

Article

GPS 의사거리-반송파 위상 측정치의 고장검출을 위한 임계값 결정 연구

손은성*, 김군택*, 임성혁*, 이은성*, 허문범*, 남기욱**

A Study of Threshold Determination of The GPS measurement failure using GPS Code-Carrier Divergence Test

Eunseong Son*, Koon-Tack Kim*, Sung-Hyuck Im*, Eun-Sung Lee*, Moon Beom Heo* and Gi-Wook Nam**

ABSTRACT

In this study, The code-carrier divergence test was applied to GPS measurements, and the results were compared and analyzed. The GPS data used for the threshold determination were obtained from Global Navigation Satellite System permanent stations built by the Korea Aerospace Research Institute. At each permanent station, identical dual-frequency receiver and choke ring antenna with radome are installed. The analysis method, root mean square values were compared and analyzed for each permanent station and satellite. As a result, the root mean square value generally decreased as the satellite elevation angle increased although the trend was gentle. Threshold were finally selected based on the average and standard deviation of root mean square for each permanent station. For improving of availability and continuity in real-time operation when the threshold is over the limits, Code-Carrier divergence test values are initialized.

Key Words : GNSS (위성항법시스템), CCDT (의사거리-반송파 위상 측정치 발산 검사), Threshold (임계값)

1. 서 론

위성항법시스템 (GNSS, Global Navigation Satellite System)은 육상, 해상, 항공 분야에서 사용되고 있으며 위치결정, 시각동기, 기상 예측 등 광범위하게 사용되고 있다[1][2]. 현재 가장 널리 사용되고 있는 위성항법시스템은 미국의 GPS (Global Positioning System)로 많은 연구와 기술 개발이 진행 중이다.

GPS를 이용한 위치결정 방법으로는 단독측위와 상대측위로 구분할 수 있으며 상대측위는 높은 정확도와 정밀도를 얻기 위해 사용된다[3]. 상

대측위는 정확한 좌표를 알고 있는 수신국의 정보를 활용하여 오차항을 계산하고 보정정보를 제공함으로써 사용자의 위치 정확도와 정밀도를 향상시킬 수 있다[1]. 상대측위는 단일차분, 이중차분, 삼중차분으로 구분할 수 있다. 차분기법을 이용하여 실제 적용 가능한 시스템은 위성항법 보강시스템으로 보정정보의 계산방식 및 전송방식에 따라 GBAS (Ground-Based Augmentation System), SBAS (Satellite-Based Augmentation System), Network-RTK (Real-Time Kinematics) 등으로 나뉜다[4].

위성항법시스템을 활용한 위치결정 요구 성능은 정확성, 무결성, 연속성, 가용성으로 구분된다[2]. 이러한 요구 성능을 만족하기 위해서는 위성항법신호의 고장검출 (QM, Quality Monitoring)이 요구되며 고장이 검출된 측정치를 제거해야 한다. 고장검출과 관련하여 많은 연구가 국내외적으로 활발히 진행되고 있다.

Received : 14. Sep. 2015. Revised : 11. Dec. 2015.

Accepted : 25. Mar. 2016

* 한국항공우주연구원 위성항법팀

** 한국항공우주연구원 위성항법·응용기술센터

연락처, E-mail : gpsyusa@kari.re.kr

대전광역시 유성구 과학로 169-84

신호 고장검출 (SQM, Signal QM)의 하나인 의사거리-반송파 위상 측정치 발산 검사 (CCDT, Code-Carrier Divergence Test)와 관련된 선행 연구로 안종선(2009)은 정상상태의 측정치에서 인위적인 고장을 인가한 경우와 실제 고장이 발생한 데이터에 대한 의사거리-반송파 위상 측정치 발산 검사의 성능 평가를 수행하였다. 그리고 Gang(2004)은 LAAS (Local Area Augmentation System)의 프로토타입 (prototype)인 IMT (Integrity Monitor Testbed) 개발을 목표로 의사거리-반송파 위상 측정치 발산 검사를 수행하였으나 검사 결과에 따른 임계값을 수치적으로 제시하지 않았다.

이 논문에서는 의사거리-반송파 발산 검사 알고리즘을 이용하여 측정치의 고장 검출을 위한 임계값을 결정하는 연구를 수행하였다. 각각의 검사 결과에 대해 RMS (Root Mean Square) 값을 산출하고 위성고도각을 15° 단위로 구분하여 분석하였으며 이에 따른 임계값을 도출하였다.

2. 데이터 분석 및 임계값 결정

2.1 의사거리-반송파 위상측정치 발산 검사

의사거리-반송파 위상 측정치 발산검사는 두 개 측정치의 변화가 일정하게 유지되는지 검사하는 방법으로써 검사의 주된 검출 요인은 전리층 오차이다. 전리층은 두께가 국지적으로 변화하는 경향이 있어 의사거리 및 반송파 위상 측정치에 영향을 주게 된다. 따라서 이러한 전리층 지연값을 감시하여 위성의 고장을 판별할 수 있다[4].

위성 s 로부터 수신기 r 에 수신된 GPS 측정 방정식은 식(1)과 같이 나타낼 수 있으며 단위는 미터 (m)이다.

$$\begin{aligned} P_r^s &= \rho_r^s + c(t_r - t^s) + I_r^s + T_r^s + \epsilon_r^s \\ \Phi_r^s &= \rho_r^s + c(t_r - t^s) - I_r^s + T_r^s + \lambda N_r^s + v_r^s \end{aligned} \quad (1)$$

식(1)에서 P 는 의사거리 측정치, ρ 는 기하학적 거리, c 는 빛의 속도, t_r 은 수신기시계오차, t^s 는 위성시계오차, I 는 전리층 오차, T 는 대류권 오차, ϵ 는 의사거리 측정치 잡음 (Noise), Φ 는 반송파 위상 측정치, λ 는 파장, N 은 미지정수 (Integer Ambiguity), 그리고 v 는 반송파 위상 측정치 잡음이다. 식(1)에 표기된 오차들 이외에 위성과 수신기 안테나의 위상중심변화 (Phase Center Variation), 다중경로 (Multipath) 오차 등이 있으나 이 연구에서는 고려하지 않았다[5].

의사거리-반송파 위상 측정치 발산 검사는 의사거리와 반송파 위상 측정치 조합으로 수행된다. 의사거리에서 반송파 위상 측정치를 차분하게 되면 식(2)와 같이 대부분의 오차는 소거되거나 미세하게 작용하여 무시할 수 있으므로 전리층 오차와 미지정수만 남게 된다.

$$P - \Phi = 2I - \lambda N \quad (2)$$

식(2)를 시간에 대해 차분해주면 시간에 따른 전리층 오차 변화량만 남게 되므로 전리층 두께 변화를 검출할 수 있다. 식(3)에 시간 차분을 나타내었으며 이는 현재 시간과 이전 시간 사이에 사이클슬립 (Cycle Slip)이 발생하지 않았다는 가정과 짧은 시간에 전리층 변화량이 매우 작다는 것을 전제로 한다[6].

$$[P - \Phi](t) - [P - \Phi](t-1) = P - \Phi = 2I \quad (3)$$

의사거리-반송파 위상 측정치 발산 검사는 GMA (Geometry Moving Average) 방법을 이용하여 식(4)와 같이 계산할 수 있다. 식(4)에서 τ 는 평균 시간상수로 이 논문에서는 100으로 설정하였으며 이는 낮은 고도각 (Elevation Angle)을 가진 위성이 다른 위성보다 상대적으로 많은 양의 오차와 잡음을 가지고 있기 때문에 이러한 부분을 고장으로 판별하지 않기 위함이다[4]. 그리고 t 는 시간이며 \dot{t} 는 현재 측정치와 이전 측정치의 시간 차이이다[6].

$$\begin{aligned} CCDT(t) &= \frac{\tau - \dot{t}}{\tau} CCDT(t-1) + \frac{P - I}{\tau} \\ \tau &= \begin{cases} t \times \dot{t}, & t < \tau / \dot{t} \\ \tau, & else \end{cases} \end{aligned} \quad (4)$$

2.2 실험 결과 분석

식(4)를 이용하여 의사거리-반송파 위상 측정치 발산 검사를 수행하였다. 검사에 사용된 GPS 데이터는 한국항공우주연구원에서 구축한 지역수신국의 자료를 활용하였으며 이들은 대전, 공주, 안성, 음성, 보은에 위치하고 있고 모든 지역수신국에는 동일한 이중주파수 수신기와 위성항법 초크링 (Choke ring with Radome) 안테나가 설치되어있다. 데이터는 UTC(Coordinated Universal Time)를 기준으로 1초 간격으로 저장되며 최소 위성고도각은 5° 로 설정되어 있다. 지역수신국 현황을 Table 1, 위치는 Fig 1.에 나타내었다.

Table 1. 실험 데이터 현황

지역수신국	위도(°N)	경도(°E)	고도(m)
대전	36.38	127.36	91.06
공주	36.45	127.12	66.84
안성	37.01	127.28	74.62
음성	36.94	127.69	190.82
보은	36.49	127.72	195.78

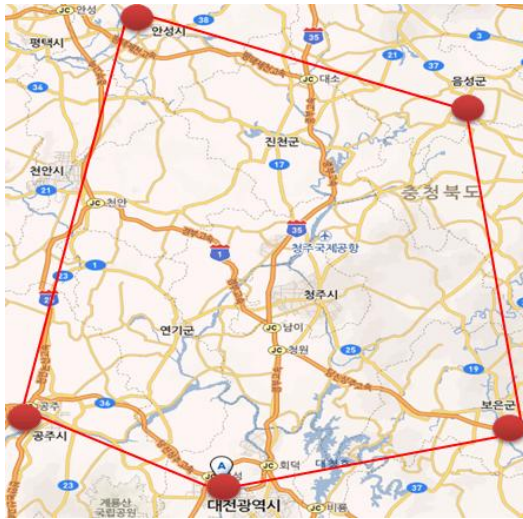


Fig 1. 실험 데이터 위치

의사거리-반송과 위상 측정치 발산 검사는 전리층에 대한 영향을 검출하는 것으로 전리층 영향이 크다고 판단되는 날짜인 2015년 8월 1일부터 7일까지 (DOY, Day of Year 213~220) 7일간 분석을 수행하였다. 분석 방법으로는 CCDT의 값을 위성고도각 15° 단위로 구분하여 RMS 값을 산출한 후 그 값을 비교 분석하였다. 그 결과 위성별, 지역수신국별로 대부분 유사하게 나타났으며, 특정 시간과 특정 지역수신국에서 다소 다르게 나타났다.

식(4)를 보면 현재 시간의 CCDT값은 이전 시간의 CCDT를 활용해야한다. 그러나 위성이 나타날 때 이전 시간의 CCDT값이 존재하지 않으므로 이 논문에서는 초기 CCDT값으로 0을 입력하였다. 실험 결과 각 위성 또는 지역수신국별로 CCDT값이 매우 크게 점프하는 현상이 나타났다. 이러한 현상은 위성이 나타날 때와 사라질 때 발생하는 것으로 보아 이는 위성고도각이 낮은 위성에 의사거리 측정치 잡음의 증가 또는 반송과 위상 측정치의 사이클슬립 등의 영향으로 판단된다. 따라서 위성고도각 5°에서 15°사이의

RMS 값은 다른 위성고도각과 비교하여 그 값이 매우 크게 나타났다. Fig 2.는 대전 지역수신국, Fig 3.은 안성 지역수신국 위성 27번의 L1 CCDT값을 나타낸 것이다. Fig 2.와 Fig 3.을 보면 동일한 위성이라도 지역수신국에 따라 값의 크기가 상이한 것을 확인할 수 있으며 대전 지역수신국은 위성고도각 5°~15°의 RMS 값이 0.009m, 안성 지역수신국은 0.211m로 차이가 매우 크게 나타났다.

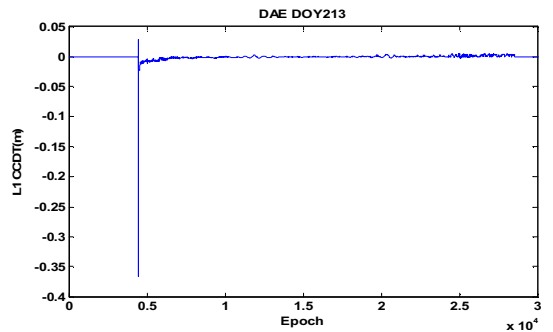


Fig 2. 대전 DOY 213 위성 27번의 L1 CCDT

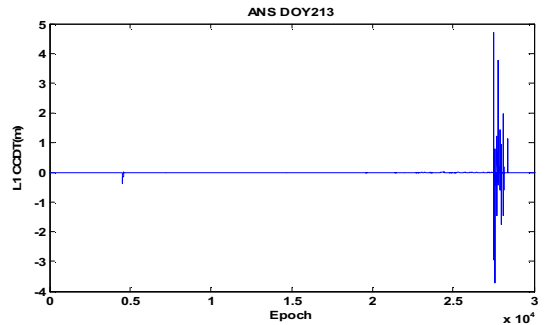


Fig 3. 안성 DOY 213 위성 27번의 L1 CCDT

Table 2.에 지역수신국 별로 분석된 기간의 RMS 최대값을 L1과 L2 측정치로 구분하여 나타내었다. Table 2.를 보면 RMS 값은 위성고도각이 높아질수록 작아지는 경향이 나타났다. 위성고도각 5°~15°에서는 최대 RMS가 L1에서는 0.387m (공주), L2에서는 0.932m (안성)로 다른 위성고도각과 비교하여 매우 크게 나타났으며 이는 위성이 나타나거나 사라질 때의 영향으로 판단된다. 그리고 60°~75°에서는 45°~60°와 75°~90°와 비교하여 RMS 값이 다소 크게 나타난 것을 확인할 수 있었다. 이를 분석한 결과 DOY 214의 모든 지역수신국에서 위성 10번 L1, L2 CCDT 값이 크게 점프하는 것을 확인할 수 있었다. 다

른 날짜의 동일한 위성과 동일한 시간대의 다른 위성에서 이러한 현상이 나타나지 않은 것으로 보아 해당 위성의 일시적 오류라 판단하고 해당 날짜의 NANU (Notice Advisory to NAVSTAR Users) 등을 검색해 보았으나 특이 사항은 발견하지 못하였다. Fig 4.에 DOY 214 공주 지역수신국 위성 10번의 *CCDT*값을 Fig 5.에 DOY 215 공주 지역수신국 위성 10번을 나타내었다.

Table 2. RMS 최대값 (DOY 213~220) 단위: m

수신국 \ 고도각(°)	5~15	15~30	30~45	45~60	60~75	75~90
대전L1	0.186	0.008	0.004	0.002	0.014	0.001
공주L1	0.387	0.004	0.003	0.004	0.012	0.001
안성L1	0.322	0.014	0.016	0.008	0.008	0.001
음성L1	0.367	0.007	0.016	0.022	0.012	0.003
보은L1	0.166	0.004	0.028	0.003	0.018	0.015
대전L2	0.644	0.008	0.005	0.002	0.010	0.001
공주L2	0.608	0.007	0.009	0.003	0.014	0.001
안성L2	0.932	0.051	0.021	0.028	0.014	0.003
음성L2	0.601	0.016	0.011	0.004	0.017	0.002
보은L2	0.502	0.011	0.012	0.003	0.016	0.003

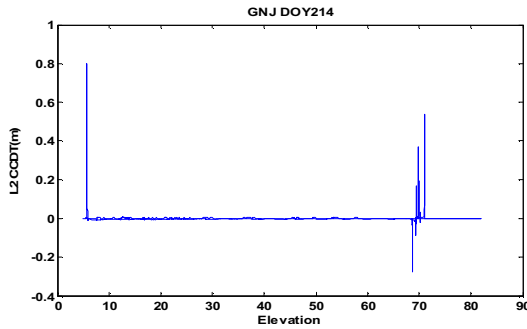


Fig 4. 공주 DOY214 위성 10번의 L2 CCDT

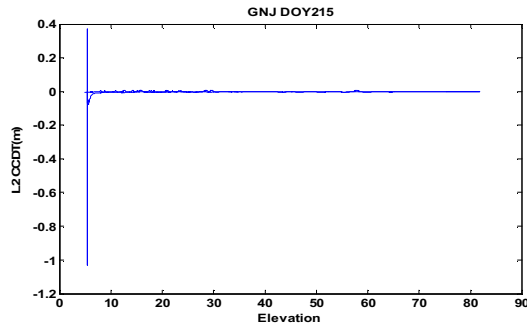


Fig 5. 공주 DOY215 위성 10번의 L2 CCDT

위성 10번과 관련하여 고장검출이 수행된 경우와 수행되지 않은 경우의 위치결정 결과 RMS 값을 의사거리 측정치를 활용하여 비교하였다. 자료처리는 DOY 214의 보은 지역수신국 데이터를 사용하였다. 위성위치는 실시간으로 가정하기 위해 GPS Subframe 1, 2, 3번을 이용하여 산출하였고 위성고도각 15° 미만의 위성은 위치결정 산출에 사용하지 않았으며 60°~75°의 고장검출 임계값은 임의적으로 Table 2.의 가장 작은 값인 0.008m로 설정하였다. 그리고 위치결정 비교를 위한 보은 지역수신국 정밀위치는 고정밀 GNSS 자료처리 소프트웨어인 Bernese 5.0으로 처리한 결과를 사용하였다. Table 3과 같이 위성 10번 *CCDT*값이 증가하는 부분의 위치결정 결과를 나타내었으며 비교 분석해본 결과 N, E 방향으로 큰 차이가 없었으나 U방향으로는 22cm 정도 차이가 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

Table 3. 위치결정 RMSE 분석 결과 단위: m

	N	E	U	2D	3D
고장검출 수행 전	0.27	0.86	1.47	0.90	1.72
고장검출 수행 후	0.24	0.84	1.24	0.87	1.52

2.3 임계값 결정

실험 분석 결과를 이용하여 5개의 지역수신국에 대한 위성고도각별 RMS 평균과 표준편차의 최대값을 산출하여 Table 4.에 L1과 L2에 대해 나타내었다. Table 4.를 보면 위성고도각 5°~15°에서는 다른 위성고도각에 비해 RMS 값이 L1에서는 0.056m, L2에서는 0.198m로 크게 나타났으며 15°~90°까지는 L1, L2 별로 큰 차이는 없으나 위성고도각이 높아질수록 RMS 평균 값이 작아지는 것을 확인할 수 있다. 또한 Fig 4.와 같이 특정 위성에 부분적으로 큰 값이 발생하더라도 평균과 표준편차에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

Table 4. RMS 평균과 표준편차 단위: m

고도각(°)	L1		L2	
	평균	표준편차	평균	표준편차
5~15	0.056	0.017	0.198	0.051
15~30	0.004	0.001	0.007	0.002
30~45	0.004	0.001	0.004	0.001
45~60	0.003	0.001	0.003	0.001
65~75	0.003	0.001	0.003	0.001
75~90	0.002	0.001	0.001	0.000

Table 4.를 활용하여 의사거리-반송파 위상 측정치 고장검출 임계값을 결정하였다. Table 4.의 L1을 보면 위성고도각 5°~15°를 제외한 다른 위성고도각 값의 변화가 많은 차이가 없음을 확인할 수 있다. L2는 15°~30°와 30°~45° 값의 차이가 약 2배이며 그 이후의 위성고도각들은 큰 차이가 없으므로 이를 고려하여 5°~15°의 임계값은 15°~30° 값의 약 2배인 0.02m로 설정하였다. 5°~15°의 임계값을 다소 높게 선정한 이유는 연속적으로 운영되는 시스템의 경우 임계값을 작게 설정하면 잦은 고장검출로 인해 측정치의 연속성이 떨어지므로 이로 인한 시스템의 가용성을 떨어뜨릴 수 있기 때문이다. 또한 L1과 L2의 RMS 평균과 표준편차는 큰 차이가 없으며 30°~90°까지는 0.001m씩 감소하는 것을 확인할 수 있다. CCDT의 RMS값은 위성고도각이 높아질수록 작아지고 5°~30°까지 값의 변화량이 다소 큰 점을 고려하여 선정한 임계값을 Table 5.에 나타내었다.

Table 5. 임계값 단위 : m

고도각(°)	임계값
5~15	±0.020
15~30	±0.010
30~45	±0.006
45~60	±0.005
65~75	±0.004
75~90	±0.003

선정된 임계값을 이용하여 임계값 산출에 쓰이지 않은 2015년 8월 14일 (DOY 227) 데이터에 적용시켜보았다. 식(4)를 이용하여 임계값 분석과 동일한 방법으로 고장검출을 수행하였고 다른 방법으로는 Table 5.의 임계값을 초과한 경우 식(4)에 사용되는 값들을 초기화한 방법과 비교하여 고장검출 횟수를 비교해보았다.

Table 6.에 각 지역수신국별로 고장이 검출된 횟수 평균을 나타내었다. Table 6.을 보면 L1 측정치보다는 L2 측정치에서 다소 많은 임계값이 초과한 것을 확인할 수 있었다. 이를 확인한 결과 L2 측정치는 위성고도각 약 8° 이하에서 임계값을 초과하는 경우가 많이 나타났다. 또한 음성 지역수신국의 경우 다른 지역수신국과 비교하여 임계값을 초과한 횟수가 다소 많은 것을 확인할 수 있다. 이는 다른 지역의 수신기 및 안테나를 활용하여 수신기, 안테나 이상 또는 지역 환경적인 영향인지에 대한 추가적 분석이 필요할 것으로 판단된다.

임계값을 초과하였을 때 CCDT 값을 초기화 시켜주었을 경우 측정치의 가용성이 L1에서는 약 32.7%, L2에서 약 24.3% 정도 상승한 것을 확인할 수 있었으며 이로 인해 실시간으로 운용되는 시스템의 연속성도 향상시킬 수 있었다. Fig 6.에 식(4)를 이용하여 CCDT를 계산한 경우를 Fig 7.에 개선된 알고리즘을 수행한 경우를 나타내었다. Fig. 6.을 보면 위성고도각 80°~90°에서 임계값을 초과했지만 Fig. 7.에서는 그렇지 않은 것을 확인할 수 있다.

Table 6. 고장검출 평균 횟수

지역 수신국	초기화 전		초기화 후		향상율(%)	
	L1	L2	L1	L2	L1	L2
대전	339	523	200	488	41.0	6.7
공주	818	732	526	504	35.7	31.1
안성	506	510	468	486	7.5	4.7
음성	1236	1372	892	868	27.8	36.7
보은	553	898	268	517	51.5	42.4

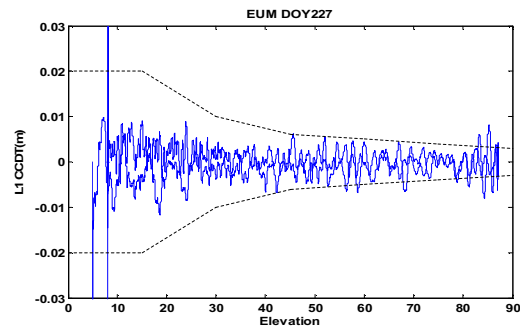


Fig 6. 초기화 전 음성 DOY214 위성 27번 L1 CCDT

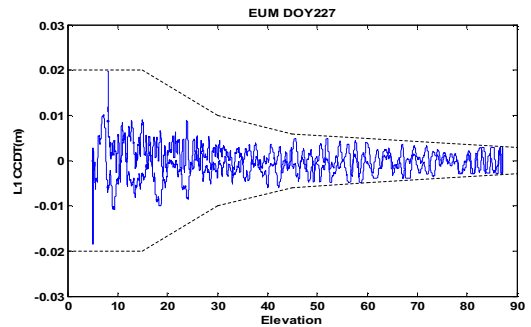


Fig 7. 초기화 후 음성 DOY214 위성 27번 L1 CCDT

3. 결 론

이 논문에서는 의사거리-반송파 위상 측정치 발산 검사를 이용하여 측정치 고장을 분석하고 임계값을 선정하였다. 임계값 선정에 사용된 데이터는 한국항공우주연구원에서 구축한 지역수신국 데이터이며 전리층 오차가 크다고 판단되는 7 일간의 데이터가 분석에 사용되었다.

분석 방법으로는 의사거리-반송파 위상 측정치 발산 검사 값의 RMS 값을 산출하고 위성별, 지역수신국별로 분석하였다. RMS 값을 분석한 결과 위성별, 지역수신국별로 유사한 값이 산출되었으며 위성고도각이 높아질수록 값이 작아지는 것을 확인하였다. 그러나 특정 위성, 특정 시간대에서 RMS 값이 다소 높게 산출되는 것이 발견되었다.

측정치에 고장이 발생하였다고 판단된 데이터를 이용하여 고장검출을 수행하기 전과 수행한 후의 위치결정 결과를 비교해본 결과 약 22cm의 위치결정 오차 차이가 발생한 것을 확인할 수 있었다.

고장검출 임계값은 의사거리-반송파 위상 측정치 검사의 7일간 분석된 RMS 값의 평균과 표준편차를 이용하여 도출하였다. 도출된 임계값을 고장검출 알고리즘에 특정 조건을 주어 적용한 결과 약 28.5%의 측정치 가용성과 시스템의 연속성을 향상시킬 수 있었다.

이 연구는 국토교통부 항공안전기술개발사업의 연구비지원(15ATRP-A087576-02)에 의해 수행되었습니다.

Reference

1. 손민혁, 손은성, 이은성, 허문범, 남기욱, "육상교통 항법을 위한 네트워크 기반 위성항법보정 시스템의 구성", 한국항공운항학회지, Vol.21, No. 4, 2013, pp.17-26.
2. 이은성, 손민혁, 손은성, 안중선, 조득재, 허문범, "다중수신국 활용 위성항법기반 위치결정 무결성 위험도 구조 설계 및 검증", 地籍, Vol. 43, No. 2, 2013, pp.95-111.
3. Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., and Wasle E., "GNSS:Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS & More", Springer/WienNewYork, 2008.
4. 안중선, "GBAS 고장 검출 알고리즘 구형 및 성능 평가", 건국대학교 석사학위논문, 2009.
5. 손은성, "격자형 지역 전리층 및 대류권 모델을 이용한 장기선 GPS L1 상대측위 정확도 향상", 인하대학교 석사학위논문, 2013.
6. Gang X., "Optimal On-Airport Monitoring of The Integrity of GPS-Based Landing Systems, PhD Dissertation, Standard University, 2004.