

論文

DOI:10.5139/JKSAS.2010.39.3.225

GPS 위성 시계 이상 검출을 위한 위성 시계 오차 추정 정확도 향상

허윤정*, 조정호*, 허문범*

Improving Estimation Accuracy of Satellite Clock Error for GPS
Satellite Clock Anomaly Detection

Youn-Jeong Heo*, Jeongho Cho* and Moon-Beom Heo*

ABSTRACT

The satellite clock anomalies, one of the abnormal signal factors of the GPS satellites, can have a significant impact on the GPS measurements. However, it can be difficult to detect the anomalies of the satellites clock before the range of the satellites clock error becomes bigger than the range of the other factors, due to the measurement including error of the orbit, ionosphere delay, troposphere delay, multipath and receiver clock. In order to perform quick and accurate detection by minimization of critical range in anomalies of the satellites clock, this paper suggested a solution to detect precise anomalies of the satellites clock after application of carrier smoothing filter from measurement by dual-frequency and adjustment of errors which can be occurred by other factor and the receiver clock errors. The performance of the proposed method was confirmed by comparing to the satellite clock biases which are provided by IGS.

초 록

GPS 위성 이상 신호의 발생 요인 중 위성 시계의 이상 현상은 GPS 측정치에 매우 큰 영향을 미칠 수 있으나, 측정치에는 궤도 오차, 이온층 지연 오차, 대류층 지연 오차, 다중경로 오차, 수신기 시계 오차 등의 성분들이 포함되어 있어 위성 시계의 오차 범위가 다른 요소에 의한 오차보다 커지기 전에는 위성 시계의 이상 현상을 검출하기 어려운 문제가 있다. 위성 시계에 이상 현상이 발생하였을 때 이상 판별의 임계 범위를 최소화 하여 빠르고 정확하게 검출을 수행할 수 있도록, 본 논문에서는 이중 주파수 측정치로부터 반송파 스무딩 필터를 적용하고 수신기 시계 오차 및 다른 여러 가지 요인에 의한 오차를 보정한 후 정확한 위성 시계 오차를 추정하는 방법을 제시하였고 IGS 기관에서 제공하고 있는 위성 시계 정보와 비교를 통해 제시한 방법의 성능을 확인하였다.

Key Words : GPS Satellite Clock(GPS 위성시계), Clock Anomaly(시계 이상), Carrier Phase(반송파 위상), Smoothing Filter(스무딩 필터)

1. 서론

† 2010년 10월 18일 접수 ~ 2010년 3월 7일 심사완료

* 정희원, 한국항공우주연구원 위성항행항법팀

교신저자, E-mail : yjheo@kari.re.kr

대전광역시 유성구 과학로 115번지

위성항법시스템(Global Navigation Satellite System) 응용분야에서 위성의 이상 신호는 사용자의 위치 결정 성능을 저하시키므로, 항공분야

와 같이 사용자의 생명과 직결되는 응용분야에서는 위성 정보에 대한 상당히 엄격한 조건의 정확성(accuracy), 가용성(availability), 무결성(integrity)이 요구된다[1].

고성능의 위치 정보를 요구하는 항공분야에서 신뢰성 있는 위성 신호를 확보하기 위해서는 무엇보다도 즉각적으로 위성 이상 신호의 검출 및 원인을 파악하여 대처할 수 있는 기술이 중요하다. 위성 신호 이상을 가져 올 수 있는 요소로는 위성 자체적인 문제, 위성 신호 전송 중 대류층, 이온층 상태에 의한 문제, 그 밖의 여러 가지 환경적 요인이 있다. 그 중 위성의 심장이라고 불릴 수 있는 위성 시계 고장이나 이상 현상으로 발생한 이상 신호는 사용자의 측정치에 치명적인 오차로 작용하여 수 천 km의 거리 오차를 수반하기도 하고 [2], 수 m의 변화율을 보이기도 한다[3].

GPS (Global Positioning System) 주 관제국에서는 17개의 감시국으로부터 얻은 측정치를 통해 위성의 상태를 점검하고 이상 발생 시 위성의 건강 상태를 항법 메시지에 실어 방송한다. 그러나 이상 현상을 감지하고 방송하는데 소요되는 시간이 사용자의 요구조건을 만족시키지 못하는 경우가 종종 발생한다[4].

이를 극복하기 위해 수신기 자체에서 직접 위성 이상 현상을 검출하는 방법이 있다. 이 중 대표적으로 RAIM (Receiver Autonomous Integrity Monitoring)은 수신기 내부에서 여러 채널의 신호를 이용하여 이상 여부를 판별하는 방법이다. RAIM은 별도의 장비 없이 수신기 자체에서 검사를 수행할 수 있는 장점을 가지고 있지만 최소 5개 이상의 가시 위성을 확보해야만 검사가 가능하고 여러 개의 위성에서 이상이 발생한 경우에는 잘못된 판단을 수행할 가능성이 높아진다. 또한 GPS 측정치에는 위성 시계 오차 뿐만 아니라, 궤도 오차, 이온층 지연 오차, 대류층 지연 오차, 수신기 시계 오차, 다중 경로 오차 등이 포함되어 있기 때문에 위성 이상으로 측정치의 오차가 증가하여도 실제 위성에 의한 현상인지 위성 외의 요소 즉 이온층이나 대류층 등에 의한 이상 현상인지 판별하기 어려운 단점이 있다[5].

단독 측위로는 항공기 항법의 요구 조건을 만족시키지 못하므로 이를 위하여 미국의 FAA (Federal Aviation Administration) 기관에서는 근거리 위성항법 보강시스템인 LAAS (Local Area Augmentation System)를 제안하고 있다. LAAS는 DGPS (Differential GPS)의 일종으로, 항공 안전을 보장하기 위하여 위성 및 지상 제어

국에 내재한 고장에 대응할 수 있는 SQM (Signal Quality Monitoring), DQM (Data Quality Monitoring), MQM (Measurement Quality Monitoring) 무결성 보장 기법을 적용하고 있다. SQM, DQM은 수신기 내부에서 이루어지는 동작으로, 구현을 위해서는 수신기 내부에서 설계를 요하지만 MQM은 측정치를 이용하여 처리할 수 있으며, 위성고장, 전리층 폭풍, 다중 경로, 수신기 잡음 등의 영향으로 인한 GPS 신호 이상을 검출할 수 있다[6]. 특히, Acceleration, Ramp, Step 검사는 의사거리 측정치의 변화를 검출하는 기법으로, 위성 시계 고장에 의하여 의사거리 측정치에 이상이 발생한 경우 위성 시계 이상 검출이 가능하다. 그러나 위성 시계 이상에 의한 고장이 계단 함수 형태 또는 일정 크기의 기울기를 갖는 형태의 오차가 발생하였을 경우에만 검출이 가능하여 검출 속도가 느린 단점이 있다. 이와 같이 위성 이상 신호를 감지하고 이를 보강해 줄 수 있는 기술들이 개발되어 운영되고 있으나, 위성 이상 신호의 검출 능력을 높이고, 고장의 원인을 규명하여 빠른 시간 내에 대처할 수 있는 기술들이 계속적으로 요구되고 있다.

GPS 위성 시계는 시간이 지남에 따라 자연적인 경년(aging) 현상으로 인해 주파수 드리프트가 발생하여 GPS 시각에 대한 바이어스가 존재하며, 외부적 환경적 요인에 의해 위상 도약(phase jump), 주파수 도약(frequency jump), 주파수 증가(frequency increasing) 등의 갑작스런 이상 현상이 발생하기도 한다. 이러한 위성시계 이상 현상을 검출하기 위한 다양한 기법들이 연구되어 왔으나[7-10], 이들 결과 대부분은 지상의 실험실에 설치되어 있는 원자시계로부터 직접 자료를 전송 받아 이상 현상을 검출하는 실험들에 의한 것으로서, GPS 측정치와 같이 여러 가지 요소에 의한 오차가 포함된 자료로부터 실시간으로 위성 시계 이상 현상을 검출하기 위해서는 정확하고 정밀한 위성 시계 오차를 결정하는 기술 개발이 선행되어야 한다. 따라서 본 논문에서는 여러 오차 요인이 내재하고 있는 GPS 측정치에서 신속하고 정확하게 위성 시계 이상 현상을 검출할 수 있도록 위성 시계 오차 추정 정확도를 향상시키는 기술에 초점을 맞추고자 한다. 위성 시계의 성향을 정확하게 파악하기 위해서 우선 GPS 측정치로부터 반송파 스무딩 필터를 적용해 잡음 크기를 낮추고 다른 여러 가지 요소에 의한 오차들을 최대한 정확하게 제거한 후 위성 시계 바이어스를 추정한다. 추정된 결과를 IGS (International GNSS Service) 기관으로부터 제공

되는 위성 시계 정보와 비교하여 성능을 확인한다. 또한, LAAS의 위성신호 이상 검출 기법 중에 하나인 측정치 변화 검사 기법과의 비교를 통해 위성시계 이상 검출 신속성을 확인한다.

II. GPS 위성 시계 오차 추정 기법

위성 시계의 이상 현상을 검출하기 위해서 우선 위성 시계의 바이어스 정보를 획득한다. Fig. 1은 GPS 측정치로부터 위성 시계 바이어스를 추정하기 위한 시스템 구성도이다. GPS 측정치에 포함된 오차 중 위성 시계 외의 오차 요소, 즉 위성의 위치, 이온층 지연, 대류층 지연, 수신기 시계에 의한 오차들을 최대한 제거하여야만 정확한 위성 시계 바이어스를 추정할 수 있다. 본 절에서는 제안한 위성 시계 바이어스 추정 방법에 대해서 기술한다.

2.1 반송파 스무딩 필터

Fig. 1과 같이 수신기 A로부터 수신한 GPS 코드 의사거리 측정치와 반송파 위상 측정치는 아래와 같은 모델식으로 표현할 수 있다.

$$P_A^i = \| X^i - x_A \| + c(B_A - B^i) + I^i + T^i + \epsilon_p \quad (1)$$

$$\Phi_A^i = \| X^i - x_A \| + c(B_A - B^i) - I^i + T^i + \lambda N + \epsilon_\phi \quad (2)$$

여기서 식(1)과 식(2)의 각 항의 의미는 아래와 같다.

P_A^i : 수신기 A가 측정한 i 번째 위성의 코드 의사거리 측정치

Φ_A^i : 수신기 A가 측정한 i 번째 위성의 반송파 위상 측정치

X^i : ECEF 좌표계로 표현한 i 번째 위성의 위치

x_A : ECEF 좌표계로 표현한 수신기 A의 위치

B_A : 수신기 시계 오차

B^i : i 번째 위성의 시계 오차

I : 이온층 지연 오차

T : 대류층 지연 오차

N : 초기 미지정수

$\epsilon_p, \epsilon_\phi$: 수신기 잡음 오차

주파수 L1과 L2의 코드 의사거리에 식(3)과 식(4)와 같이 각각 반송파 스무딩 필터를 적용할 수 있다[11].

$$\hat{P}_1(t) = \Phi_1(t) + \overline{P_1} - \overline{\Phi_1} + 2 \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \times [(\Phi_1(t) - \Phi_2(t)) - (\overline{\Phi_1} - \overline{\Phi_2})] \quad (3)$$

$$\hat{P}_2(t) = \Phi_2(t) + \overline{P_2} - \overline{\Phi_2} + 2 \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} \times [(\Phi_1(t) - \Phi_2(t)) - (\overline{\Phi_1} - \overline{\Phi_2})] \quad (4)$$

여기서 $\hat{P}_F(t)$ 는 t 시각에 대한 주파수 L1과 L2의 반송파 위상 측정치로 스무딩된 코드 의사거리이고, $\overline{P_F}$ 와 $\overline{\Phi_F}$ 은 각각 샘플링 주기에 대한 코드 의사거리와 반송파 위상 측정치의 평균값이다. 식(3)과 식(4)를 보면, 스무딩된 코드 의사거리는 코드와 반송파 위상 측정치의 평균값이 적용되어 현재의 반송파 위상 측정치에 포함된 측정 잡음에만 영향을 받음을 알 수 있다. 따라서 코드 측정치에 비해 측정 잡음의 영향이 줄어들

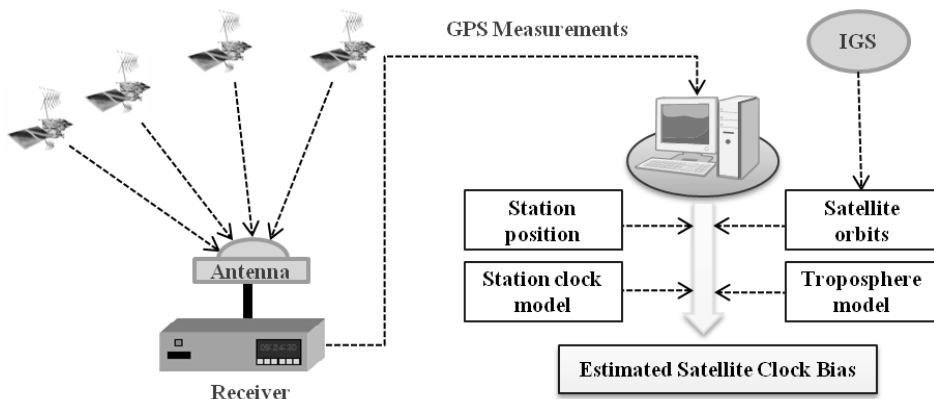


Fig. 1. Architecture for estimation of GPS satellite clock bias

어 위성 시계 바이어스 추정 시 더욱 정밀한 결과를 얻을 수 있고, 미지정수가 포함되어 있지 않으므로 미지정수를 결정하지 않고도 반송파 위상의 해상도를 가질 수 있다.

2.2 오차 요소 보정

Fig. 2는 GPS 측정치로부터 위성 시계 바이어스를 추정하는 과정을 나타낸 것이다. 앞서 1절에 표현한 반송파 스무딩 코드 측정치와 위성 위치와 수신기 위치를 적용하여 구한 위성파 수신기간의 거리를 차분하여 오차 성분만을 남긴다. 위성까지 거리 계산의 정확도를 높이기 위해서 수신기 위치는 정밀 측위 기법으로 결정된 미리 정해진 좌표를 이용하고, 위성 위치는 IGS 기관으로부터 받은 정밀 궤도력을 이용한다. 실시간 위성 위치 결정을 위해서는 IGS Ultra Rapid 예측 궤도 정보를 활용할 수 있다. 정확도가 1 m 인 항법력을 이용하는 것보다 정확도가 10 cm 이하인 IGS 위성 궤도 예측 정보를 적용하면 더욱 정확하게 위성까지의 거리를 결정할 수 있다.

단일 주파수를 사용하는 경우에는 이온층 지연 오차를 이온층 모델을 사용하여 추정하는데 일반적으로 약 50% 정도의 오차 보정만이 가능하므로, 오차 보정 성능을 높이기 위해서 식(3)과 식(4)와 같이 이중 주파수 측정치로 결정된 반송파 스무딩 코드 의사거리를 식(5)와 같이 선형 조합하여 이온층 지연 오차를 보정한다[12].

$$\hat{P}_3 = \frac{1}{f_1^2 - f_2^2} (f_1^2 \hat{P}_1 - f_2^2 \hat{P}_2) \quad (5)$$

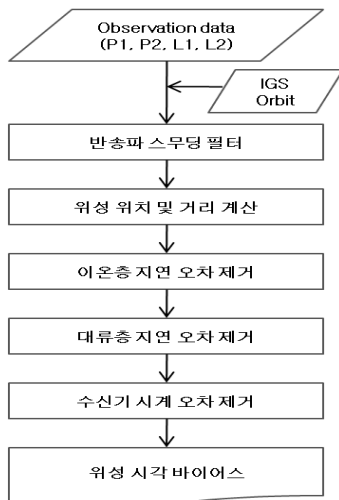


Fig. 2. Process of estimating satellite clock bias

GPS 위성 신호에 대한 대류층의 영향은 비산란(non-dispersive)특성으로 반송파와 무관하여 이중 주파수 측정치로는 제거되지 않는다. 대류층 지연의 영향을 보정하기 위한 다양한 모델들이 발표되었고, 그 중 간편한 대류층 지연 보정 모델을 사용할 경우 20 cm 이내의 정확도로 보정이 가능하고 위성 고도각이 15도 이상인 경우는 모델에 따라 큰 편차 없이 유사한 보정값이 제시되므로, 일반적으로 흔히 사용하는 Hopfield 모델[13]을 통해 오차를 보정한다.

GPS 수신기 시계 오차는 차분 방법 등을 통해 제거되기 때문에 위치 결정 시 큰 영향을 미치지 않지만, 위성 시계 바이어스 추정 시에는 수신기 시계 오차를 고려하지 않으면 고스란히 위성 시계 오차로 적용되므로 정밀하고 정확한 수신기 시계 오차 보정이 필요하다. 수신기 시계 오차는 수신기 바이어스와 측정 잡음 성분으로 이루어져 있으며, 바이어스는 백색잡음에 의해 램덤 워크 성향을 갖는 주파수 오차의 누적으로 발생된다. 일반적으로 수신기 시계 오차는 여러 위성으로부터 받은 측정치의 평균을 이용하여 구할 수 있다. 수신기 시계 오차 추정치에는 바이어스 외에 잔여오차가 포함되어 있으므로 신뢰도를 저하시키는 것을 방지하기 위하여 이동 평균법(moving averaging) 이용하여 잡음을 줄인다. 위성 이상을 감시하는 수신기 안테나는 다중경로 영향을 최대한 줄인 환경에 설치되어 있다고 가정하고 다중경로 오차는 고려하지 않는다.

III. GPS 위성 시계 바이어스 추정

3.1 수신기 시계 오차 보정

GPS 측정치로부터 위성 시계 바이어스 추정 정확도를 높이기 위해 정확한 수신기 시계 바이어스(RCB)를 추정해야 한다. 본 연구에서는 정밀 측지 및 시각분야에 사용되고 있는 JPL (Jet Propulsion Laboratory)에서 개발한 GIPSY-OASISII 소프트웨어를 사용하여 정확한 수신기 시계 바이어스를 추정하였다. 한국항공우주연구원에서는 제주도 공항공사에 위성신호 무결성 감시를 위해 IMT (Integrity Monitor Testbed) 장비를 설치하여 운용하고 있다. 수신기는 Novatel 사의 DL-V3 이중주파수 수신기로, Fig. 3은 후처리로 추정한 수신기 시계 바이어스를 나타낸 것이다. 하루 동안 시계의 변화폭이 30 ns 정도로 안정된 상태를 보이는 않지만, DOY (Day Of Year) 42일 결과와 비교 시 다음 날인 DOY 43일에도

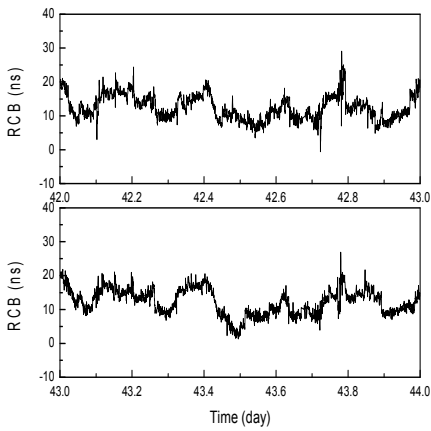


Fig. 3. IMT Receiver clock bias

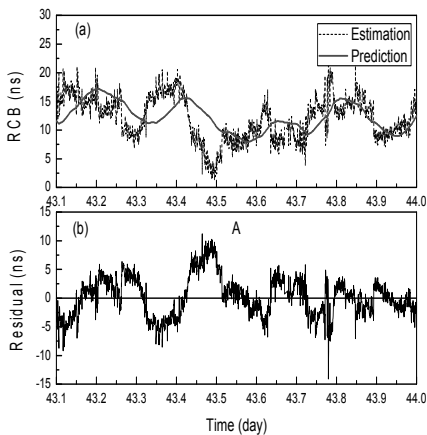


Fig. 4. Prediction of Receiver clock bias

같은 시간대에 비슷한 성향으로 변화를 보이고 있다. 두 날에 대한 자료간의 상관계수(correlation coefficient)를 살펴보면 0.7 정도로 수신기 시계가 주기적으로 비슷한 성향을 갖는다고 할 수 있다. 수신기 시계는 전자소자, 외부 온도 등 환경에 의한 영향을 받아 각수신기마다 특성들이 다르게 나타나므로, 각 수신기의 성향을 효과적으로 나타낼 수 있는 적합한 모델링이 수행되어야 한다.

이동평균은 시계열자료가 일정한 주기를 갖고 비슷한 패턴으로 움직이고 있을 경우에 적용시킬 수 있는 방법으로, 불규칙 요인을 제거하고 앞으로의 추세를 예측할 수 있다. 이동평균 기법을 적용하여 IMT 수신기 시계 오차의 모델링을 수

행하고 이를 통해 예측된 결과와 측정치 결과를 나타낸 것이 Fig. 4 (a)이다. 점선은 수신기 시계 바이어스 측정치이고 실선은 예측치로서, 두 결과의 차이를 Fig. 4 (b)에 나타내었다. 이동평균을 위한 포인트 개수는 상관계수가 가장 최대치를 갖는 경우를 찾아 적용하였다.

3.2 위성 시계 오차 추정 성능

모델링을 통해 결정된 수신기 시계 오차를 보정하여 위성시계 오차를 추정하였다. Fig. 5 와 6은 수신기 시계 오차 보정(RC: Receiver clock Correction)을 수행하였을 경우와 아닌 경우에 각각 PRN02과 PRN18 위성의 시계 오차 추정 결과를 IGS 위성 시각 정보와 비교한 것이다. Fig. 5 (a)는 PRN02 위성의 시계 바이어스 추정 결과를 나타낸 것으로, 수신기 시계 오차 보정 후의 결과는 IGS 위성 시계 정보와 거의 일치하는 것을 볼 수 있다. Fig. 5 (b)는 IGS 위성 시계 바이어스에 대한 잔차를 나타낸 것으로, 수신기 시계 오차 보정을 수행하지 않은 결과는 10 ns 이상의 오프셋이 존재하는 것을 알 수 있다. Fig. 6 (a)와 (b)에 표현한 PRN18 위성의 경우도 비슷한 성능을 갖는다. Table 1은 수신기 시계 오차를 보정 전후에 따른 PRN2와 PRN18 위성의 시계 오차 추정 정확도를 나타낸 것으로, 수신기 시계 오차보정을 통해 RMS 정확도가 5배 이상 향상된 것을 확인할 수 있다. 모든 위성에 대한 위성시계 추정 오차 분포의 평균은 0.03이고 표준편차는 1.05 m 이었다.

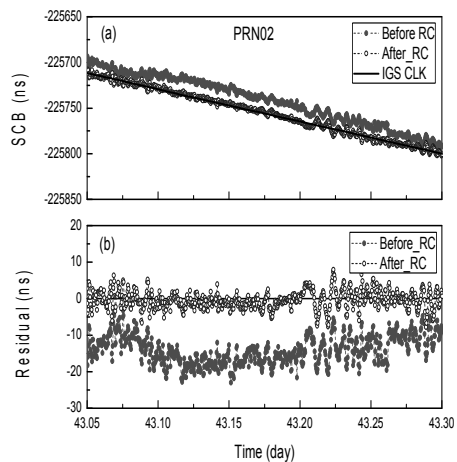


Fig. 5. PRN02 satellite clock bias

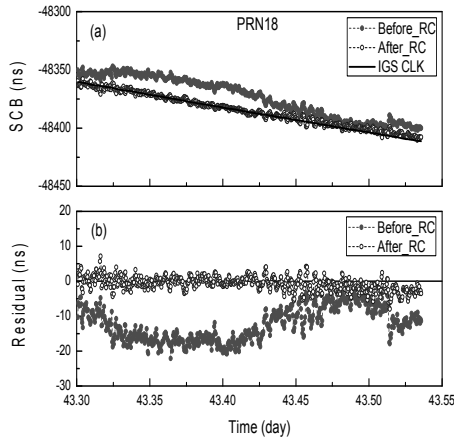


Fig. 6. PRN18 satellite clock bias

Table 1. Estimated satellite clock bias statistics

	PRN	보정 전	보정 후
평균	2	-13.9	-0.4
	18	-12.4	-0.8
표준 편차	2	3.9	2.6
	18	4.8	2.0
RMS	2	14.5	2.6
	18	13.2	2.1

3.3 위성 시계 이상 검출 성능

느리게 변화가 나타나는 위성 시계 이상 현상에 대한 검출 성능을 확인하기 위해 정상적인 경우에 수집한 PRN18 위성 측정치에 위성 시계 이상에 의한 영향 즉, 0.005 m/sec으로 증가하는 오차를 추가 한 후 제시한 방법에 의한 결과와 기존의 LAAS에서 사용하는 측정치 변화 검사결과와 비교하였다. Fig. 7은 측정치 변화 검사 중에 위성시계 이상 유무를 알 수 있는 Ramp 검사 기법을 이용한 결과로서, L1 반송파 위상 측정치의 시간각 차분치를 사용한 것이다. 모든 위성에 대한 시험 통계치를 통해 결정된 Ramp 검사의 임계치는 0.1 m/sec으로서 0.005 m/sec로 증가하는 위성 시계 이상 현상은 검사하지 못한 반면, Fig. 8과 같이 제안한 방법으로 얻은 결과의 경우에는 임계치를 6 m로 사용하였을 경우 위성 시계 오차가 0.005 m/sec으로 느리게 변화하는 경우에도 약 1000초 이후에 이상 여부를 판단하는 것을 확인할 수 있었다.

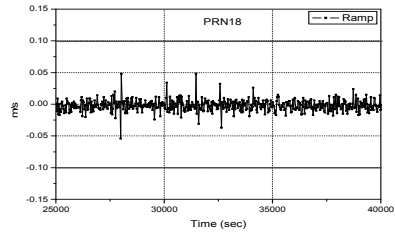


Fig. 7. PRN18 satellite RAMP results

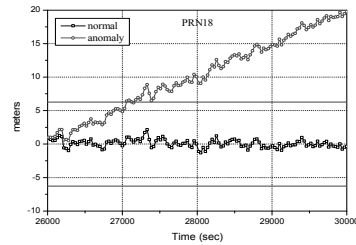


Fig. 8. PRN18 satellite clock bias error

IV. 결 론

본 연구에서는 여러 가지 오차 요소가 존재하는 GPS 반송파 위상과 코드 측정치로부터 위성 시계 이상 현상을 효과적으로 검출할 수 있도록 반송파 스무딩 필터를 적용하고 이온층, 대류층, 수신기 오차를 제거하여 정밀한 위성 시계 정보를 추정하도록 하였다. 일반 수신기 시계의 경우 외부적 환경의 영향을 쉽게 받아 안정되지 못한 상태를 보이므로 모델링이 어려운 단점이 있으나, IMT 수신기의 경우 연속적인 관계성을 이용하여 수신기 오차를 효과적으로 보정할 수 있었고 이를 통해 더욱 정확한 위성 시계 바이어스를 추정할 수 있었다. 그 결과 위성 이상 유무 판단 임계 범위를 최소화함으로써 위성 이상 시 즉각적이며 효율적으로 감지 및 판단할 수가 있었다. 향후 IMT 수신기의 주기적인 특성에 대한 연구와 위성시계의 예측 결과와 상호 비교를 통해 이상 판단을 수행할 수 있는 모니터링 시스템을 구축하여 실시간 응용분야에 적용하기 위한 연구로 확장할 예정이다.

후 기

본 연구는 국토해양부 항공용 위성항행 통신 시스템 개발사업(10항공-항행01)의 연구비 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌

- 1) ICAO, ICAO Annex 10, "International Standards and Recommended Practices, Aeronautical Telecommunications", Vol. I, Radio Navigation Aids, 2001.
- 2) Kovach, K., "GNSS Application and Methods", Artech House, 2009.
- 3) Gleason, S. and Gebre-Egziabher, D., "SVN-23/PRN-23 integrity failure of 01 January 2004, CGSIC" 43rd Meeting Summary Report, 2004.
- 4) Parkinson, B. W. and Spilker, J., "The Global Positioning System: Theory and Applications", AIAA, Washington, DC, 1996.
- 5) Grover, B., "Receiver autonomous integrity monitoring, Global Positioning System: Theory and Applications", Vol. II, American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc., 1996.
- 6) Gang, X., "Optimal On-Airport Monitoring of the Integrity of GPS-Based Landing Systems", Stanford University, 2004.
- 7) Nunzi, E., Galleani, L, Tavella, P., Carbone, P., "Detection of Anomalies in the Behavior of Atomic Clocks", IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 56, No. 2, pp. 523~528, 2007.
- 8) Riley, W. J., "Algorithms for Frequency Jump Detection", Metrologia, Vol. 45, pp. 154~161, 2008.
- 9) Czopek, S., "Frequency and phase break detection", in Proc. 41st PTTI Meeting, pp. 145-154, 2009.
- 10) Wang, Q. and Rochat, P., "An anomaly clock detection algorithm for a robust clock ensemble", in Proc. 41st PTTI Meeting, pp. 121-130, 2009.
- 11) Beutler, G., Bernese "GPS Software Version 4.2", Astronomical Institute, University of Bern, 2001.
- 12) Misra, P. and Enge, P., "Global Positioning System: Signal, Measurement, and Performance, Ganga-Jamuna Press", 2001.
- 13) Hopfield, H. S., "Two-quartic tropospheric refractivity profile for correcting satellite data," Journal of Geophysical Research, pp. 4487-4499, 1969.