

원자 시계를 이용한 GPS 위성 고장 판단

김정원*, 손석보**, 황동환***, 이상정***, 박찬식****, 서상현*****

* 충남대학교 전자공학과, **(주)네비콤, ***충남대학교 전기정보통신공학부, **** 충북대학교 전기전자컴퓨터공학부, *****한국해양연구원 해양시스템안전연구소

GPS Satellite Fault Detection Using Atomic Clock

Kim Jeong Won*, Son Seok Bo**, Hwang Dong-Hwan***, Lee Sang Jeong***, Park Chansik****, Suh Sang Hyun*****

* Department of Electronics Engineering, Chungnam National University, **Navicom Ltd.,

*** School of Electrical Engineering and Information and Communication Engineering, Chungnam National University,

****School of Electrical and Computer Engineering, Chungbuk National University,

***** Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering, Korea Ocean Research and Development Institute

Abstract - 본 논문에서는 원자 시계를 이용한 위성 시계 고장 판단 기법을 제안한다. GPS 측정치 중 위성 시계 오차 성분을 제외한 위성 궤도 오차, 이온층 지연 오차, 대류층 지연 오차, 수신기 시계 오차를 제거하여 위성 시계 오차에 의한 영향만을 검사하도록 한다. 특히 TCXO와 같은 일반적인 수신기 시계를 사용할 경우 정확한 수신기 시계 오차 크기를 추정하기 어렵기 때문에 원자 시계와 같은 정밀 신호 발생기를 이용하여 수신기 시계 오차에 의한 영향을 제거하는 방법을 제시한다. 제시한 방법은 실제 위성 시계에 이상이 발생했을 때 수집한 데이터를 이용한 실험을 통하여 검증하도록 한다.

1. 서 론

현재 사용되고 있는 GPS 위성들 중에는 10년 이상 사용된 위성들도 있다. GPS 위성에 내장된 하드웨어는 고장을 대비하기 하기위하여 중복으로 장착되어 운영되고 있지만 장기간 사용으로 인한 노후화로 인하여 예기치 못한 고장이 발생하기도 한다. 사용자 입장에서 위성의 고장 여부를 인식하는 방법에는 크게 세 가지가 존재한다. MCS(Master Control Station)가 위성에 전송한 항법 메시지를 수신하여 인지하는 방법 또는 수신기 자체에서 RAIM(Receiver Autonomous Integrity Monitoring)과 같은 방법을 이용하거나 각 지역에 설치된 DGPS 기준국에서 검사하여 방송되는 정보를 이용하는 방법이 있다 [1][2]. 항법 메시지에 있는 위성 상태 정보는 갱신 주기가 길기 때문에 즉시 고장을 발견하기가 어렵고 RAIM이나 DGPS 기준국의 감시 기법은 측정치에 대한 검사만 수행하기 때문에 위성 고장을 검출하기는 어렵다.

GPS 측정치에는 위성 시계 오차, 궤도 오차, 이온층 지연 오차, 대류층 지연 오차, 수신기 시계 오차, 다중 경로 오차등이 포함되어 있다. 이러한 오차 성분들로 인하여 위성에 이상이 발생하여 측정치의 오차가 증가하는 현상이 발생한 경우에도 실제 위성에 발생한 이상에 의한 현상인지 보통의 오차 성분들에 의한 것인지 판별하기가 어렵기 때문에 위성의 고장이 다른 오차 성분보다 커지기 전에는 검출하기가 어렵다.

본 논문에서는 위성 고장, 특히 위성 시계의 고장을 검출하는 방법을 제시한다. 위성 시계의 고장은 사용자의 측정치 오차에 매우 큰 영향을 주기 때문에 고장 발생 여부를 빠르게 검출하여야 하지만 앞서 서술한 바와 같은 이유로 인하여 기존의 고장 검출 방법으로는 검출 시

간에 한계를 가지고 있다. 본 논문에서는 측정치에 포함된 오차 성분들을 원자시계, 정밀 궤도력 및 이중 주파수 측정치 등을 이용하여 제거하여 위성 시계에 대한 오차만을 검사하고 고장 여부를 판단할 수 있는 방법에 대하여 제시하고자 한다. 제안한 방법은 실제 고장이 발생했을 때 수집한 정보를 이용하여 검증하도록 한다.

2. GPS 위성 시계 고장

GPS 위성에는 정밀한 시각 정보를 위하여 세슘 또는 루비듐 원자 시계가 중복으로 탑재되어 있다. 위성 시계의 오차는 빛의 속도에 비례하여 증가하고 이는 사용자의 항법 오차에 직접적으로 나타나기 때문에 위성 시계는 매우 정확해야 한다. 그렇지만 GPS가 운영되는 과정 중에 위성 시계에 고장이 발생한 사례들이 보고된 바 있다. 가장 최근의 고장 사례로는 2004년 1월에 23번 위성의 시계에 고장이 발생한 경우가 있다. 그림 1은 23번 위성 시계에 고장이 발생했을 때 의사거리 오차를 나타낸 그림이다.

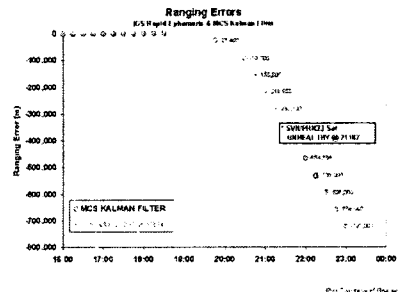


그림 1. 2004년 1월 23번 위성의 의사거리 오차

18:30 정도부터 증가하기 시작한 의사 거리 오차는 최대 약 700km까지 증가했다. 고장의 원인은 위성의 루비듐 시계 불량으로 L1 주파수에 최대 371MHz까지 오차(70.6 m/sec 의사거리 변화율 오차)를 유발하였다. 이 날 MCS에서는 3 시간이 경과하도록 고장을 검출하지 못하였고 사용자들은 이 신호를 그대로 사용하였다.

3. GPS 위성 시계 오차

GPS 위성에 탑재된 원자시계는 매우 정확한 시계이지만 시간이 지남에 따라 오차를 가진다. 위성 시계 오차는 지상 감시국의 측정치를 이용하여 오차를 추정하고 MCS는 이를 GPS 위성에 전송한다. GPS 위성은 위성 시계 오차 정보를 항법 메시지에 포함시켜 방송하고 사용자는 이를 이용하여 측정치에 발생하는 위성 시계 오차를 보정하여 사용한다. 위성 시계 오차 파라미터인 바이어스, 드리프트, 드리프트 변화율은 서브프레임 1번에 포함되어 있고 사용자는 식(1)과 같은 다항식을 이용하여 위성 시계 오차를 계산할 수 있다.

$$\epsilon_{sv_clock} = a_0 + a_1(t-t_{oc}) + a_2(t-t_{oc})^2 \quad (1)$$

여기서 a_0, a_1, a_2 는 각각 바이어스, 드리프트, 드리프트 변화율을 나타낸다. 이와 같이 항법 메시지에 포함되는 위성 시계의 오차는 7ns이내의 정확도를 가진다고 알려져 있다.

4. GPS 위성 시계 감시 기법

GPS 측정치에는 여러 가지 측정치 오차가 포함되어 있고 그 중 위성 시계에 의한 오차만을 관측하기 위해서는 다른 오차 성분들을 제거하여야 한다. 이 절에서는 GPS 측정치의 포함된 위성 시계 오차만을 추정하는 방법과 고장 발생 여부를 판별하는 방법에 대하여 제시하도록 한다.

4.1 위성 시계 오차 추정 기법

GPS 위성 측정치는 식(2)와 같은 식으로 표현된다.

$$\Phi_A^i = \|X^i - x_A\| + c(B_A - B^i) + E + I + T + M + v \quad (2)$$

여기서 x^i 는 i 번 위성의 위치, x_A 는 수신기 A의 위치를 나타내고 B_A, B^i, E, I, T, M, v 는 각각 위성 시계 오차, 수신기 시계 오차, 위성 궤도 오차, 이온층 지연 오차, 대류층 지연 오차, 다중 경로 오차, 수신기 잡음 오차를 나타낸다.

수신기가 정밀 측위된 장소에 설치된다면 x_A 는 정확하게 알 수 있고 위성의 위치인 x^i 도 IGS(International GPS Service)에서 제공하는 정밀 궤도력을 사용한다면 10cm이내의 정확도로 추정할 수 있다.

이온층 지연 오차는 이온층 지연 모델을 이용하여 제거하는 기법과 이중 주파수 측정치를 이용하여 제거하는 기법이 사용되는데 이온층 지연 모델을 이용하는 경우에는 약 50%정도의 정확도로 추정할 수 있는 것으로 알려져 있다. 이중 주파수 측정치를 사용하는 경우에는 이온층 지연 오차를 완벽하게 추정할 수 있다[1].

대류층 지연 오차는 L1, L2 주파수에 같은 영향으로 나타나기 때문에 이중 주파수 측정치를 이용하더라도 정확한 추정이 어렵다. 대류층 지연 오차는 대류층 지연 모델을 이용한 추정만 가능하고 Saastamoinen 모델, Hopfield 모델, Magnavox 모델, Collins 모델등이 있다. 대류층 지연 모델을 이용한 경우에도 약 50% 정도의 정확도로 추정이 가능하다고 알려져 있다[1].

다중 경로 오차와 열잡음 오차의 추정은 불가능하고 이를 제거하기 위해서는 초크링과 같은 장비를 이용하거나 다중 경로 신호가 발생하지 않는 환경에 수신기를 설치하고 잡음 특성이 우수한 수신기를 사용해야 한다.

수신기 시계 오차는 측정치들에 대한 평균치를 이용하여 추정할 수도 있지만 수신기에 정밀한 원자 시계를 사용한다면 수신기 시계 오차를 거의 완벽하게 제거할 수 있을 것이다. 세슘 원자 시계의 경우 10^{-14} 내지 10^{-15} 의 정확도를 가지므로 원자 시계를 사용할 경우 수신기 시계 오차는 3×10^6 m 내지는 3×10^7 m의 의사거리 오차

로 나타나기 때문에 무시할 수 있다.

4.2 위성 시계 고장 판단 기법

GPS 위성 시계에 의한 사용자의 항법 오차 증가는 항법 메시지에 포함되어 있는 위성 시계 오차 보정 정보와 실제 위성 시계 오차 정보와의 상이함에서 발생한다. 위성 시계가 크게 발생하였다더라도 항법 메시지에 포함되어 있는 위성 시계 오차 정보가 정확하다면 고장이라 볼 수 없다. 본 논문에서는 방송 정보에 포함되어 있는 시계 오차 보정 정보와 추정된 위성 시계 오차를 비교하여 고장 여부를 판단하는 방법을 제시하도록 한다. 항법 메시지에 포함되어 있는 위성 시계 오차 정보는 앞서 기술하였듯이 7ns이내의 정확도를 가진다. 만약 위성 시계가 정상이라면 측정치로부터 추정된 위성 시계 오차와 항법 메시지의 오차 정보가 일치해야 한다. 위성 시계 고장 여부를 판별하기 위해서 두가지 정보를 사용할 수 있다. 첫 번째는 항법 메시지에 있는 위성 시계 오차 파라미터로 계산한 위성 시계 오차, 두 번째는 측정치를 이용하여 추정된 위성 시계 오차를 사용할 수 있다. 짧은 시간 동안의 위성 시계 오차를 일정한 평균 μ 와 분산 σ^2 의 가우시안 분포를 따르는 확률 변수라고 가정하면 항법 메시지에서부터 계산한 위성 시계 오차 정보와 추정된 위성 시계 오차의 표본으로부터 다음과 같은 가설을 세울 수 있다.

$$\begin{aligned} H_0: \mu_1 &= \mu_2 \\ H_1: \mu_1 &\neq \mu_2 \end{aligned} \quad (3)$$

가설 H_0 는 항법 메시지의 위성 시계 오차 정보의 평균 μ_1 과 추정된 위성 시계 오차 정보의 평균 μ_2 가 일치한다는 가설이고 H_1 는 일치하지 않는다는 가설이다.

만약 가설 H_0 가 성립하지 않는다면 위성 시계에 고장이 발생했다고 판단할 수 있다. 두 정보의 분산을 정확하게 모르고 짧은 시간동안의 샘플을 사용한다면 t-분포를 이용하여 검정할 수 있다. 검정 통계량은 다음 식(4)와 같이 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} T &= \frac{(\bar{X}_1 - \bar{X}_2)}{s_p \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} \\ s_p^2 &= \frac{(n_1 - 1)s_1^2 + (n_2 - 1)s_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 \bar{x}_1 와 \bar{x}_2 는 표본 평균을 나타내고 n_1 과 n_2 는 표본 수, s_1^2 와 s_2^2 는 표본 분산을 나타낸다. 두 표본에 대한 검정은 다음 식(5)와 같은 기각역을 이용하여 검정한다.

$$|T| > t_{(\alpha/2; n_1 + n_2 - 2)} \quad (5)$$

예를 들어 5%의 유의수준 내에서 두 표본간의 검정을 수행한다면 검정 통계량이 2.11보다 크거나 -2.11보다 작은 경우에는 H_0 를 기각하고 위성 시계에 고장이 발생하였다고 볼 수 있다.

5. 실험

실제 위성 시계에 고장이 발생하였던 2004년 1월 1일의 23번 위성에 대한 데이터를 이용하여 실험을 수행하였다. 실험 데이터는 한국 천문 연구원 대전 GPS 상시 관측소에서 수집된 데이터를 이용하였다. 대전 관측소에 설치된 수신기는 Trimble사의 4000SSI 이중 주파수용 수신기이다. 측정치는 24시간의 데이터가 30초간격으로 저장된 RINEX파일 포맷으로 제공된다[4]. 이 데이터 중 18시 06분부터 21시 21분데이터를 이용하여 실험을 하였다. 표 1은 상시 관측소의 정밀 위치를 나타낸다.

표 1. 대전 상시 관측소 기준국 위치

	X(m)	Y(m)	Z(m)
좌표	-3120041.850	4084614.937	3764026.961
정확도(1σ)	0.2mm	0.2mm	0.2mm

5.1 위성 시계 오차

먼저 항법 메시지에 포함되어 있는 위성 시계 오차 파라미터를 이용하여 위성 시계 오차를 계산하였다.

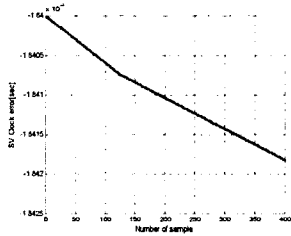


그림 2. 항법 메시지로부터 계산한 23번 위성 시계 오차

항법 메시지로부터 계산한 위성 시계 오차는 평균 -0.0001841 초 인 것을 확인 할 수 있다. 의사거리 측정치를 이용하여 위성 시계 오차를 추정하였다. 수신기 시계 오차는 원자 시계를 사용하는 대신 각 측정치에 평균을 구하여 추정된 값을 사용하였다. 그림 3은 추정된 수신기 시계 오차를 나타내고 있다.

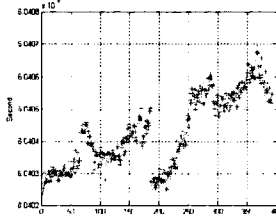


그림 3. 추정된 수신시 시계 오차

그림 4는 앞서 구한 수신기 시계 오차, 이온층 지연 오차, 대류권 지연 오차, 위성 궤도 오차를 의사거리 측정치로부터 제거하여 구한 위성 시계 오차이다.

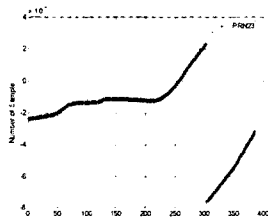


그림 4. 추정된 23번 위성의 시계 오차

실험 시작 시간인 18시6분에 추정된 위성 시계 오차는 -0.00023914 초이다. 이 시간에 계산한 위성 시계 오차는

-0.000184001 초이다. 이 시간에는 위성 시계가 정상적으로 동작하였다고 알려져 있기 때문에 두 값 사이의 차이는 수신기 시계 오차를 추정하면서 발생한 오차로 인한 것으로 판단된다. 18시 6분에 위성 시계가 정상이라 보면 추정된 위성 시계 오차는 -0.0000551414 초 만큼 오차가 있다고 볼 수 있고 이를 보정하면 그림 5와 같이 다시 나타낼 수 있다.

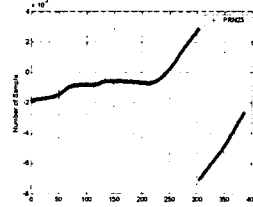


그림 5. 추정 오차 보상한 위성 시계 오차
계산한 위성 시계 오차와 추정된 위성 시계 오차에 대한 검정 통계량을 구하면 다음과 같다. 이 때 20샘플 간격으로 평균과 분산을 구하여 사용하였다. 그림 6에 검정 통계량을 나타내었다.

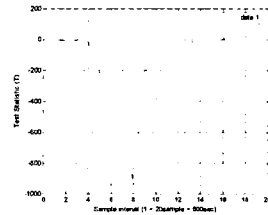


그림 6. 계산한 검정 통계량

95%의 신뢰도로 두 가지 위성 시계 오차 정보에 대한 검사를 수행하면 두 번째 샘플 구간에서 검정 통계량의 기각역 한계인 -2.11 을 초과하는 것을 확인하였고 이를 바탕으로 위성 시계가 고장이라고 판별할 수 있다. 1샘플 구간이 20개의 샘플로 이루어져 있고 샘플사이 간격이 30초이므로 두 번째 샘플 구간의 시간은 약 18시 26분이다. 측정치로부터 위성 시계 오차 추정시 실제 수신기 시계 오차, 대류권 지연 오차에 대한 추정 오차가 존재하였고 이로 인해 검사에 오차가 존재할 수도 있지만 두 가지의 위성 시계 오차 정보를 이용하여 위성 시계의 고장 유무를 판단할 수 있었다.

6. 결 론

본 논문에서는 원자 시계를 이용한 위성 시계 오차 추정 기법을 제시하였고 이를 바탕으로 위성 시계의 고장 판별 기법을 제안하였다. 제안한 방법은 항법 메시지에 포함된 위성 시계 오차와 추정된 위성 시계 오차 정보를 이용하여 고장을 판단하는 기법이다. 실제 위성 시계에 고장이 발생한 데이터를 이용한 실험을 통하여 성능을 검증하였다.

추후로는 실제 원자시계를 적용한 실험을 수행하고 원자 시계의 정확도와 추정된 이온층, 대류층, 위성 궤도등의 정확도를 고려한 위성 시계 고장 판단 기법에 대하여 연구하도록 하겠다.

[참 고 문 헌]

- [1] Parkinson, B. W., Spilker, J., Jr., Axelrad, P., *The Global Positioning System: Theory and Applications*, AIAA, Washington, DC, 1996.
- [2] P. Misra, Per Enge, *Global Positioning System: Signal, Measurement, and Performance*, Ganga: Jamuna Press, 2001.
- [3] 전치혁 외, *공학 응용 통계*, Postech press, 1998.
- [4] <http://www.gps.re.kr>, 한국 천문 연구원 GPS 연구 그룹 웹 사이트.