 갖는다. 만약 지상국의 배치가 변화한다면 추정 성능 역시 변화할 수 있으므로 모든 환경에서의 성능의 확인을 위해서는 다양한 배치에 대한 시뮬레이션이 수행되어야 한다. 그러나 위치 추정 성능은 각 경로에서의 HDOP 및 VDOP에 비례하는 경향이 있으며 이 경향은 배치가 변경되어도 변화되지 않는다. 따라서 본 논문에서는 다양한 배치에 대해 시험하는 대신 최적 배치를 의도적으로 고르지 않고 랜덤 함수에 의해 임의로 위치가 결정된 지상국을 사용하였다. 이때 배치된 지상국을 기준으로 일정 범위의 위치 추정 가능 구역을 설정 하였으며, 이때 이동체가 해당 구역으로 진입 시 별도의 감속 및 가속은 존재하지 않는다고 가정하였다. 또한 포탄의 경우 출발 지점에서 시각 동기를 위해 1초간 머무른다고 가정하였다.

고려한 이동체의 동특성이 상이하므로, 본 논문에서는 식 (4)에 나타낸 동특성 상수 k 와 식 (7)의 잡음 공분산 Q 를 최대 속도와 비례한 변수로 두어 이동체마다 다른 값을 적용하였다. 이는 이동체의 기동 수준을 저속 및 고속으로 세분화하여 EKF를 적절하게 적용하기 위한 것이다. 각 이동체의 위치 및 고도를 EKF를 이용하여 추정한 결과 및 수평 오차와 고도 오차를 시간에 따라 도시한 결과는 그림 2 ~ 그림 5와 같다.

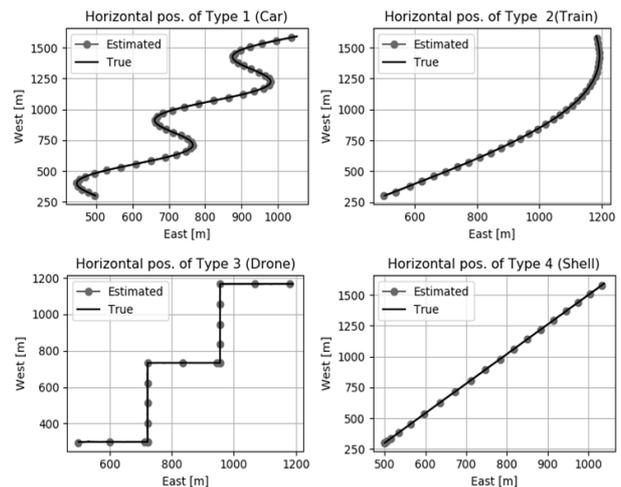


그림 2. 각 이동체의 수평 위치 추정 결과
Fig. 2. Estimated horizontal position of each object.

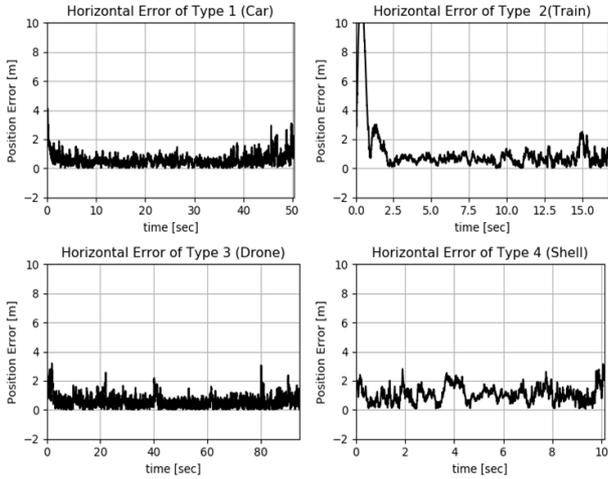


그림 3. 각 이동체의 수평 위치 오차
Fig. 3. Horizontal position error of each object.

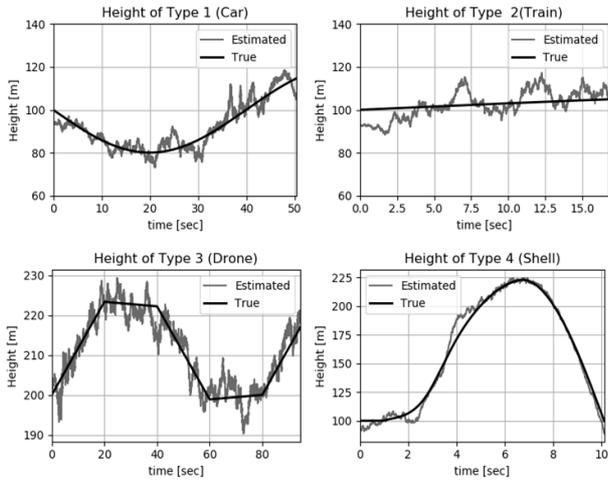


그림 4. 각 이동체의 고도 추정 결과
Fig. 4. Estimated height of each object.

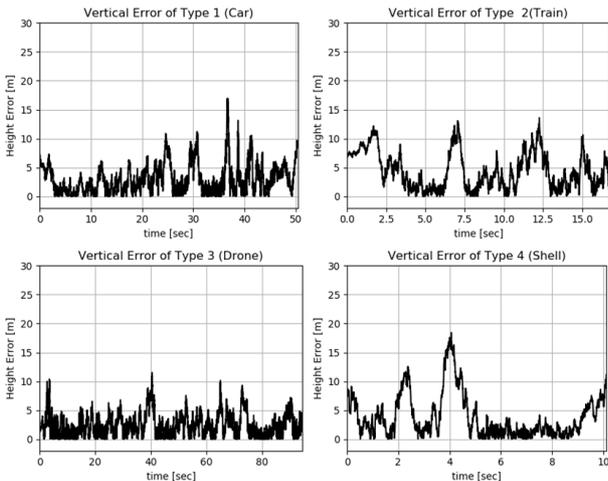


그림 5. 각 이동체의 고도 오차
Fig. 5. Height error of each object.

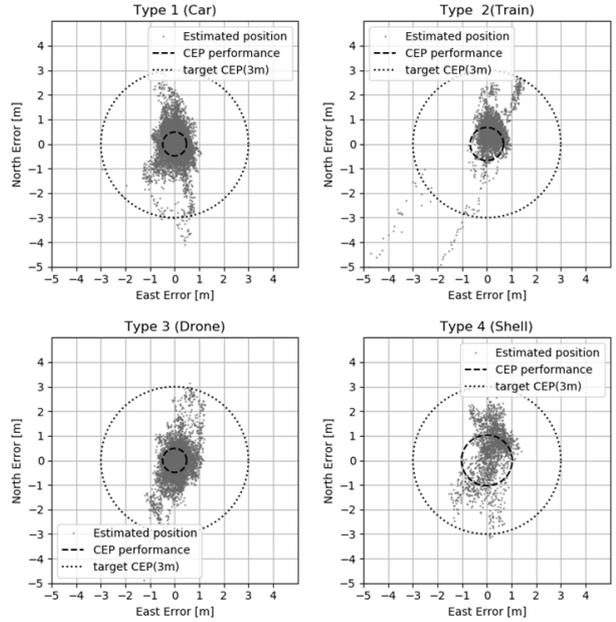


그림 6. 각 이동체의 CEP
Fig. 6. CEP of each object.

표 3. 위치 추정 성능
Table 3. Position accuracy.

Object type	Horizontal accuracy (CEP) [m]	Vertical accuracy (RMSE) [m]
Type 1 (Car)	0.4852	3.961
Type 2 (Train)	0.6750	5.470
Type 3 (Drone)	0.4880	3.139
Type 4 (Shell)	1.030	5.411

그림 2~그림 5로부터, 이동체의 속도 및 가속도를 제공하는 별도의 센서가 없어도 EKF를 통해 다양한 속도 및 가속도를 갖는 경로에서 위치 추정이 가능함을 확인할 수 있다. 대부분의 지상국이 평면으로 배치되어 있으므로 높은 VDOP에 의해 고도 오차가 수평 오차에 비해 상대적으로 높은 경향을 보인다. 한편 위치 추정 결과를 타 시스템에 활용하기 위해서는 일정 수준 이상의 위치 정확도가 요구되며, 본 논문에서는 최종 위치 정확도와 고도 정확도의 목표를 각각 CEP (circular error probability) 3m, 평균 제곱근 오차 (RMSE; Root Mean Square Error) 7m를 목표로 하였다. 이에 따라 분석한 각 경로에서의 위치 정확도는 그림 6 및 표 3과 같다. 그림 6 및 표 3으로부터, 제시한 경로에서 이동체의 위치 정확도가 전부 목표 성능인 CEP 3m를 만족하며, 특히 고속 이동체인 포탄에 대해서도 위치 추정 성능을 만족함을 확인할 수 있다.

III. 결론

본 논문에서는 GPS 등 별도의 항법 장치가 존재하지 않는 상

황에서, TLM 신호에 포함된 PN 시각동기 신호에 기반한 고정밀 거리 측정치를 이용하여 TDOA 측정치를 생성한 후 EKF에 기반하여 이동체의 위치를 추정하는 방안을 제안하였다. 소프트웨어 시뮬레이션을 통해, 제안한 방법을 사용하였을 때 이동체의 속도 및 가속도 추정이 가능하며 위치 정확도가 목표 성능인 CEP 3m를 만족함을 보였다. 한편 본 논문에서는 기준국이 이미 설치된 환경을 가정하였으나 실제 상황에서 이러한 조건을 만족하기는 어렵다. 따라서 추후 이동 가능한 기준국에서의 이동체 위치 추적을 위한 추가적인 연구가 필요하다.

References

[1] W. J. Gill, "A comparison of binary delay-lock tracking-loop implementations," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. AES-2, No. 4, pp. 415-424, Jul. 1966.

[2] Z-I. Yamamoto, H. Hirosawa, and T. Nomura, "Dual speed PN ranging system for tracking of deep space probes," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. AES-23, No. 4, pp. 519-527, Jul. 1987.

[3] G. Ren, C. Sun, H. Ni, and Y. Bai, "OFDM-based precise ranging technique in space applications," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 47, No. 3, pp. 2217-2221, Jul. 2011.

[4] B. Sheng, "Enhanced OFDM-based ranging method for space applications," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic*

Systems, Vol. 50, No. 2, pp. 1606-1609, Apr. 2014.

[5] J-I. Boo, J-W. Ha, K-S. Kim, and B. Kim, "Wireless TDD time synchronization technique considering the propagation delay between mobile vehicles," *Journal of Advanced Navigation Technology*, Vol. 23, No. 5, pp. 392-399, Oct. 2019.

[6] Y-M. GU, J-I. Boo, J-W. Ha and B-K. Kim, "Precision Improvement Technique of Propagation Delay Distance Measurement Using IEEE 1588 PTP," *Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 49, No. 6, pp. 515-519, Jun. 2021

[7] T-Y. Kang, K-J. Moon, Y-S. Lee, S-H. Choi, and C-K. Ryoo, "Range Estimation Algorithm Based on Triangulation Using Angle Measurements," *Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 48, No. 4, pp. 277-284, Apr. 2020

[8] S-Y. Kang, T-H. Kim, and W-Z. Chung, "A Novel Clustering Method for Multi-Target Localization Based on Unidentified RSS/AOA Measurements in Wireless Sensor Networks", *Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, Vol. 32, No. 9, pp. 816-825, Sep. 2021

[9] G. Fredrik and G. Fredrik, "Positioning using time-difference of arrival measurements," *Proc. IEEE Conf. Acoustics Speech and Signal Processing(ICASSP)*, Hong Kong, China, pp. 553-556, 2003

[10] Range Commanders Council, "Telemetry Standards," *IRIG STANDARDS 106-20*. Jul. 2020



진 미 현 (Mi-Hyun Jin)

2010년 2월 : 충남대학교 전자전파정보통신공학부 공학학사
 2017년 2월 : 충남대학교 전자전파정보통신공학과 공학박사
 2017년 8월 ~ 현재 : 단암시스템즈(주) 항법기술연구소 재직 중
 ※ 관심분야 : 디지털 신호처리, 위성항법, 항재밍, 소프트웨어 수신기



구 띠 올 라 (Ddeo-Ol-Ra Koo)

2008년 2월 : 남서울대학교 멀티미디어학과 공학학사
 2010년 2월 : 중앙대학교 첨단영상대학원 공학석사
 2014년 12월 ~ 현재 : 단암시스템즈(주) 항법기술연구소 재직 중
 ※ 관심분야 : 디지털 신호처리, 영상처리, 소프트웨어 수신기



김 복 기 (Bok-Ki Kim)

1995년 2월 : 서울대학교 수학과 이학학사
 1997년 2월 : 서울대학교 수학과(정수론) 이학석사
 1997년 1월 ~ 2002년 4월 : 단암전자통신(주) 연구소
 2002년 5월 ~ 현재 : 단암시스템즈(주) 통신기술연구소 재직 중
 ※ 관심분야 : 무선통신, 채널코딩, 디지털 신호처리 구조