

정밀 시각동기를 이용한 TDoA 기반의 위치 탐지

김재완*, 엄두섭^o

TDoA-Based Practical Localization Using Precision Time-Synchronization

Jae-wan Kim*, Doo-seop Eom^o

요 약

신호수신장치들간 시각 동기화는 TDoA를 이용한 위치 탐지에 있어 가장 중요한 전제 사항이 된다. 본 논문에서는 시스템의 시각동기 정확도를 위하여 고정밀도의 OCXO와 DPLL을 이용하여 원자 클럭을 사용하는 GPS 위성으로부터 수신되는 1 pps(pulse per second) 신호에 위상동기 되는 방식을 제안한다. GPS 기반 고정밀 타이밍 레퍼런스의 성능은 근본적으로 매우 우수한 장기간에 걸친 주파수 안정도(long-term frequency stability)를 갖는 GPS 타이밍 신호의 특성을 따라간다고 볼 수 있으며, GPS 타이밍 신호에 동기가 되면 0.001 ppb(part per billion) 급의 초정밀 타이밍 레퍼런스를 통해 시각 동기의 정확도를 향상시킨다. 제안하는, 향상된 시각 동기 정확도를 통해 TDoA 기반의 위치 탐지 기술에서의 측정 오차를 평가하고, 시각동기 오차 개선 방법이 TDoA 기반의 위치 측정 오차를 크게 개선함을 보인다.

Key Words : Localization, Time-Synchronization, TDoA, TPSN, Time Stamping

ABSTRACT

The technology of precise time-synchronization between signal receive devices for separation distance operation can be a key point for the technology with TDoA-based system. We propose a new method for the higher accuracy of system's time-synchronization in this paper, which uses OCXO and DPLL with high accuracy to achieve phase synchronization at 1 pps (pulse per second) of signal. And the method receive time value from a GPS satellite. Essentially, the performance of GPS with high accuracy refers to long-term frequency stability for its reliability. As per the characteristic, as the GPS timing signals are synchronized continuously, the accuracy of time-synchronization gets improved proportionally. Therefore, if the time synchronization is accomplished, the accuracy of the synchronization can be up to 0.001 ppb (part per billion). Through the improved accuracy of the time-synchronization, the measurement error of TDOA-based location detection technology is evaluated. Consequently, we verify that TDoA-based location measurement error can be greatly improved via using the improved method for time-synchronization error.

I. 서 론

사물의 위치를 추정 하는 방법으로는 대표적으로

송신 신호의 감쇄 정도를 이용한 RoA(RSSI of Arrival), 신호의 도달 각도를 이용하는 AoA (Angle of Arrival), 수신기와 위치를 알고자 하

* 주저자 : 고려대학교 전자컴퓨터공학과 미래정보망 연구실, kuzzang78@korea.ac.kr, 정회원
^o 교신저자 : 고려대학교 전자컴퓨터공학과 미래정보망 연구실, eomds@korea.ac.kr, 중신회원
 논문번호 : KICS2012-09-424, 접수일자 : 2012년 9월 6일, 최종논문접수일자 : 2013년 2월 12일

는 송신기와의 신호 도달 시간을 이용하여 거리를 계산하는 ToA(Time of Arrival), 그리고 TDoA(Time Difference of Arrival) 등이 있다.

TDoA^[11,13,16]는 송신신호가 수신 될 때까지의 지연 시간의 차이를 이용하여 위치를 추정하는 기법이다. GPS의 경우, 송신 지점의 위치를 알 수 있다면, 신호 수신 장치들로부터 ToA를 통하여 위치를 추정 할 수 있으나, 본 논문에서 다루고자 하는 언제 신호가 발생하는지 알 수 없는 원거리에 존재하는 위협 물체에 대한 정확한 위치 탐지를 위해서는 신호수신 장치의 위치를 정확히 알고 있을 경우 TDoA가 적합하다.

TDoA의 알고리즘을 정리하면 아래와 같다.

- 1) 2개의 공간적으로 떨어져 있는 수신기 쌍들에서의 TDoA 값을 측정
- 2) 측정된 TDoA 값들과 사전에 알고 있는 수신기 위치들을 사용하여 송신기 (위협 물체)의 위치를 추정

TDoA를 이용한 위치 탐지에서 시각동기화가 정밀하게 되어있지 않다면, 정확한 도달 시간 차이를 알 수 없으며 이를 통해 추정된 위협 물체의 위치는 실제 위치와 비교 시 큰 오차가 발생할 것이다. 전파의 속도는 $3 \times 10^8 \text{m/s}$ 이므로 수신기간 1ns의 시각 동기 오차는 $1 \text{ns} \times 3 \times 10^8 \text{m/s} = 30 \text{cm}$ 로 신호수신장치 자체의 위치오차와 동일하다.

다시 말해, 수신기 자체의 위치를 정확히 알고 있다 하더라도 시각동기의 오차로 인해, 수신기 위치에 오차가 있는 것과 같은 효과가 나타나게 된다. 아울러 신호수신장치의 시각 동기 오차에 의한 위치 오차가 조금이라도 반영되게 되면, TDoA 위치 탐지에 의한 원거리 위협 물체 위치 추정에 오차가 훨씬 크게 반영되게 된다.

따라서 TDoA를 이용한 위치 탐지에 있어 가장 중요한 전제 사항은 수신장치들 간의 시각 동기이다.

이격 된 수신기들을 위한 시각동기화 방법은 일반적으로 그림 1과 같이 분류할 수 있으며, 수신기들 간에 동일한 클럭을 사용하는 공통 클럭 시스템과 서로 다른 클럭을 사용하는 분산 클럭 시스템으로 나눌 수 있다.

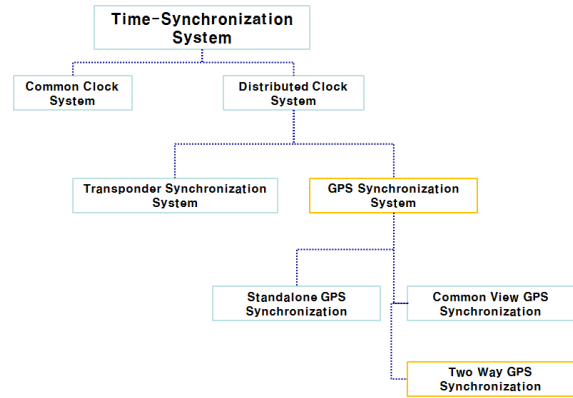


그림 1. 시각 동기화 방법 분류
Fig. 1. Time synchronization classification

동시 측정 GPS 동기 방식의 성능상의 한계를 극복하기 위하여 먼저 수신기들간의 클럭 차이를 정확하게 추정하는 것이 선행 되어야 한다. 이를 위하여 본 논문에서 제안하는 시스템은 그림 2와 같이 양방향 통신링크를 사용한다. 이 방법에서는 수신기간의 양방향 통신링크가 대칭일 경우, 클럭 위상을 상호 전달하는 과정에서 발생하는 지연이 상호 상쇄되어 정확하게 두 수신기 간의 클럭 차를 추정하는 것이 가능하기 때문에 1nsec 이하의 시각동기를 달성 할 수 있다.

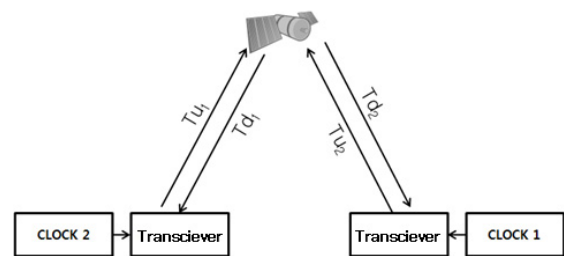


그림 2. 양방향 통신링크
Fig. 2. Two way GPS synchronization

두 수신기간의 거리가 수백 km 이상일 정도로 먼(long baseline) 경우에는 양방향 통신링크로서 통신 위성이 사용되는 것이 일반적이나, 두 수신기간의 거리가 가까운(short baseline) 경우에는 RF링크 방식을 사용한다.

본 논문에서는 근본적으로 양방향 동기 방식을 따르지만, 종래의 양방향 동기 방식과는 다르게 타임스탬프 메시지를 교환하는 시각 동기 프로토콜을 사용함으로써 양방향 통신링크 구축을 위한 하드웨어 구현 부담을 줄이며 시스템의 유연성을 확보한다.

II. 관련 연구

2.1. 유선 네트워크 시각 동기

유선 네트워크를 위한 시각 동기방법으로 NTP(Network Time Protocol)^[10]가 가장 널리 사용되어 왔으나 NTP의 경우 시각동기를 오차를 줄이기 위한 하드웨어적인 고려 없이 타임스탬프 메시지의 교환에 의한 시각동기에 의존하는 방법으로 시각동기 오차가 매우 크다.

또 다른 방법인 IEEE 802.3 이더넷은 프레임의 프리앰블을 이용하여 프레임들의 동기를 맞추는 방식을 사용하고 있다. 그러나 이 방식은 각 노드 및 네트워크 장치들을 거치면서 큐잉(queuing) 및 MAC(Medium Access Control)에 의한 지연으로 인한 지터(Jitter)가 발생하고 결과적으로 네트워크의 크기가 커질수록 시각에 대한 오차의 범위가 커지는 단점이 있다.

반면, IEEE 1588^[44]은 시각동기를 위한 프로토콜로 PTP(Precision Time Protocol)를 채택하고 있으며, 일반적으로 이더넷이나 무선랜을 사용하여 시각동기를 하고 있다. IEEE 1588에서는 시각 동기 오차를 줄이기 위한 하드웨어적인 고려를 하고 있으며 이로 인하여 네트워크 접속이 되어있는 동안 NTP에 비하여 상대적으로 보다 정밀한 시각동기 서비스를 지원할 수 있다.

2.2. 무선 네트워크 시각 동기

무선 네트워크에서의 시각동기는 유선 네트워크 기반의 전통적인 시각동기 기법들과는 달리 무선 통신의 고유 특성들 (저전력 동작, 이동성, 네트워크 자동 형성)로 인해 다음과 같은 항목들이 반드시 고려되어야 한다.

- 1) 통신, 에너지 그리고 무선 네트워크를 위해 처리되어야 할 기타 자원들
- 2) 무선 네트워크의 확장성
- 3) 무선 네트워크를 위한 시각 동기 인프라
- 4) 무선 네트워크의 노드 설정

첫째, 무선 통신 기능을 갖는 대부분의 시스템들은 이동성을 제공하기 위하여 내부에 배터리를 장착하여 동작하기 때문에 전력 사용에 제약이 따른다. 따라서 시스템의 하드웨어와 소프트웨어는 반드시 에너지 사용을 최소화 할 수 있도록 설계되어야 하며, 데이터 통신의 회수에 따라 에너지의 소모가 크게 결정된다. 이러한 에너지 소모에 대한 고려를 바탕으로 네트워크를 통한 시각동기 절차가 고려되어야 한다.

둘째, 네트워크를 구성하는 노드의 개수는 각 노

드의 이동성으로 인하여 시간에 따라 크게 변화될 수 있다. 그리고 경우에 따라서는 특정한 영역에 많은 수의 노드들이 밀집되어 존재할 수도 있다. 이러한 환경에서 모든 노드들이 네트워크를 형성하고 서로간의 통신을 가능토록 하는 확장성이 고려되어야 한다.

셋째, 네트워크를 형성하는 각각의 노드는 각 응용에 필요로 하는 목적 노드와 통신할 수 있어야 한다. 이 때, 데이터 통신을 위한 인프라(Infrastructure or Network Topology)와 각 노드간의 시각을 동기화하기 위한 인프라의 구조는 달라질 수 있다. 따라서 시각동기를 위한 별도의 인프라의 형성 기법 또한 고려되어야 한다.

마지막으로, 무선 노드의 통신은 주위에 이웃한 다른 노드에게 영향을 준다. 이러한 영향에 의한 문제가 발생되지 않도록 각 노드는 자신의 작업 및 스케줄러 등의 기능들을 설정할 수 있도록 설계되어야 한다.

다양한 무선 네트워크를 이용한 시각동기화 기술이 있으나^[1-3,17,18], 본 논문에서 제안하는 시스템과 관련 있는 시각동기는 RBS^[4], TPSN^[5], GPS^[8,9,12]를 이용한 시각 동기 기술이다.

2.2.1. RBS (Reference Broadcast Synchronization)

기존의 시각 동기 방식들은 대부분 원격 시각 서버와 클라이언트를 동기화 하는 방식으로 Packet 송수신시에 그림 3과 같이 send time, access time, propagation delay 그리고 receive time 이 소요되고 이 중에서 send time과 access time은 예측하기 어렵다는 문제점을 갖는다.

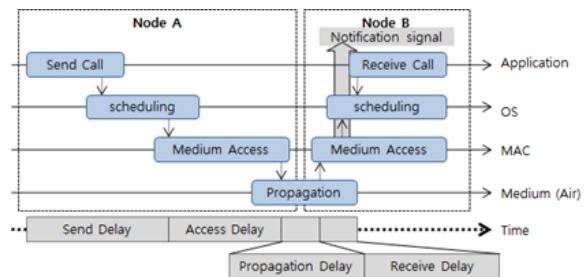


그림 3. Sender to receiver 방식에서의 메시지 송수신 Fig. 3. Message transfer in sender to receiver

따라서 기존의 sender to receiver 시각 동기 방식을 따르지 않고 receiver to receiver 방식을 적용하여 reference sender가 물리계층의 방송기법(broadcast method)을 이용하여 주기적으로

이웃 노드들에게 레퍼런스 비컨(reference beacon)을 보내고, 이를 수신한 노드들은 자신의 타임스탬프를 저장한다. 이때, 계산되는 타임스탬프는 비컨 메시지를 받은 시간을 참조로 하여 지역적인 시간으로 계산을 수행한다. 그리고 각각의 타임스탬프를 교환하여 전송간의 시간 오프셋을 계산하여 동기화를 하게 된다.

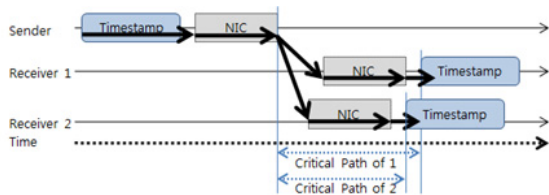


그림 4. RBS 방식에서의 메시지 송수신
Fig. 4. Message transfer in RBS

그림 4에서와 같이 RBS는 Critical Path가 NIC(Network Interface Card)에서 Receiver가 수신하기까지 걸리는 과정이다. NIC에서 네트워크로 패킷을 전송하는 시점에서 타임스탬프를 사용함으로써 send time과 access time에 의한 오차를 줄일 수 있는 장점이 있다. 또한 무선 통신 물리계층의 방송 특성을 이용함으로써 네트워크 자원의 효율성을 높일 수 있다.

2.2.2. TPSN (Timing-sync Protocol for Sensor Networks)

TPSN은 센서 네트워크와 같이 제한된 에너지 자원과 많은 수의 노드를 가지는 무선 네트워크 환경에 적합한 무선 네트워크 시각동기 프로토콜 중 하나이다.

TPSN은 시각동기를 위하여 루트 노드(root node)로부터 시작하여 레벨(level)을 가지는 계층적 구조(hierarchical structure)의 네트워크를 형성한다. 그리고 노드 사이에 동기를 맞추기 위하여 상위 레벨의 노드와 타임스탬프 메시지를 교환함으로써 오프셋과 전달 지연을 계산하고, 자신의 시각을 보정하게 된다.

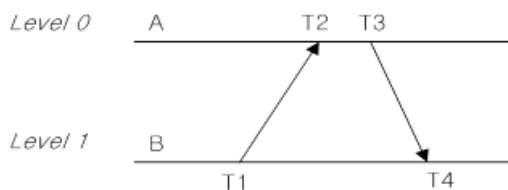


그림 5. TPSN에서의 2단계 메시지 교환
Fig. 5. Message transfer in TPSN

그림 5와 같이 TPSN에서는 2단계 메시지 교환을 통해, 노드B가 노드A에 동기를 맞추게 된다.

T1은 센서노드 B의 송신 시각, T2는 이 메시지를 센서노드 A가 수신한 시각, T3는 센서노드 A가 Ack 메시지를 송신하는 시각, T4는 Ack 메시지를 센서노드 B가 수신한 시각 정보를 나타낸다. 2단계의 메시지 교환이 끝나게 되면, 센서노드 B는 식 (1)에 의해 타이머 오프셋(Δ)과 전파지연 시간(d)을 구할 수 있으며, 자신의 타이머 값에서 Δ 만큼 더하여 보정을 하게 되면 센서노드 A의 타이머와 동기를 유지할 수 있게 된다.

$$\Delta = \frac{(T_2 - T_1) - (T_4 - T_3)}{2} \quad (1)$$

$$d = \frac{(T_2 - T_1) + (T_4 - T_3)}{2}$$

TPSN에서는 클럭 간 주파수 차에 따른 스큐에 대한 보정은 수행하지 않는다. 따라서 어느 한 순간 노드 간에 시각동기화가 되었다 할지라도 시간이 경과함에 따라서 노드 간 클럭 차이는 점점 더 커지게 되며, 이에 따라 재동기화를 해주어야 할 필요성이 생기게 된다. 만약 다른 계층(MAC, Network, Application 계층)에서 요구하는 동기 정확도가 높다면 이에 따라 동기 주기는 짧게 가져가야만 한다. 잦은 동기화로 인한 패킷 송수신은 많은 전력의 소모를 야기하기 때문에, 한정된 자원으로 동작하는 센서 네트워크에서는 단점으로 작용할 수 있다.

2.2.3. GPS를 이용한 시각동기화 기술

GPS를 이용하면 사용자의 현재 위치뿐만 아니라 정확한 시각정보도 얻을 수 있게 된다. GPS 위성 자체 내에 탑재된 2개의 세슘 원자시계 및 2개의 루비듐 원자시계를 통하여 UTC(Universal Time Coordinated) 포맷의 시각정보가 GPS 신호를 통하여 송출된다.

GPS를 통해 동기를 하는 과정에서 시각동기의 성능, 즉 정확도를 결정짓는 중요한 요소는 PPS 신호의 정확도이다. PPS 신호의 정확도는 GPS 모듈 제품들마다 조금씩 다르다. 어떤 제품은 1 PPS의 신호를 아예 지원하지 않는 경우도 있고, 어떤 제품은 1 PPS의 신호뿐만 아니라 100 PPS의 신호도 지원하는 것도 있다. 또한, 제품에 따라 최대 오차가 수 us인 제품이 있는 반면, 15ns 이하인 것도 있다.

2.2.4. 시각 동기의 오차 요인 분석

두 노드간에 시각 동기화를 위해서는 서로 간의 시각 정보를 타임스탬프 메시지를 사용하여 교환할 수 있어야 한다. 이러한 타임스탬프를 송수신 하는 지점을 최대한 물리계층에 가깝도록 하여 타임스탬프 전달에 따른 지연 변동을 줄이는 방식으로 시각 동기 정확도를 향상시키는 것이 필요하다. 여기서, 패킷 송신 시의 타임스탬프 시점은 최대한 늦어야 하며, 패킷 수신시의 타임스탬프 시점은 최대한 빨라야 한다.

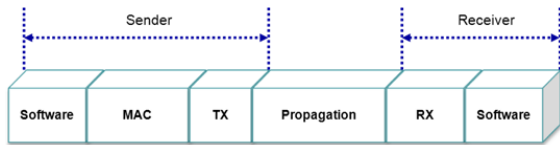


그림 6. 타임 스탬프 송수신 과정에서의 지연 모델
Fig. 6. Latency model in time stamping

(1) 타임 스탬프 송수신 과정에서의 오차

그림 6은 무선 링크 상에서 두 수신기가 패킷(타임스탬프 메시지 전송을 위한)을 주고받는 과정에서 생기는 패킷 지연을 모델링한 것이다. 패킷 지연은 크게 3가지 - 송신 과정에서의 지연, 무선 링크를 통해 전송되는 과정에서의 전파 지연, 수신 과정에서의 지연으로 구분할 수 있다. 송신 과정에서의 지연에는 시각동기 어플리케이션 소프트웨어에 의해 발생하는 send time, MAC 계층에서 무선 채널에 접근하는 데 소요되는 access time, 물리계층에서 패킷이 비트별로 전송되는 데 소요되는 transmission time으로 이루어진다. 또한 수신 과정에서의 지연에는 물리계층에서 비트 스트림을 수신하여 MAC 계층까지 올리는데 소요되는 reception time과 이후 응용계층의 시각동기 어플리케이션까지 타임스탬프 메시지를 전달하는데 소요되는 receive time으로 이루어진다.

(2) 물리적 오차 요인

CPU의 외부 클럭으로는 수정 발진자(crystal oscillator)를 많이 사용한다. 수정 발진자의 경우, 이상적으로는 해당 주파수의 클럭을 발생시키지만 에이징(aging) 또는 온도, 습도, 공급 전압의 변화 등에 의해 실제적으로는 해당 주파수에서 약간 어긋난(skew) 주파수의 클럭을 발생시킨다^{6,7)}. 이러한 클럭 스큐로 인해, 수신기 간에 특정 순간 동기가 맞춰져 있다 하더라도 시간이 지남에 따라 두 수신기 클럭의 시간은 서로 멀어지게 된다. 버클리 모트 센서노드의 내부 오실레이터(MC-156)의 경우, 서

로 다른 두 노드 간 가장 큰 오차를 가질 때 4.75 μ s/s를 갖는다고 한다. 이 두 노드는 어느 특정 시점에 서로 정확히 동기화되었다 할지라도, 시간이 경과함에 따라 클럭 스큐로 인해 두 노드 간 클럭차는 점점 커지게 된다. 따라서 장기적인 운용이나 전자 감시와 같은 특수한 목적이 있을 경우에는 시각 동기화에 대한 충분한 고려가 필요하며 주어진 환경 내에서 정확한 동기를 맞출 수 있는 알고리즘의 개발이 요구된다.

III. 제안하는 시스템

3.1. TDoA를 이용한 원거리 위치 추정 시스템

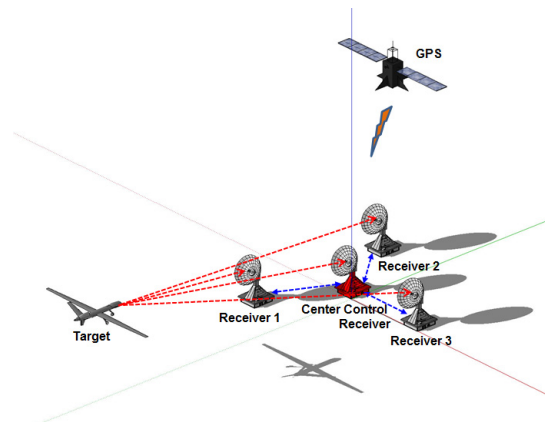


그림 7. TDoA 위치 추정 시스템
Fig. 7. Localization system using TDoA

본 논문에서 다루고자 하는 TDoA를 이용한 원거리 위치 추정 시스템은 그림 7과 같다. GPS를 기본으로 하나의 중앙통제 수신기와 TDoA를 이용한 3차원 위치 추정을 하기 위한 3개의 별도 수신기로 이루어진다.

원거리의 위치한 Target에 중앙통제기가 쏜 신호가 반사 되어 돌아오면, 각각의 수신기에 도착한 시간의 차이를 이용하여 TDoA를 통하여 원거리 위협 물체의 위치를 파악한다.

3.2. 정밀 시각 동기를 통한 TDoA 오차 감소

TDoA 기반으로 원거리 위협 감시 및 위협 위치를 실시간 탐지하는 전자감시 장비의 개발을 위해서는 1) 고감도 디지털 신호 수신 기술, 2) 이격 운용 신호수신장치간 정밀 동기화 기술, 3) TDoA를 이용한 위협 위치 실시간 추정 및 추적 기술이 요구된다. TDoA 기반 전자감시 장비에서 이격 운용 장치간 정밀한 시각 동기화가 이루어지지 않으면 신호수신장치들로부터 수신한 신호들을 통해 정확한

TDoA 값을 얻을 수 없으며 이는 위치 추정 오차에 직접적인 영향을 준다. 따라서, 위에서 언급한 기술들 중에서 2) 이격 운용 신호수신장치간 정밀 동기화 기술은 TDoA 기반 위치 탐지에 있어 중요한 핵심 전제 기술이라 할 수 있다.

결과적으로, 신호수신장치들간 시각 동기화는 TDoA를 이용한 위치 탐지에 있어 가장 중요한 전제 사항이 된다. 시각동기와 더불어 신호수신장치(레이더)의 위치 정확도 역시 TDoA를 사용한 위치 탐지를 하는 데 있어 중요한 전제 사항이기는 하나, 신호수신장치의 특성상 이동통신망의 기지국과 같이 정확한 지리상 좌표가 알려져 있는 고정된 위치에 설치되어 운용될 가능성이 크기 때문에 신호수신장치 자체의 위치 오차는 무시할 수 있다. 그러나, 신호수신장치 자체의 위치를 정확히 알고 있다 하더라도 시각동기의 오차가 발생하면, 신호수신장치의 위치에 오차가 있는 것과 같은 효과가 나타나게 된다.

아울러 신호수신장치의 위치에 오차(시각동기 오차로 인한)가 조금이라도 반영되게 되면, TDoA 위치 탐지에 의한 원거리에 위치한 물체의 추정 위치 오차는 훨씬 크게 반영되게 된다. 따라서 본 논문에서는 TDoA의 위치 추정 오차를 감소하기 위해서 정밀 시각 동기를 가능하게 하는 시스템을 제안한다.

3.3. 시스템의 동작 개요

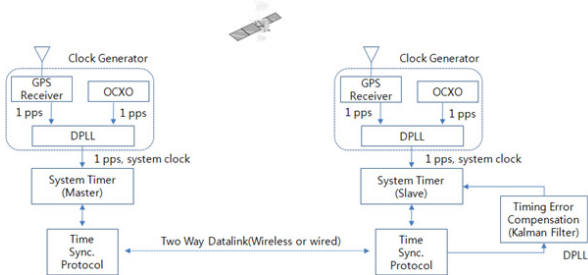


그림 8. 시각동기 시스템 개요도
Fig. 8. Overview of time synchronization system

제안하는 시스템의 대략적인 전체 구조는 그림 8과 같다. 마스터 및 슬레이브 노드의 클럭 생성부(clock generator)는 GPS 수신기, OCXO (short term 안정도 0.005 ppb 급 사용), DPLL 등으로 구성되며, DPLL을 사용하여 GPS 수신기에서 제공하는 1 PPS 신호에 OCXO를 동기 시킴으로써 0.001 ppb(parts per billion) 정도의 매우 주파수 안정도가 높은 시스템 clock (1 GHz)을 생성한다. 한편 DPLL에 입력되는 GPS 수신기의 1 PPS 신호의 경우 전리층에서의 반사

및 전파속도 변화, 다중경로 수신 등의 영향으로 30ns 정도의 short term 지터를 갖지만 근본적으로 매우 안정도가 높은 GPS 위성의 원자 클럭(atomic clock)에서 생성된 신호이기 때문에 DPLL의 loop filter를 통하여 필터링 할 경우 0.3ns 정도로 지터를 줄일 수 있다.

동기오차를 추가적으로 줄이기 위해서는 두 노드의 동기 오차를 정확히 알아내어 이를 보정하는 것이 필요하다. 이를 위하여 양방향 통신링크를 사용하여 두 노드의 시각동기 프로토콜간에 타임스탬프 메시지를 교환함으로써 동기 오차를 추정한다. 정확한 동기오차를 알기 위해서는 슬레이브에서 마스터로 메시지를 전송할 때 걸리는 지연과 반대로 마스터에서 슬레이브 메시지를 전송하는데 걸리는 지연이 동일해야 하기 때문에 통신링크를 통한 메시지 전달과정에서의 처리를 가급적 하드웨어로 처리하여 지연 변동을 최소화하는 것이 바람직하다. 한편 노드들의 시스템 클럭은 빠를수록 디지털적인 신호처리로 인한 지연 변동을 최소화할 수 있다.

슬레이브 노드에서는 시각동기 프로토콜을 사용하여 획득한 시각동기 오차 데이터를 칼만 필터(Kalman filter)를 사용하여 처리함으로써 슬레이브 클럭이 마스터 클럭에 정확하게 동기될 수 있도록 한다. 일단 이러한 방식으로 두 노드가 시각동기 되면, 두 노드가 GPS 타이밍 레퍼런스에 동기된 상태에서는 0.001 ppb 정도의 주파수 안정도를 갖기 때문에 10 분의 시간이 재차 동기되지 않는 상태로 지나도 0.6ns 정도의 시각동기 오차가 발생할 것으로 예상된다. 이는 두 노드 모두 주파수 안정도가 매우 높은 GPS 타이밍 레퍼런스에 동기 되었기 때문이다.

3.4. 시스템의 하드웨어

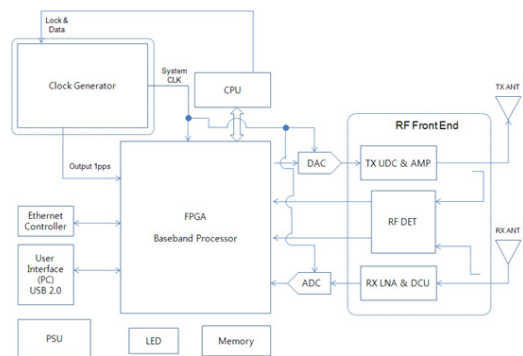


그림 9. 시각동기 시스템의 하드웨어 구조
Fig. 9. Hardware of time synchronization system

3.5.1. FPGA를 통한 MAC 계층 Time stamping

MAC 계층에서의 time-stamping을 사용할 경우 앞서 설명한 시각동기 프로토콜의 오차 요인들 중에서 해당되는 불확실(uncertainty) 요소는 Transmission time (TX), Propagation time, Reception time (RX) 등이다.

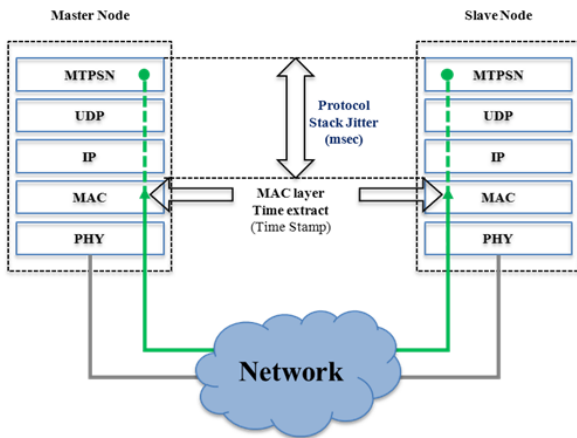


그림 12. MAC 계층 Time stamping
Fig. 12. Time stamping in MAC layer

3.5.2. FPGA를 통한 PHY 계층 Time stamping

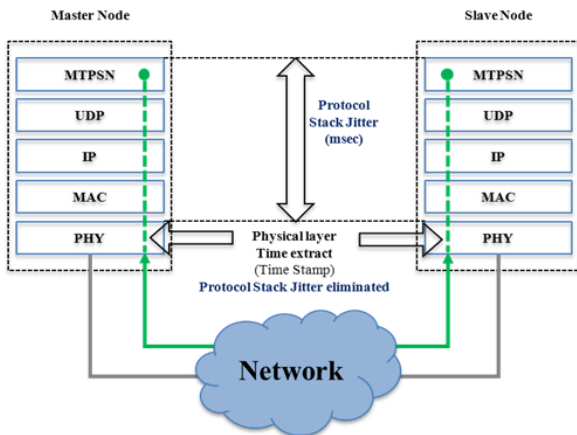


그림 13. PHY 계층 Time stamping
Fig. 13. Time stamping in PHY layer

3.5.3. 제안 시스템의 시각동기 프로토콜

그림 14는 제안 시스템의 시각동기 프로토콜인 MTPSN의 동작이다. MTPSN은 기존에 널리 사용되고 있는 TPSN 프로토콜을 개량한 것으로 TPSN에 비하여 시각동기에 필요한 타임 스탬프 메시지 수가 대폭 감소되어 무선 데이터링크의 부하를 줄일 수 있을 뿐만 아니라 시각동기에 걸리는 시간

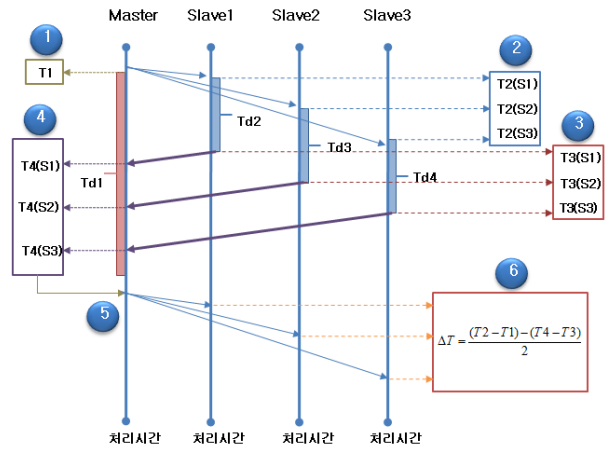


그림 14. MTPSN의 동작 개요
Fig. 14. Process of MTPSN

을 단축할 수 있다. 그림 14에서 ΔT 는 마스터 노드 및 슬레이브 노드간의 클럭차(오프셋)을 의미한다.

MTPSN의 특징은 기존 TPSN 방식에 비하여 동기 메시지의 전송 횟수가 감소되며 수신장치의 확장이 용이하고, Master와 Slave 간 시각동기 수행 시간이 단축 된다. RBS 방식에서는 전파지연을 무시하기 때문에 수신거리가 원거리일 경우 오차가 발생하지만, MTPSN 방식에서는 전파지연이 서로 상쇄되기 때문에 수신시간 거리가 원거리일 경우에도 적용이 가능하다.

3.5.4. 실시간 클럭 스큐 추정 및 보정

기존의 대표적 시각동기 기법인 RBS 또는 TPSN에서는 클럭 간 오프셋만을 보정할 수 있다. 그러나 클럭 소스인 크리스털 오실레이터는 온도, 습도 등의 환경 요인에 의해 정확히 동일한 주파수로 동작하지 않고 약간씩 어긋나도록 동작한다.

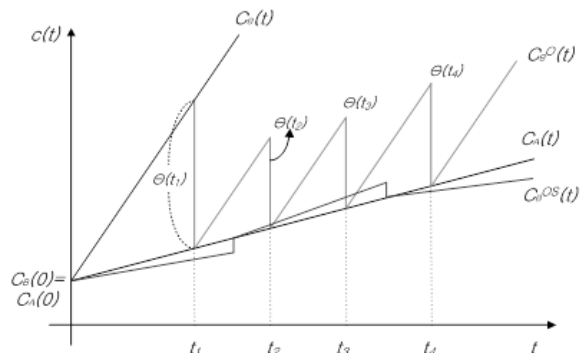


그림 15. 클럭 스큐의 영향
Fig. 15. Impact of clock skew

노드 A의 클럭(CA(t))과, 이와 동기화하고자 하는 노드 B의 클럭(CB(t))의 보정 과정을 나타낸

다. 그림에서 초기에($t=0$ 일 때) 두 노드의 클럭값은 동일하다고 가정한다. 각각의 클럭은 고유의 오실레이터 주파수로 동작하기 때문에 동일한 클럭값으로 시작했다 할 지라도 시간이 지남에 따라 서로 멀어지게 된다. 만약 노드 B가 t_1, t_2, t_3, t_4 시점에서 노드 A와의 클럭 오프셋 값을 알게 되어 오프셋 보정을 취하게 되면, 이때의 클럭은 $CBO(t)$ 가 된다. 그러나 오프셋 보정만으로는 주파수 차이에 따라 클럭이 멀어지는 것을 해결할 수 없으므로, $CBO(t)$ 역시 같은 속도로 $CA(t)$ 와 멀어지게 된다. 이는 시각동기(오프셋 보정) 주기를 길게 하면 할수록 시각동기 오차도 점점 커진다는 것을 의미한다. 정확도를 높이기 위해 동기 주기를 아주 짧게 할 수도 있지만, 이는 많은 통신 오버헤드를 야기하여 바람직하지 않다. 만약 $CA(t)$ 와의 클럭 스큐를 정확히 추정할 수 있다면, $CBO(t)$ 와 같이 $CA(t)$ 에 근접하는 클럭을 유지시킬 수 있을 것이다. 그러나 오프셋을 추정하는 과정에서의 여러 불확실성, 크리스털의 에이징 현상, 그리고 온도, 습도 변화에 따른 주파수 잡음으로 인해 클럭 스큐를 정확히 측정한다는 것은 매우 어렵고, 가능한 한 정확하게 클럭 스큐를 추정할 수밖에 없다.

오프셋 보정은 short-term stability는 좋으나 long-term stability를 유지하는 데에는 불리한 반면 스큐 보정은 long-term stability를 유지할 수 있도록 한다. 따라서 이 두 가지 보정을 동시에 고려하여, 즉 오프셋 보정이 수행될 때마다 보정한 오프셋 값을 스큐 보정의 새로운 입력으로 반영하여 재귀적 최소 제곱법(Recursive Least Squares), Kalman 필터^[15] 등을 통해 추정 오차가 최소화되는 스큐의 값을 추정할 수 있다.

IV. 성능 분석

4.1. 기본 시험 환경

Target Position: (400, 0, 5); Receivers Positions:(0, 0, 0)를 중심으로 아래의 그림 16과 같은 정삼각형 형태로 배치(단, 단위는 km)되며 다음과 같은 네 가지 위치정보를 가진다.

$[0, 0, 0], [0, 30, 0], [-10\sin(60^\circ), -10\cos(60^\circ), 0], [10\sin(60^\circ), -10\cos(60^\circ), 0]$

Target 과 전자탐지간의 실제 거리와 시각동기 오차를 반영한 추정 거리를 계산하여 시뮬레이션에 반한다. 실제 거리는 (400, 0, 5)의 Target 위치와 각 전자탐지와의 거리이며, 추정 거리는 시각동

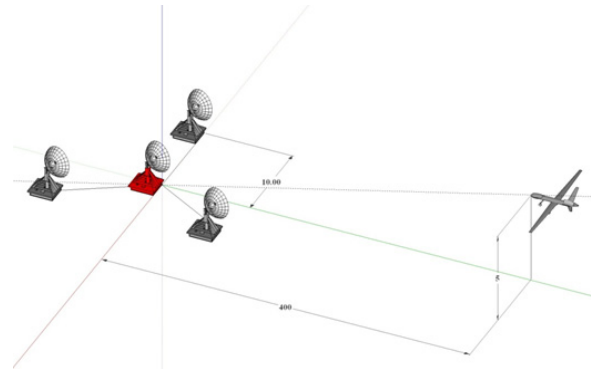


그림 16. Target과 receiver들의 배치
Fig. 16. Arrangement of target and receivers

기오차(1ns)를 실제거리에 반영하여 적용 한다. 오차는 1nsec를 기준으로 하면 $1ns \times (3 \times 10^8 m/s) = 0.3$ 이다.

표본집단에 신뢰수준을 95% 를 잡아서 반영하면 $\mu - 1.96\sigma$ 와 $\mu + 1.96\sigma$ 이므로 따라서 정규분포를 평균을 0, 표준편차를 0.08로 하여 성능평가에 반영하였다.

위치에러를 최소화하기 위한 최적화 단계로 MSE(Minimum Square Error) 를 통한 위치 추정하며, 위치 추정을 통해서 나온 x', y', z' 값과 실제 Target 의 위치와의 거리차를 통해서 위치오차를 도출하게 된다. MSE 통한 위치추정과 실제 Target 를 기준으로 도출된 위치오차의 경우 각각 100 회를 시행한다.

또한 각 시험 시 제안 시스템의 목표인 1nsec와 별도로 2nsec, 3nsec, 4nsec, 5nsec에 대해서도 각각 실시하여 시각동기의 정확도가 개선 될수록 TDoA를 통한 위치 추정 오차가 크게 개선됨을 보인다. 이는 1nsec와 비교하기 위한 것으로 각각의 오차는 제안 하드웨어의 성능에 영향을 주는 요인들 및 제안 알고리즘을 부분적으로 미적용시 발생할 수 있는 오차이다.

4.2. 고정 타겟에 대한 시험

4.2.1. 시각동기 오차 증가

기본적으로 16에서 설명한 시험 환경을 따르고, 제안 시스템의 목표인 1nsec와 별도로 2nsec, 3nsec, 4nsec, 5nsec에 대하여 시험한 결과이다.

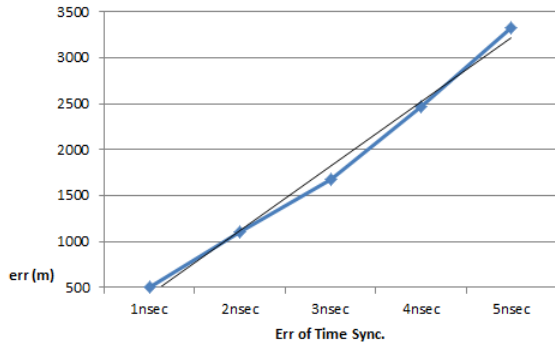


그림 17. 시각동기 오차 증가에 따른 위치 추정 오차
Fig. 17. Location error according to time synchronization error

그림 17은 시각동기 오차 증가에 따른 위치 추정 오차를 보여준다. 1nsec에서 504.9m의 오차를 가지며 5nsec에서 최대 3320.76m의 오차를 갖는다. 1nsec에서 5nsec로 오차가 증가할 경우 비선형적으로 시각동기 오차가 증가 할수록 위치 추정 오차가 크게 늘어나는 것을 알 수 있다. 그래프에서 표현한 직선은 시각동기 오차 증가에 따른 위치 추정 오차를 쉽게 비교할 수 있도록 한 것이다.

4.2.2. 수신기 사이의 거리 변화

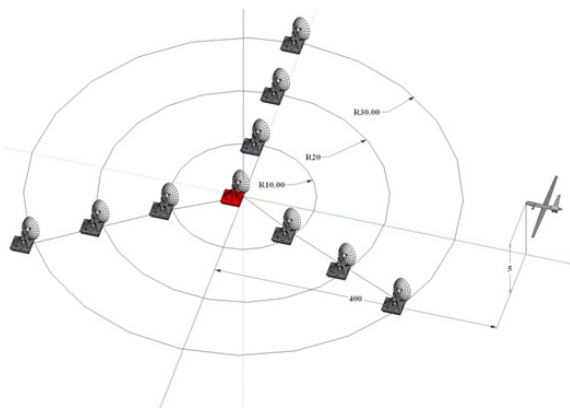


그림 18. Receiver들간 거리 변화
Fig. 18. Distance variation between receivers

그림 18은 전자탐지기간 거리를 10km~30km 까지 5km 단위로 변화시켰을 때의 모습을 보여주며, 각 해당 되는 거리에 시각동기 오차를 변화 시켜 가며 시뮬레이션을 통해 오차를 비교하였다.

그림 19에서 보듯이 전자탐지기간 거리가 멀어질수록 보다 정확한 위치정보를 가질 수 있다. 전자탐지기간 거리가 멀다는 것은 보다 넓은 평면상에서 전자탐지기들이 분포하는 것으로써 실제 타겟과 전자탐지기들간의 거리차가 많이 발생하게 되어 쌍곡선을 이루는 면적이 보다 작아지게 되는 것을 의미

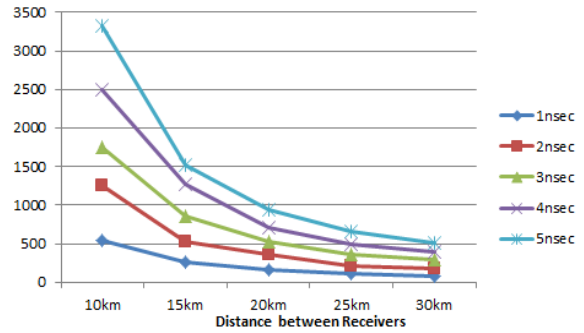


그림 19. 수신기 사이의 거리 증가에 따른 위치 추정 오차
Fig. 19. Location error according to distance between receivers

한다. 여기서 보다 작은 면적이라 함은 거리차가 작게 발생했을 때의 큰 면적에 비해서 위치 범위가 줄어드는 것을 의미하므로 이를 바탕으로 TDoA 기반의 위치 추정이 이루어져서 위와 같은 결과를 가지게 된다.

4.2.3. 수신기와 타겟의 거리 변화

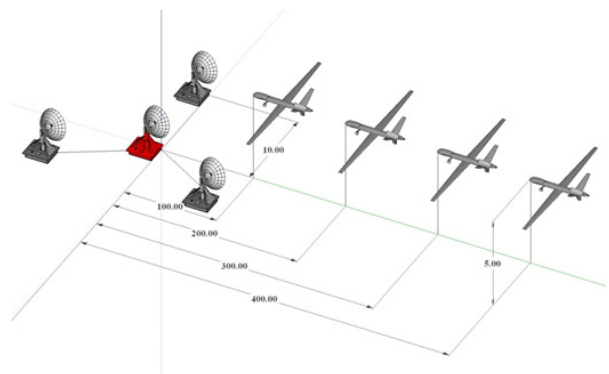


그림 20. Target과 Receiver 사이의 거리 변화
Fig. 20. Distance variation between target and receiver

그림 20은 타겟과 전자탐지기간의 거리를 100km~400km까지 100km 단위로 변화시켰을 때의 모습을 보여주며, 각 해당 되는 거리에 시각동기 오차를 변화 시켜 가며 시뮬레이션을 통해 오차를 비교하였다.

그림 21과 같이 타겟과 전자탐지기간의 거리가 가까울수록 보다 정확한 위치정보를 가질 수 있지만 결과적으로 오차율로 볼 때 성능 자체가 개선 된 것은 아니다. 앞에서 언급한 것처럼 타겟과 전자탐지기간의 거리가 가깝다는 것은 쌍곡선을 이루는 면적이 거리가 먼 것과 비교했을 때 상대적으로 작은 것

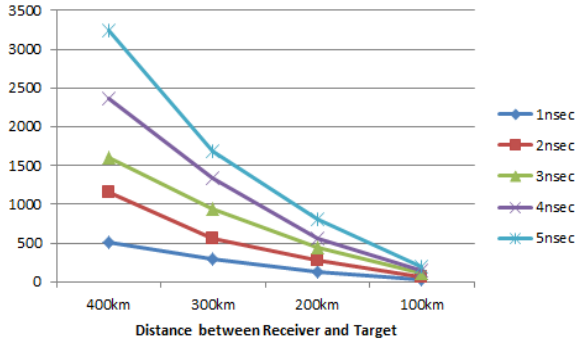


그림 21. 타겟과 수신기 사이의 거리 변화에 따른 위치 추정 오차
Fig. 21. Location error according to distance between target and receiver

이다. 그래서 이 역시 위치 범위가 줄어드는 것들의 미하므로 이를 바탕으로 TDoA 기반의 위치 추정이 이루어져서 위 그림과 같은 결과를 가지게 된다. 하지만, 탐지거리가 감소하는 만큼 위치오차가 감소하는 것은 아니므로 개선은 되지 않는 것이다.

4.3. 등속도 이동 타겟에 대한 시험

그림 16에서 설정된 타겟이 원, 직선(수평, 수직) 등의 형태로 움직일 때 평균적인 위치 추정값이 어떻게 되는지를 시험하였다. 시험은 원, 수평선, 수직선 3가지 궤도의 경우로 해서 진행하였으며 각각의 궤도에 대해서 시각동기 오차를 변화하여 시험하였다.

4.3.1. 원 궤도

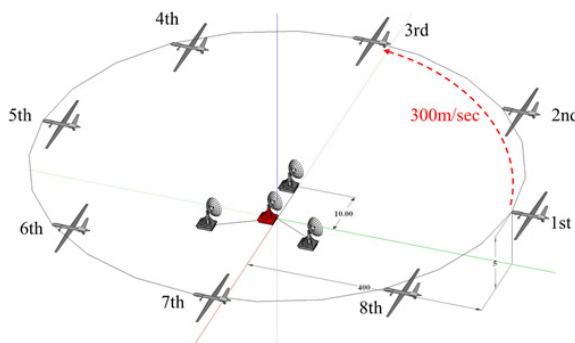


그림 22. 타겟의 이동 경로 (원 궤도)
Fig. 22. Trajectory of target (circle orbit)

타겟의 속도는 300m/sec로 등속도로 움직인다. (단, 원 궤도상의 전자탐지기 기준) 원 궤도상에서 위와 같은 속도로 타겟이 움직일 때 8번의 측정이 수행되며 각각의 위치에서의 좌표는 아래와 같다.

- ✓1st : (400, 0, 5), ✓2nd : (200√2, 200√2, 5),
- ✓3rd : (0, 400, 5), ✓4th : (-200√2, 200√2, 5), ✓

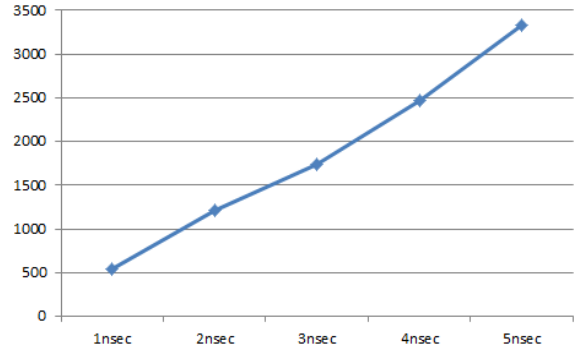


그림 23. 타겟이 원 궤도를 등속도로 운동할 때의 위치 추정 오차
Fig. 23. Location error in circle orbit

- ✓5th : (-400, 0, 5), ✓6th : (-200√2, -200√2, 5), ✓
- ✓7th : (0, -400, 5), ✓8th : (200√2, -200√2, 5)

속도를 가진 물체를 측정하므로 각 위치에서의 측정은 1회로 한정한다.

그림 23은 타겟이 원 궤도를 등속도로 운동할 때의 위치 추정 오차를 보여준다. 고정 물체 대비 약 7% 정도 오차를 가지며, 전파가 전파되는 속도에 의해서 발생하는 오차는 300km 정도 거리 차를 가질 경우 0.3m로 작은 값을 가지게 되어 전파가 반사되어 돌아오는 시간 동안 발생하는 거리 오차는 반영하지 않았다.

4.3.2. 수평선 궤도

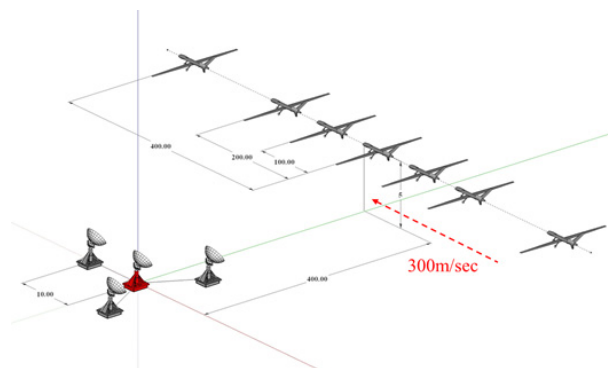


그림 24. 타겟의 이동 경로 (수평 궤도)
Fig. 24. Trajectory of target (horizontal orbit)

직선 궤도 길이는 기준좌표(400,0,5)을 중심으로 (400,400,5)와 (400,-400,5)까지의 800km 가정한다. 타겟 속도는 300m/sec 등속도로 움직이며, 직선 궤도상에서 위와 같은 속도로 타겟이 움직일 때 기준점을 포함한 총 9번의 측정이 수행된다. 각각의 위치에서의 좌표는 아래와 같다.

- ✓1st : (400, -400, 5), ✓2nd : (400, -300, 5), ✓

3rd : (400, -200, 5), \surd 4th : (400, -100, 5), \surd 5th : (400, 0, 5), \surd 6th : (400, 100, 5), \surd 7th : (400, 200, 5), \surd 8th : (400, 300, 5), \surd 9th : (400, 400, 5)

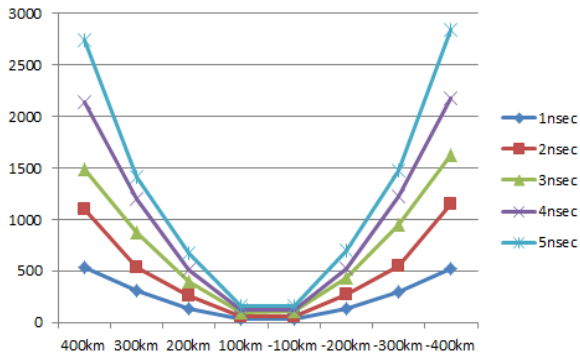


그림 25. 타겟이 수평 궤도를 등속도로 운동할 때의 위치 추정 오차
Fig. 25. Location error in horizontal orbit

고정 타겟과 마찬가지로 타겟과 수신기의 위치가 가까워질수록 오차는 줄어든다. 고정 타겟 대비 약 5%정도의 오차가 더 생기며, 원 거리 일 경우에 시각 동기 오차에 더욱 민감하다.

4.3.3. 수직선 궤도

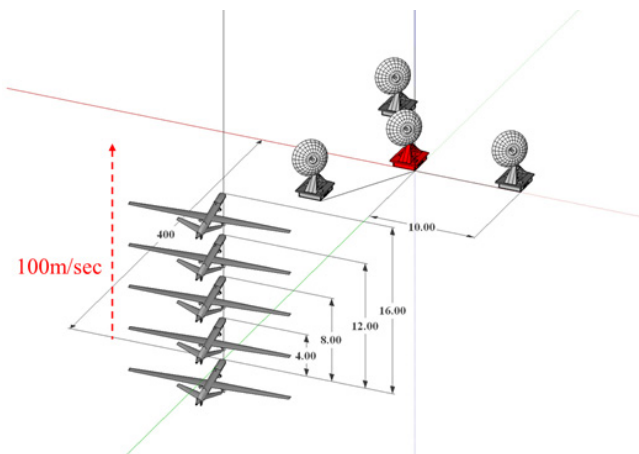


그림 26. 타겟의 이동 경로 (수직 궤도)
Fig. 26. Trajectory of target (vertical orbit)

직선 궤도는 기준좌표(400,0,0)을 중심으로 (400,0,0)과 (400,0,16)까지의 16km 가정하며 4km 단위로 측정한다. 이때, 타겟 속도는 100m/sec 등속도로 움직이는 것으로 한다. 직선 궤도상에서 위와 같은 속도로 타겟이 움직일 때 기준점을 포함한 총 5번의 측정이 수행되며, 각각의 위치에서의 좌표는 아래와 같다.

\surd 1st : (400, 0, 0), \surd 2nd : (400, 0, 4), 3rd : (400, 0, 8), \surd 4th : (400, 0, 12), \surd 5th : (400, 0, 16)

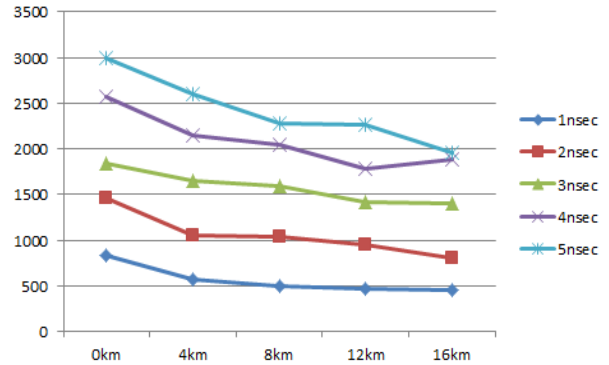


그림 27. 타겟이 수직 궤도를 등속도로 운동할 때의 위치 추정 오차
Fig. 27. Location error in vertical orbit

수신기의 위치가 고도상으로 모두 0km이므로 타겟의 고도가 0km일 경우에 고도에 의해서 발생하는 시각차가 존재하지 않으므로 오차가 크게 나타났다. 전체 거리에 비하여 수직 궤도의 변화량이 작게 되어 고도에 따른 오차의 영향은 적은 편이다.

V. 결론

본 논문에서는 시스템의 시각 동기 정확도를 위하여, 정밀도가 높은 OCXO와 DPPL을 사용하여 원자 클럭을 사용하는 GPS로부터 수신 되는 1PPS에 신호에 위상 동기 되는 방식과 Two way 링크를 사용하고, Skew를 보상하여 최종적으로 1nsec의 시각 동기 오차를 갖는 시스템을 제안하였다.

성능 평가를 통하여 신호수신장치의 위치 오차가 반영되면 TDoA 위치 탐지에 의한 원거리의 물체 추정 위치 오차가 반영됨을 확인 하였다.

5nsec 대비 약 15%정도로 1nsec에서 오차가 감소하였으며, 수신기 사이의 거리가 멀어질수록 각 수신기 사이의 거리차가 커지게 되어 오차가 감소하는 것을 확인하였다. 한편, 원거리 타겟의 고도 오차에 대하여는 수신기의 위치가 모두 동일 평면상에 있고, 고도는 수평 거리보다 매우 작은 값을 가지므로, 공간상의 제약이 없는 경우 수신기의 고도차를 확보하는 것도 중요하다.

타겟이 이동하는 경우 전파의 전파속도에 따른 송신과 수신 시간차에 의해 발생하는 실 위치 오차는 300km 거리의 경우 음속으로 이동하는 물체에 대하여 약 0.3m 정도의 오차이므로 측정 시간과 측정 후에 타겟이 이동하여 생기는 거리 오차는 시스템의 TDoA 수행 동작 속도에 의해 결정된다.

성능평가를 통하여, TDoA를 통한 위치 추정에서

시각동기의 오차가 증가할수록 추정 오차가 크게 증가하는 것을 확인, TDoA 위치 추정 정밀도 향상을 위한 시각동기 오차 개선은 큰 의미가 있음을 보인다.

References

- [1] J. Elson and K. Romer, "Wireless sensor networks: a new regime for time synchronization," in *Proc. Hot Topics In Networks (HotNets-I)*, pp. 149-154, Oct. 2002.
- [2] S. Ganeriwal, R. Kumar, and M. B. Srivastava, "Timing-sync protocol for sensor networks," in *Proc. ACM Conf. on Embed. Netw. Sensor Syst. (Sensys)*, pp. 138-149, 2003.
- [3] M. L. Sichitiu and C. Veerarittiphan, "Simple, accurate time synchronization for wireless sensor networks," in *Proc. IEEE Wirel. Commun. and Netw. Conf., (WCNC)*, pp. 1266-1273, Mar. 2003.
- [4] J. Elson, L. Girod, and D. Estrin, "Fine-grained network time synchronization using reference broadcasts," in *Proc. Operating Systems Design and Implementation (OSDI)*, pp. 147-163, Dec. 2002.
- [5] S. Ganeriwal and M. Srivastava, "Timing-sync protocol for sensor networks," in *Proc. ACM Conf. on Embed. Netw. Sensor Syst. (Sensys)*, pp. 138-149, 2003.
- [6] S. Ganeriwal, I. Tsigkogiannis, and H. Shim, "Estimating clock uncertainty for efficient duty-cycling in sensor networks," *IEEE/ACM Trans. on Netw.*, vol. 17 no. 3, pp. 843-856, Jun. 2009.
- [7] B. Ai, Y. Shen, Z. D. Zhong, and B. H. Zhang, "Enhanced sampling clock offset correction based on time domain estimation scheme," *IEEE Trans. Consum. Electr.*, vol. 57, no. 2, pp. 696-704, Apr. 2011.
- [8] H. Kopetz and W. Schwabl, "Global time in distributed real-time systems," *Technical Report 15/89*, Technische Universitat Wien, Wien Austria, Oct. 1989.
- [9] P. Verissimo, L. Rodrigues, and A. Casimiro, "Cesiumspray: a precise and accurate global time service for large-scale systems," *Technical report. NAV-TR-97-0001*, Universidade de Lisboa, 1997.
- [10] D. Mills, Z. Yang, and T. Marsland (Eds.), *Internet Time Synchronization: the Network Time Protocol Global States and Time in Distributed Systems*, IEEE Computer Society Press, 1991.
- [11] H. T. Cho, H. S. Jang, and Y. J. Baek, "Practical localization system for consumer devices using zigbee networks," *IEEE Trans. Consum. Electr.*, vol. 56, no. 3, pp. 696-704, Aug. 2010.
- [12] T. P. Yunck, W. G. Melbourne, and C. L. Thoenton, "GPS-based satellite tracking system for precise positioning," *IEEE Trans. Consum. Electr.*, vol. GE-23, no. 4, pp. 696-704, Jul. 1985.
- [13] J. H. Han and D. K. Jeong, "Comparisons of error characteristics between TOA and TDOA positioning," *IEEE Trans. Aero. and Elect Syst.*, vol. 38, no. 1, pp. 307-311, Jan. 2002.
- [14] D. H. Shin and T. K. Sung, "Practical considerations in the design and implementation of time synchronization systems using IEEE 1588," *IEEE Trans. Consum. Electr.*, vol. 47, no. 11, pp. 696-704, Nov. 2009.
- [15] R. E. Kalman "A new approach to linear filtering and prediction problems," *J. of Basic Engineering*, no. 82, series. D, pp. 34-45, Mar. 1960.
- [16] J. H. Hwang and M. S. Yoo, "The analysis on positioning error of recognition schemes of pilot signal in indoor TDoA positioning system using visible light communication", *J. KICS*, vol. 37B, no. 9, pp. 787-794, Sep. 2012.
- [17] S. Y. Hwang and Y. S. Jung, Y. J. Back, "Reliable time synchronization protocol in sensor networks", *J. KICS*, vol. 31, no. 3A,

pp. 274-281, Mar. 2006.

- [18] W. H. Jang and Y. M. Kwon, "An improved time synchronization algorithm in sensor networks", *J. The Institute of Electronics Engineers of Korea (IEEK)*, vol. 45, no. 9, pp. 13-19, Sep. 2008.

김 재 완 (Jae-wan Kim)



2003년 고려대학교 전기전자전
파공학부 학사
2005년 고려대학교 전자컴퓨터
공학과 석사
2005년 9월~현재 고려대학
교 전자컴퓨터공학과 박사과정
2011년 4월~현재 서일대 정

보통신과 겸임교수

<관심분야> Wired/Wireless Network, Data
Communication

엄 두 섭 (Doo-seop Eom)



1987년 고려대학교 전자공학과
학사
1989년 고려대학교 전자공학과
석사
1999년 일본 오사카대학 정보
통신공학과 박사
1989년 2월~1999년 8월 한국

전자통신연구소 연구원

1999년 9월~2000년 8월 원광대학교 전임강사

2000년 9월~현재 고려대 전기전자전파공학부 정교
수

<관심분야> 통신네트워크 설계 및 성능분석, 무선
ATM, IP 네트워크