

시각동기 스위칭 GPS 중계기를 이용한 실내측위 시스템

An Indoor Positioning System Using Time-Synchronized Switching GPS Repeater

임 성 혁, 지 규 인*
(Sung-Hyuck Im and Gyu-In Jee)

Abstract : A new method for the GPS repeater based indoor positioning is proposed and its feasibility is verified by experiments in previous paper. But the problems how can identify switching GPS repeater's ID and when switching will be occurred are remained. To solve the problem faced with, we propose the time synchronized switching GPS repeater and the methods of the detection of switching time and the estimation of TDOA. First, switching GPS repeater retransmits the signals synchronized on GPS time, sequentially. Always, first switching time is synchronized with 1PPS. Second, we formulate the detection of switching time and the estimation of TDOA and propose the various methods. No method is existed absolutely superior to others in any conditions but the method is existed superior to others in specific condition. Finally, feasibility of indoor positioning using time-synchronized switching GPS repeater is evaluated through experiments in anechoic chamber and general environment with multipath.

Keywords : indoor positioning, GPS repeater, time-synchronization, re-transmission antenna switching

I. 서론

위치정보에 기반한 다양한 서비스들이 창출되고 서비스되면서 언제나 어느 곳에서나 정확하게 사용자의 위치를 결정할 수 있는 측위기술에 대한 요구가 많아졌다. 특히 많은 위치기반서비스들이 대상으로 하고자 하는 실내에서의 사용자의 위치를 결정하는 소위 실내측위에 관한 요구가 최근에 많아지고 있다.

실내측위를 위해서 다른 어떤 측위기술보다 우선적으로 GPS(Global Positioning System)를 고려할 수 있다. 그러나, 내재된 GPS 위성 신호 자체의 낮은 신호세기 특성과 실외에 비해 약 5~30dB 정도 신호세기가 감쇄되는 현상은 실내에서 미약한 GPS 위성신호를 획득하고 추적하는 일을 매우 어렵게 만든다. 따라서 이러한 미약한 GPS 위성신호의 문제점을 보완한 몇 가지 실내측위 방법이 제시되었다.

그 중 첫째로는 의사위성(pseudolite)을 이용한 실내측위 방법이 있다. 의사위성을 이용한 실내측위를 하는 경우에는 실내에 적어도 4개의 의사위성을 설치하여야 한다. 또한, 의사위성간의 시각동기는 시스템의 정확도와 직결되므로 필수적이지만 구현이 용이하지 않기 때문에 의사위성시스템 장비는 고가이나, 위의 요건이 완비되었을 때에는 기존의 수신기의 하드웨어 내지는 내부 소프트웨어의 변경없이 GPS 수신기가 기존의 위성처럼 인식하여 사용이 가능한 장점이 있다. 둘째는 망도움(network assist) 방식의 AGPS(Assisted GPS) 기술이다. 이 방법은 측위 서버로부터 도움정보를 수신 받아 GPS 수신기가 신호의 긴 적산(약 1~2초)을 가능하게 함으로써 미약신호를 검출할 수 있도록 한다. 그러나, 이 방법 또한 낮은 신호세기 환경에서 신뢰성과 이용 가능성 및 정확도 면

에서 E911 요구조건을 만족할 만한 수준이 아니며, 우선은 망(network)과 연결되어 있어야하고 긴 적산을 위해서는 고성능의 클록발생기를 사용해야하는 단점이 있다. 셋째로 스위칭 방식의 GPS 중계기(repeater)를 이용하는 실내 측위 방법이 제안되었다[1,2]. 스위칭 방식의 GPS 중계기를 이용하는 경우 기존의 GPS 수신기 하드웨어 변경 없이 약간의 소프트웨어 변경만을 필요로 하므로 의사위성에 비해 저렴한 시스템 구축 비용으로 실내측위가 가능하게 하는 장점이 있다.

외부에 설치된 동일한 GPS 안테나에 수신된 신호를 실내에 설치된 재송신 안테나를 이용하여 실내로 중계하는 경우, 이를 수신한 수신기의 위치는 실제 위치와는 무관하게 외부에 설치된 안테나의 위치를 가르키게 된다. 이 이유는 외부 안테나로부터 실내의 수신기 안테나까지의 전파의 추가적인 경로가 모든 위성에 대해 동일하기 때문에 이는 항법 계산시에 수신기 시계 오차항으로 나타나게 되며 결국 위치좌표에는 영향을 미치지 못하기 때문이다. 그러나 수신기의 내부 시계는 이 추가적인 경로만큼 늦춰지게 되며 이에 따라 모든 채널의 PN 코드는 동일한 위상만큼 지연되어 위성신호에 맞추어진다. 이는 결국 길이가 긴 케이블을 사용하는 것과 같은 경우에 해당한다. 이에 따라 중계기를 이용한 측위가 가능하기 위해서는 실내에 설치된 복수의 재송신 안테나로부터 TOA(Time Of Arrival) 혹은 TDOA(Time Difference Of Arrival)에 해당하는 정보를 얻을 수 있는 방안이 필요하다.

복수의 재송신 안테나 사이의 신호 송신 전환(switching)을 이용하여 각각의 재송신 안테나가 신호를 송신하는 시간을 분할하는 방법 즉, 시분할 방식의 중계기 신호 전송방식이 제안되었다[2]. 각각의 재송신 안테나는 정해진 시간간격을 할당 받아 순차적으로 송신을 반복하게 된다. 각각의 재송신 안테나로부터 시간 간격을 두고 신호가 송신될 때마다 각각의 재송신 안테나와 사용자(GPS수신기) 사이의 기하학적 위치의 변화에 의해서 의사거리에 변화가 생기게 되며 이는 스위칭이 발생한 두 안테나와 사용자 사이의 TDOA에 해당한다. 그러므로 4개의 재송신 안테나를 이용하는 경우 3개의

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2006. 4. 30., 채택확정 : 2006. 6. 10.

임성혁, 지규인 : 건국대학교 전자공학과

(shim@konkuk.ac.kr/gijee@konkuk.ac.kr)

※ 본 연구는 산업자원부 산업기술개발사업에 의하여 일부 지원받았음.

TDOA 측정값을 얻을 수 있으므로 실내에서의 3차원 측위가 가능하다. GPS 중계기 내부에 GPS 수신기를 장착하면 1PPS (Pulse Per Second) 신호를 이용하여 정확한 시분할 간격을 갖도록 시스템을 구성할 수 있다.

이렇게 구성된 시스템을 이용한 실내측위를 위해서는 수신기에서 각각의 재송신 안테나의 송신이 스위칭되는 시점을 검출한 후 TDOA를 추정하는 신호처리가 필요하다. 이를 위한 방법으로 3가지 경우로 분류된 검출 및 추정 기법이 제안되었다[3,4].

본 논문에서는 제안된 재송신 안테나 스위칭 GPS 중계기에 기반한 실내측위 시스템의 개념과 TDOA 추정 기법에 대해 설명하며, 개발된 GPS 중계기 시스템 구조를 설명하고 이를 이용한 실험을 통해 실내측위 성능을 평가한다.

II. 재송신 안테나 스위칭 GPS 중계기를 이용한 측위 이론

이론적으로 재송신되는 GPS 신호를 이용하여 실내에서 측위하는 경우 GPS 수신기는 외부에 설치된 안테나(reference antenna)의 위치와 동일한 위치 정보를 준다. 이것은 위성과 외부에 설치된 안테나까지 도달하는 거리는 서로의 기하학적 관계에 의해서 정의되지만, 외부에 설치된 안테나로부터 재송신되는 안테나까지의 추가 경로는 모든 위성 신호에 대해 동일하므로 위치결정시 시계 바이어스의 향으로 나타나 제거되기 때문이다.

그림 1은 실내측위를 하기 위한 안테나의 배치 및 중계기의 설치를 나타낸다. 그림 1에서와 같이 다수의 GPS 재송신 안테나를 가진 실내 측위를 고려해보자. 재송신 안테나(R1~R4)는 시각에 동기되어 스위칭되는 RF(Radio Frequency)회로를 가진 중계기(repeater)에 연결되어 있다. 시간적으로 한 순간에 오직 한 개의 재송신 안테나만이 신호를 재송신하므로 복수 안테나 사용에 따른 신호 간섭은 없게 된다. 한 안테나에서 다른 안테나로 스위칭되는 간격은 임의로 조정 가능하다. 안테나 간의 스위칭이 발생했을 때, 신호가 전송되는 경로가 바뀌게 되며 이는 의사거리의 순간적인 변화로 나타나게 된다. 이 변화는 두 스위칭 안테나와 사용자 사이의 거리 차 즉, TDOA에 해당한다.

t 시간에 i 번째 재송신 안테나 경로를 통과하는 k 번째 위성과 수신기 사이의 기하학적 거리는 아래와 같이 정의할 수 있다.

$$Pr_i^k(t) = \rho_k(t) + l_{R,r} + l_{r,i} + l_{i,u}(t) \tag{1}$$

여기에서, ρ_k 는 k 번째 위성과 기준 안테나 사이의 거리, $l_{R,r}$ 는 기준 안테나와 중계기 사이의 케이블 길이, $l_{r,i}$ 는 중계기와 i 번째 재송신 안테나 사이의 케이블 길이를 의미하며, $l_{i,u}(t)$ 는 t 시간에 i 번째 재송신 안테나와 수신기 사이의 거리를 나타낸다.

t 시간에 i 번째 재송신 안테나로부터 $i+1$ 번째 안테나로의 안테나 스위칭이 발생했다고 가정하면, k 번째 위성까지의 기하학적 거리에는 $i+1$ 번째 재송신 안테나와 수신기 사이의 경로가 반영된다. 이에 따라 스위칭되는 시점에서 의사거리의 순간적인 변화가 발생하게 되고 이 순간적인 변화는 두

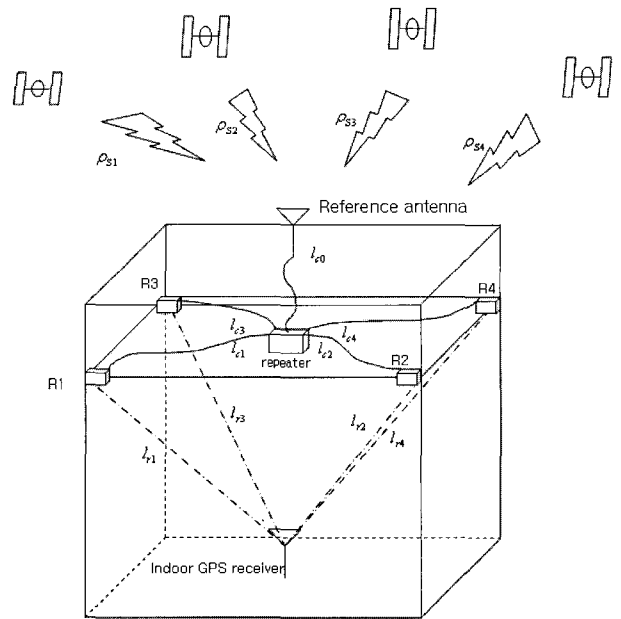


그림 1. 다중 재송신 안테나를 이용한 실내측위구성.
Fig. 1. Indoor positioning configuration with multiple retransmission antenna.

재송신 안테나의 거리 차를 의미하며 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta Pr_{i+1,i}^k(t+1) &= Pr_i^k(t+1) - Pr_i^k(t) \\ &= (\rho_k(t+1) + l_{R,r} + l_{r,i+1} + l_{i+1,u}(t+1)) \\ &\quad - (\rho_k(t) + l_{R,r} + l_{r,i} + l_{i,u}(t)) \\ &= (\rho_k(t+1) - \rho_k(t)) + (l_{r,i+1} - l_{r,i}) \\ &\quad + (l_{i+1,u}(t+1) - l_{i,u}(t)) \end{aligned} \tag{2}$$

만약, $t+1$ 과 t 시간의 차가 상대적으로 작고 일반적으로 실내 사용자는 짧은 시간 간격 동안에 움직임이 없다고 가정하는 경우에는, $l_{i+1,u}(t+1) = l_{i+1,u}(t)$ 라고 근사화할 수 있다. 일반적으로, 중계기로부터 각각의 재송신 안테나까지의 케이블의 길이 $l_{r,i+1}$, $l_{r,i}$ 는 설치 이후 변하지 않고 두 도선의 길이가 같도록 설치가 가능하다고 가정할 수 있으므로 $l_{r,i+1}$, $l_{r,i}$ 는 (2)에서 제거할 수 있다(재송신 안테나의 개수 및 위치와 케이블 길이는 알려져 있다고 가정). 마지막으로, 그림 2에서와 같이 시간에 따른 위성과 기준 안테나 사이의 거리의 변화($\rho_k(t+1) - \rho_k(t)$)는 주파수 추적 오차가 코드 추적오차에 비하여 상대적으로 작다고 가정할 수 있으므로 적산된 도플러 거리를 이용하여 추정된 후 보상이 가능하다. 따라서, (2)의 $\Delta Pr_{i+1,i}^k(t+1)$ 은 $l_{i+1,u}(t+1) - l_{i,u}(t)$ 만으로 표현할 수 있고 앞에서 언급한 바와 같이 $l_{i+1,u}(t+1) = l_{i+1,u}(t)$ 로 근사화할 수 있으므로 짧은 시간 간격에 대해서 상수로 간주할 수 있다.

(2)와 위의 가정으로부터, 아래와 같이 두 재송신 안테나와 사용자 거리의 차만으로 구성된 TDOA 측정치를 얻을 수 있다.

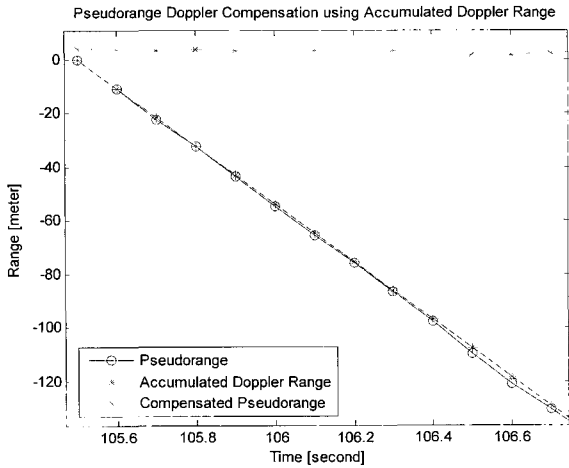


그림 2. 적산된 도플러 거리를 이용한 의사거리 도플러 보상.
Fig. 2. Pseudorange doppler compensation using ADR.

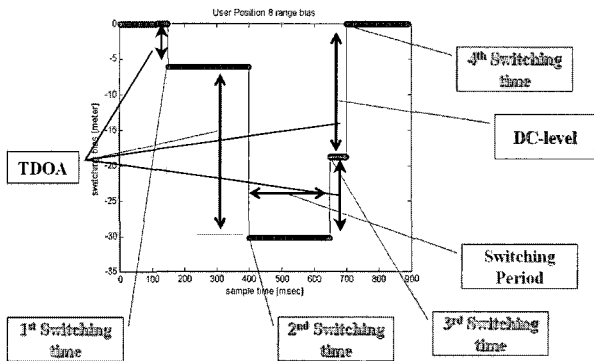


그림 3. 스위칭 중계기를 이용한 TDOA 측정 개념.
Fig. 3. Concept of the TDOA measurement using switching repeater.

$$\begin{aligned}
 TDOA_{i+1,i}^k(t) &= l_{i+1,u}(t) - l_{i,u}(t) \\
 &\approx l_{i+1,u}(t+1) - l_{i,u}(t) \\
 &= \Delta Pr_{i+1,i}^k(t+1) - (\rho_k(t+1) - \rho_k(t)) - (l_{r,i+1} - l_{r,i}) \\
 &\approx \Delta Pr_{i+1,i}^k(t+1) - (\rho_k(t+1) - \rho_k(t))
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

(3)으로 정의된 TDOA 측정치 3개가 있으면 3차원에서의 사용자의 위치결정이 가능하다.

앞에서 정리한 바와 같이 재송신 안테나 스위칭 GPS 중계기를 이용한 TDOA 측정은 그림 3과 같이 알려지지 않은 크기의 상수 값의 변화를 검출하는 문제로 정의할 수 있으며, 다음 장에서 안테나 스위칭이 발생하는 시간의 검출과 TDOA 값을 추정하는 방법에 대해서 논의한다.

III. 시각동기 스위칭 GPS 중계기 제작

제안된 측위시스템 구현 및 실험을 위해 그림 4와같이 외부 안테나로부터 입력되는 GPS신호를 1PPS 신호에 동기되어 4개의 스위칭 포트를 통해서 방사하는 시각동기 스위칭 GPS 중계기를 제작하였다. 그림 5는 구현된 시각동기 스위칭 GPS 중계기의 내부 구조도를 나타낸다.

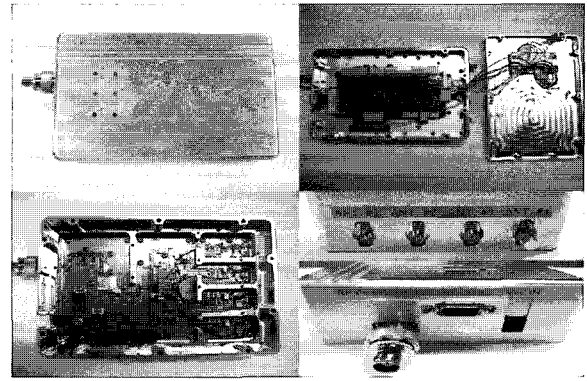


그림 4. 시각동기 스위칭 GPS 중계기.
Fig. 4. Time-synchronized switching GPS repeater.

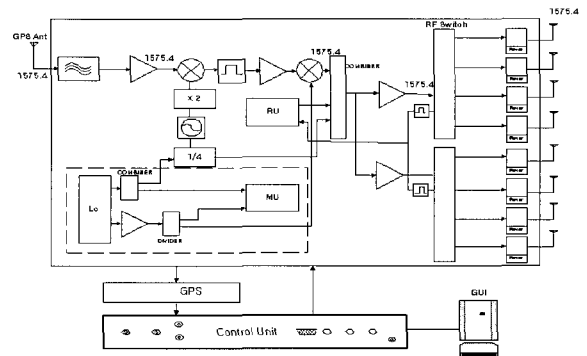


그림 5. 시각동기 스위칭 GPS 중계기의 구조도.
Fig. 5. Block diagram of time-synchronized switching GPS repeater.

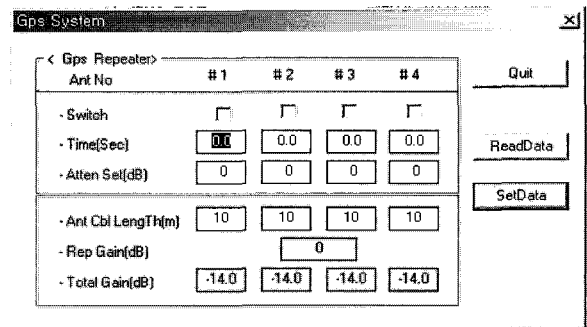


그림 6. 중계기 제어를 위한 사용자 인터페이스.
Fig. 6. User interface for repeater control.

제작된 중계기는 GPS 수신기를 내장하고 있어 1PPS (Pulse Per Second)에 동기된 스위칭이 가능하며, 재송신하는 GPS 신호의 이상 유무를 확인할 수 있다. 또한, 그림 6의 중계기 제어용 사용자 인터페이스를 통해서 중계기가 재송신할 재송신 안테나의 선택 및 재송신하는 신호의 이득과 각각의 안테나를 위한 스위칭 시간을 조절할 수 있다.

IV. 안테나 스위칭 순간 검출 및 TDOA 측정

재송신 안테나에서 주기적으로 스위칭이 발생하면서 교대로 GPS 신호가 송신되고 있지만, 일반적으로 수신기에서는 언제 어떤 안테나에서 스위칭이 발생하는 지 알 수 없다. 이

표 1. 스위칭시간 검출 및 의사거리 편향 추정 알고리즘 분류.

Table 1. Classification of switching time detection and pseudorange bias estimation.

<p>CASE 1) 미지의 스위칭 시간과 미지의 의사거리 편향 추정 : 안테나 스위칭 시간이 사용자에게 알려져 있지 않으므로 안테나 스위칭 시간과 의사거리 편향값을 동시에 추정해야 함. 예를들어, m 개의 스위칭 안테나를 사용할 경우에는 m 개의 스위칭 순간값과 m 개의 의사거리 편향값을 동시에 추정하여야 함.</p> <p>CASE 2) 미지의 최초 스위칭 시간과 미지의 의사거리 편향 추정 : 스위칭 간격은 미리 결정되어 있고 이 간격이 사용자에게 알려져 있다고 가정할 수 있다. 이 때, 사용자는 최초의 스위칭 시간과 의사거리 편향값을 추정해야함. 따라서, 1 번 상황 보다 추정해야 하는 미지수가 (m+1)개로 감소하게 된다.</p> <p>CASE 3) 결정되어 알려진 스위칭 시간과 미지의 의사거리 편향 추정 : 만약 스위칭 시스템을 특정 시각(IPPS)에 동기시켜 일정한 시간 간격으로 스위칭하게 되면, 사용자는 이미 스위칭 시간을 알고 있으므로 스위칭 시간의 추정 없이 의사거리 편향만을 추정할 수 있다. 이 경우, 추정해야 하는 미지수는 m 개로 감소하게 되며 최대의 검출확률을 나타낸다.</p>

의 스위칭이 발생하게 하면 스위칭이 발생하는 처음 순간 만 검출하면 된다. 이 이후의 스위칭은 미리 정해진 특정한 주기로 발생하기 때문에 스위칭 검출을 별도로 할 필요가 없다. 검출해야 하는 변수가 감소하기 때문에 검출 성능이 좋아질 수 있다.

또 다른 방법은 특정한 시각(예: 1PPS)에 동기되어 안테나 스위칭을 하고 스위칭 간격이 사용자에게 알려져 있는 경우를 가정할 수 있다. 이런 경우, 앞의 두 경우에서 추정해야 하는 스위칭 순간은 알려진 값이 되므로 이를 바탕으로 알려진 순간에 발생한 의사거리 편향값만을 추정하는 것이다.

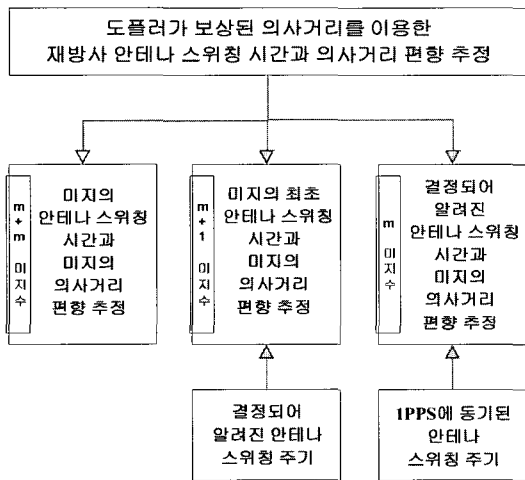
상기한 방법들을 기반으로 안테나 스위칭 순간의 검출 및 의사거리 편향을 추정하여 TDOA를 추정하는 문제는 다음의 세 가지 경우로 나누어 생각할 수 있다. 표 1에서와 같이 CASE 1~3의 세 경우에 대한 성능판단을 통하여 시각동기 스위칭 GPS 중계기 시스템의 설계 및 보완에 반영하였다.

그림 7에서와 같이 분류된 세가지 검출 및 추정 문제는 다음과 같이 보다 상세히 설명된다.

1. 미지의 스위칭 시간과 미지의 의사거리 편향 (CASE 1)

그림 3과 같이 상수값을 갖는 의사거리의 변화가 네 차례 발생한다고 고려하면, 이 문제는 안테나 스위칭 시간의 검출과 상수 의사거리 편향을 동시에 추정하기 위한 문제로 다음과 같이 정의할 수 있다.

의사거리 변화율이 보상된 후 측정시간에 따른 의사거리는 다음과 같이 정의할 수 있다.



$$s[i] = \begin{cases} b_0 & i = n_0, n_0 + 1, \dots, n_1 - 1 \\ b_1 & i = n_1, n_1 + 1, \dots, n_2 - 1 \\ b_2 & i = n_2, n_2 + 1, \dots, n_3 - 1 \\ \vdots & \\ b_{m-1} & i = n_{m-1}, n_{m-1} + 1, \dots, N - 1 \end{cases} \quad (4)$$

여기에서, b_k 는 상수 의사거리 편향값이고 n_m 은 안테나 스위칭되는 순간의 시간을 의미한다.

위의 문제는 측정값으로부터 m개의 의사거리 성분과 m개의 안테나 스위칭 순간 총 2m개의 미지값을 알아내야 하는 문제로 MLE(Maximum Likelihood Estimation) 추정 기법과 GLRT(Generalized Likelihood Ratio Test)를 사용하여 검출할 수 있다[8]. 이에 근거하여 의사거리 값 $\mathbf{b} = [b_0 \ b_1 \ b_2 \ \dots \ b_{m-1}]^T$ 와 스위칭 순간 $\mathbf{n} = [n_0 \ n_1 \ n_2 \ \dots \ n_{m-1}]^T$ 의 결합 MLE(joint MLE)는 다음 식을 최소화하는 것에 의해서 찾아질 수 있다.

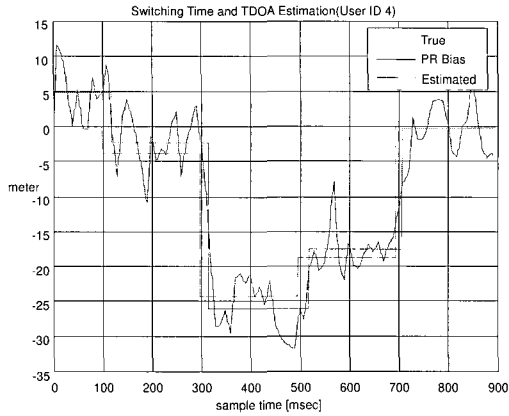
$$\min_{\mathbf{n}, \mathbf{b}} J(\mathbf{n}, \mathbf{b}) = \min_{\mathbf{n}, \mathbf{b}} \left\{ \sum_{i=n_0}^{n_1-1} (s[i] - b_0) + \sum_{i=n_1}^{n_2-1} (s[i] - b_1) + \dots + \sum_{i=n_{m-1}}^{N-1} (s[i] - b_{m-1}) \right\} \quad (5)$$

(5)의 최소화 문제를 풀기 위해서 동적프로그래밍 (dynamic programming) 기법을 이용하는 경우, 가능한 모든 조합의 검색 없이 $J(\mathbf{n}, \mathbf{b})$ 의 최소 값을 평가하여 최적의 \mathbf{b} 와 \mathbf{n} 을 찾을 수 있다[8]. 이렇게 구한 \mathbf{b} 의 각 원소간의 차분값이 TDOA 측정값이다.

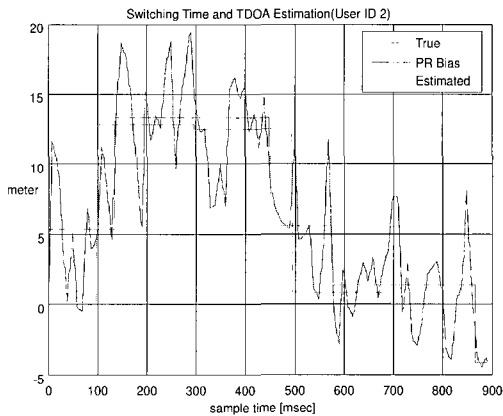
그림 7. 스위칭 시간검출 및 의사거리 편향 추정문제의 분류.
Fig. 7. Classification of problems of changing time detection and pseudorange bias estimation.

를 알기 위해서는 수신기 내부에서 의사거리 변화를 이용하여 안테나 스위칭의 발생을 검출함과 동시에 스위칭에 따른 의사거리 편향(pseudorange bias)값을 알아 내야한다. 이렇게 구해진 의사거리 편향의 차분값이 TDOA 값이다.

이 문제를 검출 및 추정문제로 해석하여 풀 수는 있지만 많은 계산이 필요하며 낮은 SNR(Signal to Noise Ratio) 또는 비교적 작은 의사거리 편향에 의해서 성능이 문제가 된다. 이를 해결하기 위한 한 방법은 일정한 주기로 재송신 안테나



(a)



(b)

그림 8. 동적프로그래밍을 이용하여 스위칭 시간과 의사거리 편향을 추정한 결과.

Fig. 8. Results of switching time detection and pseudorange bias estimation using dynamic programming.

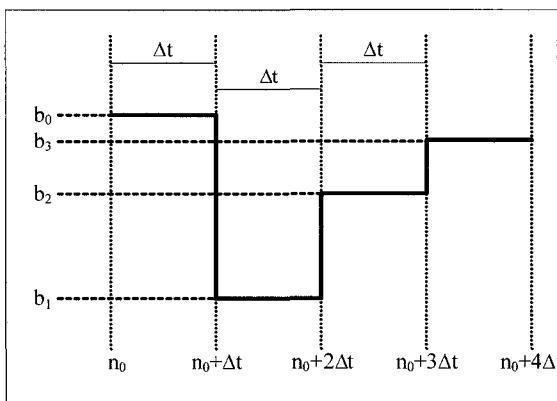


그림 9. 알려진 스위칭 시간간격을 갖는 문제의 개념.

Fig. 9. The concept of known period of switching times.

그림 8은 상기의 제안된 방법을 이용하여 스위칭 시간과 의사거리 편향을 동시에 추정한 결과를 나타낸 그림이다. 결과에서 그림 8(a)는 스위칭에 의해 발생하는 의사거리 편향 값이 큰 경우로 TDOA 추정에 작은 오차를 보인 반면 그림

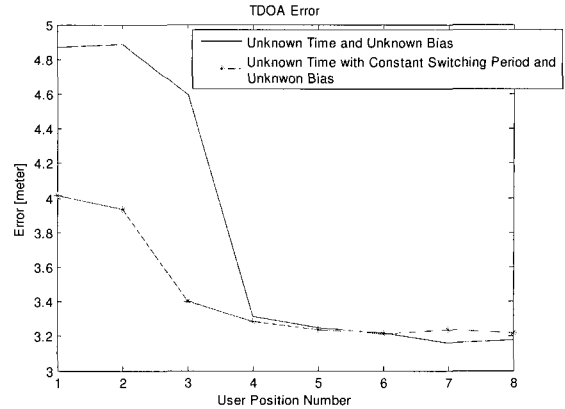


그림 10. 스위칭 시간 간격이 알려진 경우와 알려지지 않은 경우 비교.

Fig. 10. Comparison of known switching period and unknown switching period.

8(b)와 같이 의사거리 편향값 자체가 비교적 작은 경우에는 TDOA 추정에 상대적으로 큰 오차가 발생하는 것을 알 수 있다. 따라서, CASE 1을 적용한 경우 의사거리 편향값이 작은 상황에서는 TDOA 측정에 문제가 발생할 수 있다. 그러므로 시스템에 제한조건을 부여하여 추정해야 하는 미지수의 개수를 감소시켜 추정성능을 높일 필요가 있다.

2. 미지의 첫번째 스위칭 순간과 미지의 의사거리 편향 추정 (CASE 2)

CASE 1의 결과에서 낮은 신호대 잡음비를 갖는 경우 제안된 알고리즘의 성능이 열화됨을 확인하였다. 따라서, 성능을 향상시키기 위하여 그림 9에서와 같이 각각의 재송신 안테나 스위칭 주기가 일정하게 설정되고 이의 주기 값이 수신기에 미리 알려져 있다고 가정하면, CASE 1에서 추정해야 하는 2m개의 변수는 m+1개의 변수 즉, 최초 스위칭 시간과 m개의 의사거리 편향값으로 감소된다. 위와 같이 제한 조건을 부여함으로써 추정해야 하는 변수의 수를 줄일 수 있다.

상기한 제한조건을 적용하여 의사거리 변화율이 보상된 후 측정시간에 따른 의사거리 편향(bias)은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$s[i] = \begin{cases} b_0 & i = n_0, n_0 + 1, \dots, n_0 + \Delta t - 1 \\ b_1 & i = n_0 + \Delta t, n_0 + \Delta t + 1, \dots, n_0 + 2\Delta t - 1 \\ b_2 & i = n_0 + 2\Delta t, n_0 + 2\Delta t + 1, \dots, n_0 + 3\Delta t - 1 \\ \vdots & \\ b_{m-1} & i = n_0 + (m-1)\Delta t, n_0 + (m-1)\Delta t + 1, \dots, N-1 \end{cases} \quad (6)$$

여기에서, Δt 는 상수이고 알려진 값으로 재송신 안테나의 스위칭 시간간격은 일정하며 변하지 않게 설정한다.

$\mathbf{b} = [b_0 \ b_1 \ b_2 \ \dots \ b_{m-1}]^T$ 와 n_0 의 결합 MLE는 n_0 의 경우 의수가 많지 않으므로 동적프로그래밍 기법을 사용하지 않고 모든 n_0 를 평가하여 다음 식의 최소화를 통해서 찾을 수 있다.

$$\min_{n_0, \mathbf{b}} J(n_0, \mathbf{b}) = \quad (7)$$

$$\min_{n_0, b} \left\{ \sum_{i=n_0}^{\Delta n-1} (s[i] - b_0) + \sum_{i=\Delta n}^{2\Delta n-1} (s[i] - b_1) + \dots + \sum_{i=(m-1)\Delta n}^{N-1} (s[i] - b_{m-1}) \right\}$$

각각의 재송신 안테나의 스위칭 시간 간격이 알려진 경우 스위칭 시간의 검출 성능은 그림 10에서와 같이 향상된다. 그림 10은 8가지 다른 사용자 위치에서의 오차를 나타낸다. 그림 10에서 1~3의 사용자 위치에서는 안테나 스위칭에 따른 의사거리 편향의 정도가 10미터 내외이고 4~8의 사용자 위치에서는 20미터 이상의 경우이다. 의사거리 편향의 정도가 큰 경우 CASE 1과 CASE 2의 성능이 유사한 반면, 의사거리 편향의 정도가 작은 경우 TDOA 측위결과 CASE 2가 CASE 1보다 약 1미터 정도의 오차가 감소함을 알 수 있다.

3. 알려진 스위칭 시간과 미지의 의사거리 편향 추정 (CASE 3)

CASE 2는 CASE 1에 제한조건을 부여하여 시스템의 성능을 향상시켰다. 그러나, 아직까지 남아 있는 문제는 (7)의 n_0 (최초 스위칭 시간)을 검출해야 하는 문제가 남아있다. 실내에서 스위칭을 적용하게 되면 각각의 재송신 안테나는 반복적으로 정해진 시간에 신호를 송신하게 된다. 이런 경우, 안테나의 ID를 알 수 없는 모호성이 발생하게 되므로 이를 보완하기 위해서 GPS는 시각동기 시스템이라는 본질을 적용하여 각각의 안테나 스위칭 시간을 GPS 시각과 동기시킴으로써 n_0 (최초 스위칭 시간)의 추정 없이 의사거리 편향을 구할 수 있다.

$$s[i] = \begin{cases} b_0 & i = n_0, n_0 + 1, \dots, n_1 - 1 \\ b_1 & i = n_1, n_1 + 1, \dots, n_2 - 1 \\ b_2 & i = n_2, n_2 + 1, \dots, n_3 - 1 \\ \vdots & \\ b_{m-1} & i = n_{m-1}, n_{m-1} + 1, \dots, N - 1 \end{cases} \quad (8)$$

여기에서, b_l 는 각각의 재전송 안테나 l 에서의 의사거리 편향값이고 n_m 은 미리 알려져 있는 안테나의 스위칭 순간이다. 예를 들어 GPS 시각에 동기되어 0.5초마다 안테나가 순차적으로 스위칭 된다고하면 수신기는 자신의 시계를 이용하여 안테나가 스위칭되는 순간을 판단한다.

GPS 시각에 동기된 스위칭으로 인하여 n_m 은 알려진 값이 되고 의사거리 편향값은 (9)와 같이 샘플의 평균으로 간단하게 구할 수 있으며, 스위칭 시간 검출을 하지 않고 의사거리 편향값을 직접 추정함으로써 CASE 1~2보다 향상된 추정 성능을 가질 수 있다. 또한 스위칭 순간의 안테나를 구별하는데 발생하는 모호성을 제거할 수 있다.

$$b_0 = \frac{1}{N} \sum_{n=n_0}^{n_0+\Delta n-1} x[n], \quad b_1 = \frac{1}{N} \sum_{n=n_0+\Delta n}^{n_0+2\Delta n-1} x[n] \quad (9)$$

$$b_2 = \frac{1}{N} \sum_{n=n_0+2\Delta n}^{n_0+3\Delta n-1} x[n], \dots, b_{m-1} = \frac{1}{N} \sum_{n=n_0+(m-1)\Delta n}^{N-1} x[n]$$

위에서 설명한 방식이 정상적으로 적용되기 위해 사용자의 GPS 수신기는 최소한 GPS 위성신호의 항법데이터 복조가 가능하여야 한다. 그러나 안테나 스위칭이 발생할 때 위상의 순간적인 변이가 발생하여 GPS 데이터 복조 성능을 저

하시켜 항법데이터 복조가 불가능한 경우가 발생할 수 있다. 이 경우, 두 가지의 대안이 존재한다. 안테나 스위칭이 0.5초마다 발생한다고 가정하면 25비트 항법 데이터마다 오류가 발생할 수 있고 이것을 예측하여 비트가 이상 반전되는 경우의 수를 고려하여 오류를 정정하는 방법이다.

다른 한가지 경우는 최초 안테나의 송신시간 간격을 다른 안테나의 송신시간 간격과 과 다르게 설정함으로써 안테나 구별의 모호성을 없앨 수 있다. 이 방식의 TDOA 측정 방식이 성능 및 시스템 운영 면에서 가장 좋은 성능을 보이기 때문에 본 논문에서 제안하는 시각동기 스위칭 중계기를 위한 TDOA 측정 방법으로 사용한다.

V. 실험 및 평가

앞 절에서 설명한 바와 같이 TDOA를 추정하기 위한 기본 개념과 TDOA를 측정하기 위한 방법을 제시하였으며, 이를 구현하기 위한 시각동기 재송신 안테나 스위칭 GPS 중계기를 개발하였다. 제안된 시스템의 측위시스템으로서의 가용성을 판단하기 위해서 우선 다중경로가 존재하지 않는 무반향실(anechoic chamber)에서 그림 1과 같이 설치한 후 TDOA 측정 실험을 통하여 성능을 분석하였다.

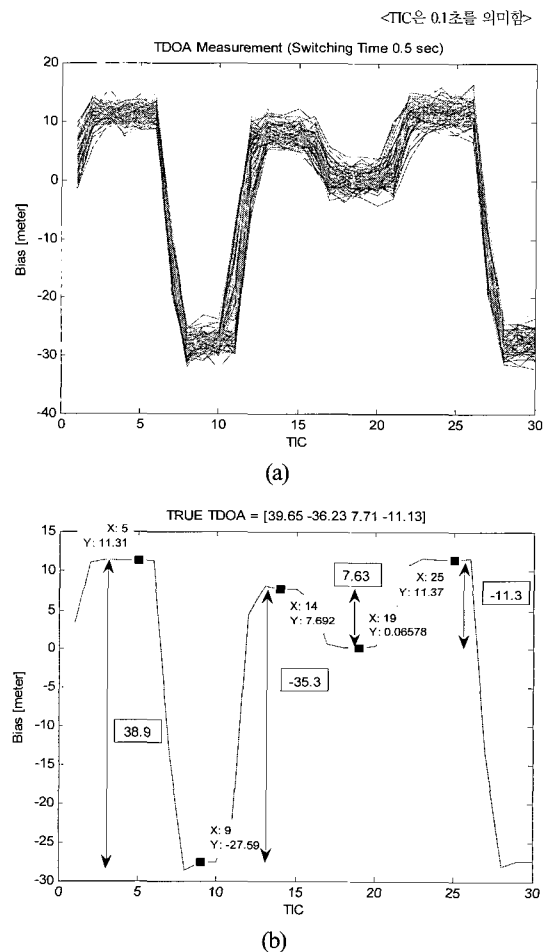


그림 11. 무반향실에서 실측된 의사거리 편향 값, (a) 80회 실측값, (b) 80회 실측 값의 평균.

Fig. 11. Pseudorange bias measured in anechoic chamber, (a) 80 measurements, (b) average of 80 measurements.

TDOA 측정을 위해 재송신 안테나 스위칭이 이루어지는 주기는 0.5초로 설정하였다.

그림 11(a)는 80회 측정된 의사거리 편향 값이며, 그림 11(b)는 측정된 의사거리 편향 값의 평균이다. 이렇게 측정된 의사거리 편향값의 차분이 TDOA 값이며, 4개의 안테나 스위칭을 통해 3개의 TDOA 측정값을 얻었다. 표 2를 통해서 무반향실에서 측정된 TDOA는 실제 TDOA와 2미터 이내의 평균 오차를 가짐을 알 수 있으며, 측정된 TDOA의 표준편차는 2.5미터 이내이다.

표 2. 무반향실에서의 실험 결과.
Table 2. Experiment results in anechoic chamber.

안테나 스위칭	실제 TDOA (m)	측정된 TDOA 의 평균 (m)	측정된 TDOA 의 표준편차 (m)
1-2	37	38.9	2.07
2-3	-34	-35.3	2.43
3-4	7	7.63	2.04
4-1	-10	-11.3	2.55

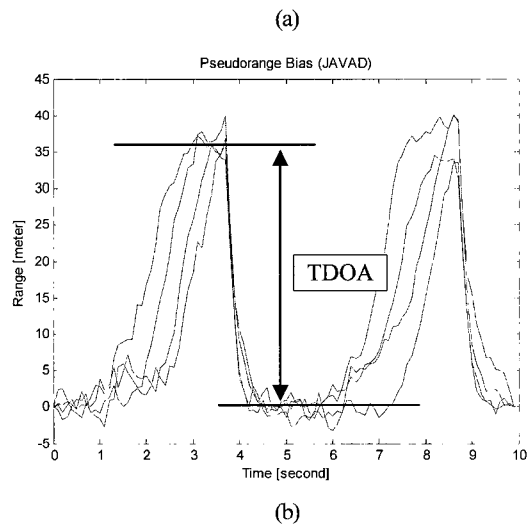
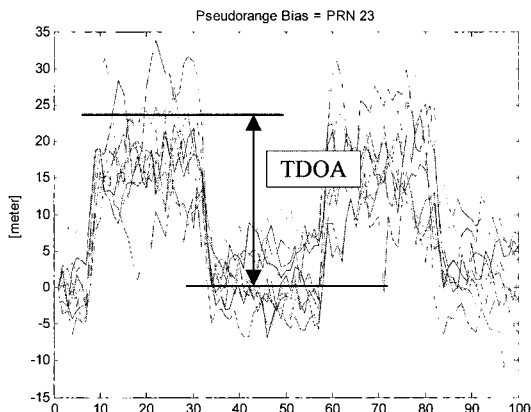


그림 12. TDOA 측위 결과, (a) 일반수신기, (b) Strobe-correlator를 내장한 Javad 수신기.

Fig. 12. Results of TDOA measurement, (a) Generic GPS receiver, (b) Javad receiver with strobe-correlator for multipath mitigation.

본 실험을 위해서 GEC Plessy사의 GP-2015 front-end와 GP-2021 상관계 하드웨어를 사용하는 GPS 수신기를 이용하였으며 TDOA 측정값을 얻어내기 위해서 수신기 내부의 소프트웨어 변경하여 사용하였다.

내부 소프트웨어가 변경된 GPS 수신기는 0.1초마다 의사거리 편향을 측정하기 위한 의사거리를 측정하고 적산된 도플러 거리(accumulated doppler range)값을 이용하여 도플러에 의한 의사거리의 변화량을 보상하여 의사거리 편향값을 측정하여 최종적으로 TDOA 측정값을 출력한다.

앞의 무반향실 실험을 통해서 제안된 시스템의 실내 측위 시스템으로서의 가용성을 확인하였다. 그러나, 일반적인 실내 환경에서는 다중 경로 오차가 필연적으로 존재하게 되므로 측위 가용성 판단을 위해 그림 13과 같이 실내에서의 실험을 실시하였다. 다중 경로 오차의 영향을 파악하기 위하여 무반향실 실험에 이용한 일반적인 수신기, 즉 특별한 다중경로 오차 알고리즘이 내재되지 않은 수신기와 다중경로 오차 알고리즘이 내재된 수신기(javad)를 비교하였다. 본 실험에서는 두 개의 재전송 안테나를 번갈아 스위칭하였다.

다중경로 오차가 존재하는 일반적인 환경에서의 실험결과, 그림 12와 표 3에서의 같이 다중경로 오차 알고리즘이 내재된 Javad GPS 수신기는 약 2미터 이내의 TDOA 평균 측정 오차를 갖는 반면 일반적인 GPS 수신기는 약 19미터 정도의 TDOA 평균 측정 오차를 갖는 것을 확인할 수 있다.

다중경로는 실내 전파 환경 때문에 발생하는 것으로 재송신 안테나의 스위칭과는 무관한 현상이다. 그러므로 다중경로에 의한 TDOA 측정 성능의 저하를 해결하기 위한 방법은 위의 실험에서 보인 것 처럼 일반적인 다중경로 감쇄 기법을 사용하면 된다. 즉, 협대역 상관기 혹은 스트로브 상관기 같

표 3. 일반적인 실내 환경에서의 실험 결과.

Table 3. Experiment results in indoor environment.

안테나 스위칭	실제 TDOA (m)	일반적인 수신기가 측정한 TDOA 평균 (m)	Javad 수신기가 측정한 TDOA 평균 (m)
1-2	37	20.52	35.63
2-1	-37	-18.21	-36.08

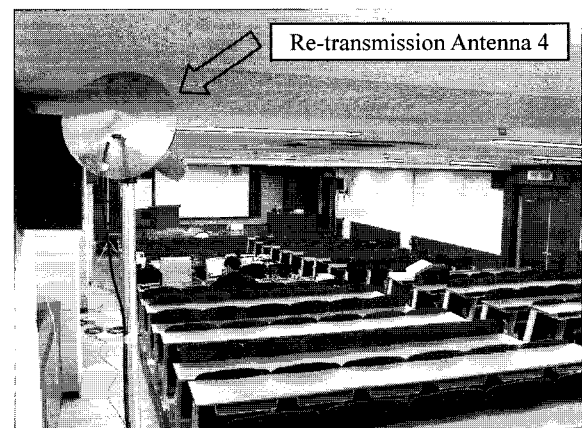


그림 13. 다중경로 오차가 존재하는 실내측위 실험 환경.

Fig. 13. Environment for indoor positioning with multipath.

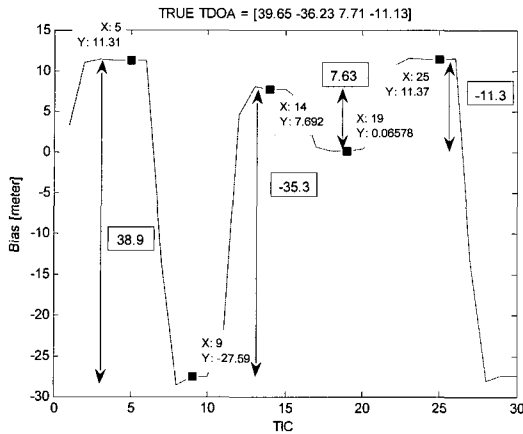


그림 14. TDOA 측위 결과 (스위칭 시간 간격 = 0.5초).
Fig. 14. Result of TDOA measurement (switching period = 0.5 sec).

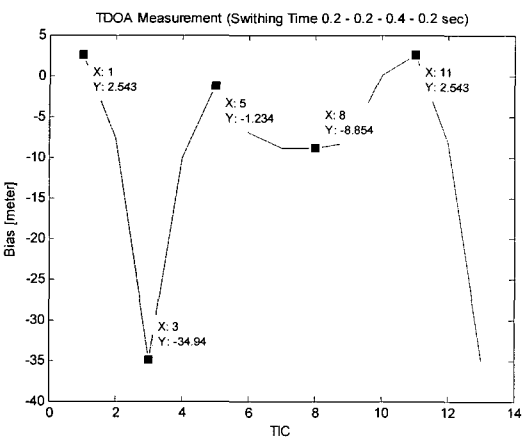


그림 15. TDOA 측위 결과 (스위칭 시간 간격 = 0.2초).
Fig. 15. Result of TDOA measurement (switching period = 0.2 sec).

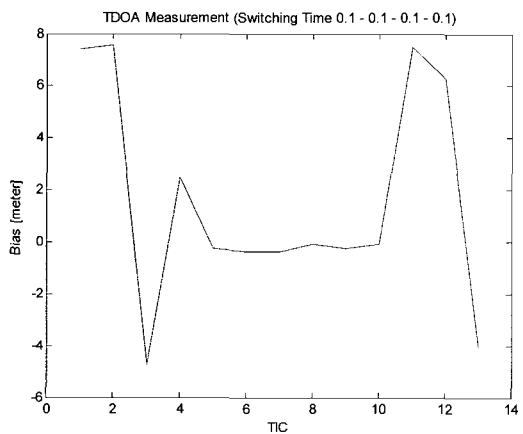


그림 16. TDOA 측위 결과(스위칭 시간 간격 = 0.1초).
Fig. 16. Result of TDOA measurement (switching period = 0.1 sec).

은 수신기 기술을 사용할 수 있다.

스위칭 시간 간격의 결정은 제안된 측위 시스템 운영의 중요한 설정 변수 중의 하나이다. 보다 나은 측위 성능을 얻기 위해서는 스위칭 시간 간격을 최소화하여야 한다. 그러나 스위칭 시간간격 최소화에는 한계가 있다.

스위칭 시간 간격이 길어질 경우, 사용자의 움직임에 의해서 측위 성능이 현저히 저하될 수 있다. 통상적인 실내에서의 사용자의 움직임은 1~2초 동안은 움직임이 거의 없어 정지해 있다고 가정할 수 있다. 따라서, 최소한 4개의 안테나가 번갈아 신호를 전송하여 최초의 안테나가 다시 반복될 때까지의 시간이 2초를 초과하여서는 안된다. 여기에서, 2초 내에 모든 재전송 안테나가 신호를 송신하는 기회를 갖도록 하기 위해서 각각의 재전송 안테나가 신호를 재전송할 수 있는 시간 즉, 스위칭 시간 간격은 0.5초 이내로 제한된다. 그렇다고 해서 스위칭 시간 간격을 무한히 줄일 수는 없다. 일반적인 GPS 수신기가 의사거리를 측정하는 주기가 0.1초기 때문에 0.1초보다 짧은 스위칭 시간 간격은 GPS 수신기가 측정해 내지 못하고 GPS 수신기의 신호추적루프의 대역폭이 좁은 경우 다음 스위칭이 발생하기 전에 안정화 되지 않기 때문이다. 그러나 대역폭을 넓히는 경우 빠른 시간 내에 안정화가 이루어지나 잡음의 영향이 커져 오차가 증가하게 된다.

상기한 스위칭 시간 간격이 측위 성능에 미치는 영향을 분석하기 위하여 0.5초, 0.2초, 0.1초의 스위칭 시간 간격에 대한 TDOA 측정 성능을 실험을 통하여 분석하였다.

그림 14~16은 각각 0.5초, 0.2초, 0.1초의 스위칭 간격을 갖고 있을 때의 TDOA 측정값이다. 0.5초인 경우에는 스위칭에 따른 3미터 이내의 오차를 갖는 TDOA 측정값을 주는 반면, 0.2초인 경우에도 TDOA 측정값의 경우 0.5초인 경우와 유사한 정확도를 보이나, 이 정확도는 그림 15와 같이 각 스위칭 순간의 최대치를 선택하는 경우이며, 스위칭 구간의 평균을 하는 취하는 경우에는 오차가 증가한다. 그림 16은 0.1초의 스위칭 시간 간격을 갖는 때의 TDOA 측정 결과이며, 0.5초와 0.2초의 스위칭 시간 간격을 갖는 때와 비교할 때, 측정값의 오차가 상당히 큼을 알 수 있다. 따라서 제안된 시스템을 위해서 0.2~0.5초 범위 내의 스위칭 시간 간격 선택이 가능하다.

VI. 결론

시각동기 재송신 안테나 스위칭 GPS 중계기를 이용한 새로운 실내측위 방식을 제안하였다. 안테나 스위칭에 따른 TDOA를 측정하는 알고리즘을 제안하였고 스위칭 GPS 중계기 시스템을 개발하여 실험을 통하여 TDOA 측정 성능을 분석하였다. 무반향 실험실에서의 실험을 통하여 제안된 방식으로 2m 정도의 오차로 TDOA를 측정할 수 있음을 보였다. 실내 다중경로 환경에서도 다중경로 완화 기능을 가지고 있는 수신기를 이용하는 경우 3m 정도의 TDOA 측정값을 얻을 수 있었다.

다중경로는 전파를 이용하는 모든 실내 측위시스템에 발생하는 공통적인 문제로 본 논문에서 제안하는 실내측위 시스템만의 문제는 아니다. 효과적인 다중경로 제거 기능이 있는 GPS 수신기를 이용하는 경우 제안하는 스위칭 GPS 중계기를 이용하는 측위 방법은 실내측위를 위한 효과적인 방법이라고 할 수 있다. 현재, 실내측위에서 가장 큰 문제점은 실내에서의 다중경로 오차이다. 제안된 방법을 이용하는 경우에 특별히 다중경로 오차가 증가하는 것은 아니며, 모든 실내측위 시스템이 가지고 있는 문제이므로 다중경로 오차 완화 알고리즘이 구현된 GPS 수신기의 하드웨어를 그대로

사용할 수 있으며, 스위칭을 추적하여 항법해를 줄 수 있도록 소프트웨어를 변경하여 장착하면 의사위성에 비해 훨씬 경제적으로 실내측위 시스템의 구현이 가능하다는 것이 이 방법의 장점이라고 말할 수 있다.

넓은 실내에서의 사용을 위한 재송신 시스템의 출력 설정 및 안테나 배치, 다수의 재송신 안테나 사용시 안테나 구별 문제, 저가의 다중경로 완화 기능 수신기의 개발 등이 추가로 연구되어야 할 내용이다.

참고문헌

[1] G-I. Jee, S.-C. Bu, and J.-H. Choi, "Indoor GPS positioning using switched repeater," *ION GPS/GNSS 2003*, Sept., 2003.

[2] G-I. Jee, S.-C. Bu, and J.-H. Choi, "Indoor positioning using TDOA measurements from switching GPS repeater," *ION*

GPS/GNSS 2004, Sept., 2004.

[3] G-I. Jee, J.-H. Lee, and S.-H. Im, "Indoor positioning using time synchronized switching GPS repeater," *ION GPS/GNSS 2005*, Sept., 2005.

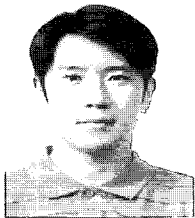
[4] 임성혁, 지규인, "GPS Repeater 기반의 실내측위 시스템 성능 분석," 제12차 GNSS Workshop, Dec., 2005.

[5] J. Caratori, Marc Francois, and N. Samama, "UPGRADE: An indoor positioning system using a standard GPS receiver," *ION GPS/GNSS 2003*, Sept., 2003.

[6] J. Caratori, Marc Francois, and N. Samama, "Upgrade simulation results for the RIS approach," *GNSS 2003*, 2003.

[7] E. D. Kaplan, *Understanding GPS Principles and Applications*, Artech House, London, 1996.

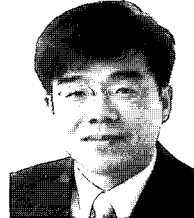
[8] S. M. Kay, *Fundamentals of Statistical Signal Processing Volume II: Detection Theory*, Prentice Hall, New Jersey, 1998.



임 성 혁

2003년 건국대학교 전자정보통신공학과 졸업. 2005년 건국대학교 전자정보통신공학과(공학석사). 2006년~현재 건국대학교 대학원 전자정보통신공학과 박사과정 재학중. 관심분야는 소프트웨어 GPS, GPS anti-jamming, GPS 신호처리,

결합 항법.



지 규 인

1959년 11월 24일생. 1982년 서울대학교 제어계측공학과(공학사). 1984년 서울대학교 제어계측공학과(공학석사). 1989년 Case Western Reserve Univ. System and Control Engineering(공학박사). 1992년~현재 건국대학교 전자정보통신공학과 교수. 관심분야는 GPS/INS 결합항법, GPS 수신기 신호처리, 무선측위, 소프트웨어 GPS, GPS anti-jamming.