

論文

DOI:10.5139/JKSAS.2010.38.6.570

잔차 수평 투영 비교를 이용한 의사거리 비정상 증가 위성 식별

안용운*, 안중선**, 원대희**, 허문범***, 조정호***, 성상경**, 이영재****

The Abnormal Increasing Pseudorange Satellite Detection Method
Using Comparison of Residual Horizontal ProjectionYong-Woon Ahn*, Jongsun Ahn**, Dae Hee Won**, Mun Beom Heo***, Jeong Ho Jo***,
Sangkyung Sung** and Young Jae Lee****

ABSTRACT

This paper can be used for GPS air navigation study on integrity monitoring algorithm as, the projected horizontal plane using GPS pseudorange residuals for fault detection satellites were suspected. Failure to remove the detected suspicious satellite, compare with threshold which is calculated using satellite deployment (PDOP) and determine whether the failure is presented. The theory that horizontal projection of the satellite failure residuals greater than residual of normal satellite is proved mathematically. Comparison with horizontal projection residuals are likely to malfunction in the satellite were presented. To evaluate the proposed algorithm, bias fault insert into GPS pseudorange, and compare with conventional parity space method about fault detection and isolation capability.

초 록

본 논문은 GPS 항공항법에 사용될 수 있는 무결성 감시 알고리즘에 관한 연구로써, 평면상에 수평 투영된 의사거리 잔차와 이용하여 보다 위성 배치 (PDOP)에 따른 한계치를 생성하여, 고장 위성을 식별 및 제거할 수 있는 RAIM 알고리즘을 제시하고 있다. 고장 위성의 수평 투영 잔차가 정상 위성의 수평 투영 잔차보다 크다는 점을 수학적으로 증명함으로써, 잔차 수평 투영 비교만으로 고장 가능성이 높은 위성을 식별할 수 있음을 보였다. 또한 성능 평가를 위해 의사거리에 일정한 크기의 바이어스 형태의 고장을 삽입하였고, 기존의 패리티 공간 기법과 성능 비교를 수행하였다.

Key Words : Residual(잔차), Position Comparison(위치 비교), Receiver Autonomous Integrity Monitoring(수신기 단독 무결성 감시)

1. 서 론

항공산업의 발전에 따른 항행활동 증가로 GPS (Global Positioning System)를 이용한 항법의 중요성이 증가하고 있다. 특히 지상관제시설의 도움을 받을 수 없는 대양 (Ocean)지역에서는 GPS 시스템의 의존도가 더 높다고 할 수 있다. 이와 같이 GPS 시스템 의존도가 상승함에 따라 항공

† 2010년 2월 8일 접수 ~ 2010년 5월 17일 심사완료

* 정회원, 공군본부 안전과

** 정회원, 건국대학교 항공우주정보시스템공학과 대학원

*** 정회원, 한국항공우주연구원

**** 정회원, 건국대학교 항공우주정보시스템공학과

교신저자, E-mail : youngle@konkuk.ac.kr

서울특별시 광진구 화양동 1번지

기의 항행 안전을 위한 GPS 시스템 무결성 감시(Integrity Monitoring)의 중요성이 더욱 강조되고 있다[1].

무결성 감시는 위치해를 산출하는데 관여된 위성 정보가 비정상적인 것이 있는지를 검사하여, 기설정된 기준을 초과하면 위치해를 신뢰할 수 없다는 것을 적절한 시간 내 (TTA : Time to Alert) 사용자에게 경고를 제공하는 기능을 말한다. 무결성을 감시하는 방법에는 크게 GPS 수신기 자체에서 단독으로 수행하는 RAIM (Receiver Autonomous Integrity Monitoring), 지상보정시스템을 이용하는 GIC (GNSS Integrity Channel), 그리고 항공기에 탑재된 타 항법관련 장비를 이용하는 AAIM (Aviation Autonomous Integrity Monitoring) 등이 있다. RAIM은 상기의 방법 가운데 지상보정시스템을 이용할 수 없는 지역을 비행하는 경우나 GPS 외에 다른 항법장비를 사용할 수 없는 경우에도 적용이 가능한 무결성 감시 방법으로 가장 보편적으로 사용되는 방법이라 할 수 있다[2].

이러한 RAIM 연구는 1980년대 후반 Lee, Y. C.[4]에 의해 시작되었다. 그가 제시한 위치비교법은 가시위성이 n 개일 때, 전체 위성군과 $(n-1)$ 개의 위성으로 이루어진 위성군의 위치해들을 이용하여 구한 위치 차분 벡터 (Position Difference Vector)를 임계값과 비교하는 방법이다. Parkinson과 Axelrad[3]가 제안한 잔차 검사기법 (Residual Monitoring Method)은 전체 위성군에 대해 잔차 매개변수를 이용하여 고장 여부를 판단하고, $(n-1)$ 개로 구성된 n 개의 위성군의 잔차 매개변수를 임계값과 비교하여 고장위성을 식별하는 방법이다. 본 논문에서는 의사거리 잔차를 동일 수평면 상에 투영·비교를 이용한 위치해 바이어스 검출 기법을 제안하고자 한다. 고장위성의 수평 투영 잔차가 정상위성의 수평 투영 잔차보다 크다는 점을 수학적으로 증명함으로써, 수평 투영 잔차 비교만으로 고장 가능성이 높은 위성을 식별할 수 있음을 보였다. 식별된 위성에 대한 고장 여부를 판단하기 위해 그 위성에 의한 위치해 이동거리를 사용하고, 임계값은 위성 감소에 따른 위치 정확도 차이를 사용하였다.

본 알고리즘은 앞서 언급한 위치비교법과 잔차 검사기법에서와 같이 모든 위성에 대한 소위성군을 구성해 이들의 고장가능성을 검사할 필요 없이 단 하나의 소위성군만을 만들어 간단하게 고장 식별 및 분리가 가능하다.

본 논문의 구성은 먼저 근간이 된 고장위성과 정상위성의 수평 투영 잔차의 비교에 대한 수학적

증명을 보인 후, 의사거리 잔차 비교를 통한 고장 의심위성 식별, 위치해 이동거리와 PDOP을 이용한 임계값 설정 등의 알고리즘 세부 내용, 이후 알고리즘에 대한 시뮬레이션 결과 및 분석, 결론 순으로 이루어진다.

II. 잔차 수평 투영 비교법

2.1 잔차 수평 투영 비교를 이용한 의사거리 비정상 증가 위성 식별 원리

2.1.1 고장의심 위성 식별

잔차 수평 투영 비교를 이용한 의사거리 비정상 증가 위성 식별 알고리즘의 가정은, 고장은 단일 위성에 발생하며, 이온층 지연오차 등으로 인해 의사거리가 증가하는 방향으로 발생한다는 것이다. 이는 의사거리에 의한 고장이 반드시 증가하는 방향으로만 발생한다는 의미는 아니며, 본 논문에서는 의사거리가 증가하는 고장에 한해서 연구를 수행하였다. 의사거리 감소 고장과 증가/감소 판단에 대한 연구는 추후 별도로 진행할 계획이다. 이 전제 하에서 이 알고리즘의 핵심이 되는 가설은 '동일 수평면 상에 투영된 잔차를 비교하면 고장위성의 것이 정상위성의 것보다 크다'이다. Fig. 1은 위성들이 모두 수신기와 각각 수평·수직의 동일 평면상에 위치한 경우를 나타낸 것이다. \vec{p}_n^0 는 모든 위성이 정상일 때의 의사거리 벡터, \vec{p}_n^1 은 의사거리가 증가하는 고장이 삽입되어 새로이 형성된 위치해로부터의 의사거리 벡터이다. 이때의 위치해의 이동벡터를 \vec{m} , 잔차 벡터를 \vec{r}_n 으로 표시하였다. Fig. 1에서 α_n 은 \vec{m} 에 대한 각 정상위성의 방위각 (Azimuth Angle)을, θ_n 은 위치해 이동에 따른 각 의사거리 벡터의 회전각을 나타내었다. \vec{p}^0 와 \vec{p}^1 는 수신기의 고장삽입 전·후의 위치벡터를 나타낸 것이다. Fig. 1은 모두 Sat' 1의 의사거리가 비정상적으로 길어지는 고장이 발생한 경우를 나타낸 것이다. Sat'1의 의사거리가 증가함에 따라 위치해가 의사거리가 증가하는 방향으로 이동하고 그에 따라 각 위성의 의사거리 벡터가 회전함을 볼 수 있다. 이때 위치해의 이동에 따라 각 위성의 잔차에 변화가 생긴다.

Theorem 1. 정상위성의 잔차는 위치해 이동 벡터로부터의 방위각이 클수록 양의 방향으로 증가한다.

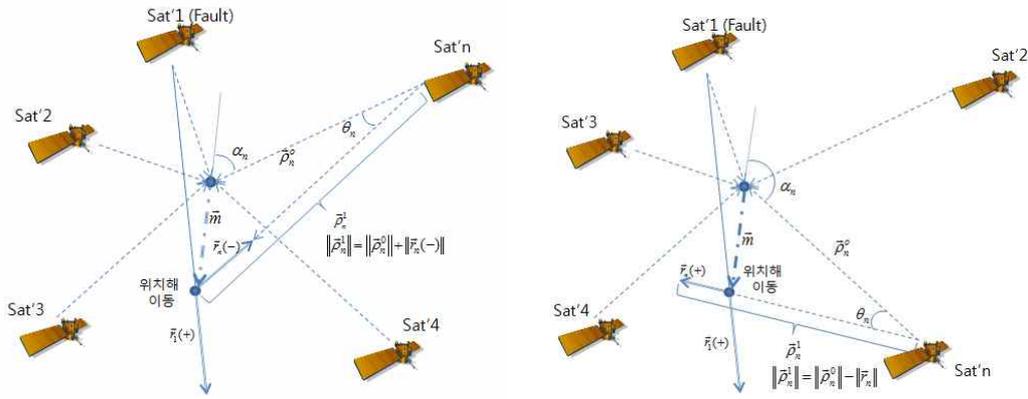


Fig. 1. Satellites on Horizontal Plane

Fig. 1에서 이동된 위치에서의 수신기와 각 위성간의 거리는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\|\bar{\rho}_n^0\| \cos \theta_n + \|\bar{m}\| \cos(\alpha_n - \theta_n) = \|\bar{\rho}_n^1 - \bar{r}_n\| \quad (1)$$

여기서 α_n 와 θ_n 의 관계는 다음과 같다.

$$\theta_n = \alpha_n - \tan^{-1} \left(\frac{\|\bar{\rho}_n^0\| \sin \alpha_n}{\|\bar{\rho}_n^0\| \cos \alpha_n + \|\bar{m}\|} \right) \quad (2)$$

정상위성의 의사거리 벡터는 고장이 삽입되어도 이동된 위치해에 따라 방향은 바뀌지만 크기는 변하지 않으므로 $\|\bar{\rho}_n^0\| = \|\bar{\rho}_n^1\|$ 가 성립한다.

1) $\alpha_n < \pi$ 일 때

$\alpha_n < \pi$ 구간에서는 위치해 이동 벡터로부터 정상위성의 방위각이 커질 때, 식(1)은 잔차가 0이 되는 시점을 기준 (식 (4))으로 다음과 같이 나눌 수 있다.

$$\alpha_n < \frac{\pi + \theta_n}{2}, \|\bar{\rho}_n^0\| \cos \alpha_n + \|\bar{m}\| \cos(\alpha_n - \theta_n) = \|\bar{\rho}_n^0\| + \|\bar{r}_n\| \quad (3)$$

$$\alpha_n = \frac{\pi + \theta_n}{2}, \|\bar{\rho}_n^0\| \cos \alpha_n + \|\bar{m}\| \cos(\alpha_n - \theta_n) = \|\bar{\rho}_n^0\| \quad (4)$$

$$\alpha_n > \frac{\pi + \theta_n}{2}, \|\bar{\rho}_n^0\| \cos \alpha_n + \|\bar{m}\| \cos(\alpha_n - \theta_n) = \|\bar{\rho}_n^0\| - \|\bar{r}_n\| \quad (5)$$

식(3)의 범위에서는 α_n 가 증가함에 따라 θ_n 도 증가하고, $\alpha_n - \theta_n$ 도 증가한다. 따라서 $\cos \theta_n$ 와 $\cos(\alpha_n - \theta_n)$ 가 감소하므로 식(3)의 좌변은 감소한다. 좌변에 따라 우변도 감소하려면 $\|\bar{r}_n\|$ 이 감소해야 한다. 즉, 위치해 이동벡터로부터의 방위각이 커질수록 $\|\bar{r}_n\|$ 은 감소하게 된다. 그러

나 잔차 벡터의 방향이 의사거리 벡터와 반대로 음의 잔차를 갖게 되므로 결국 음의 잔차는 양의 방향으로 증가한다고 볼 수 있다. 식(5)의 범위에서는 α_n 가 증가함에 따라 θ_n 가 감소하고 $\alpha_n - \theta_n$ 는 계속 증가한다. 따라서 $\cos \theta_n$ 는 증가하고, $\cos(\alpha_n - \theta_n)$ 는 감소하게 된다. 여기서 $\alpha_n - \theta_n$ 는 90°보다 커짐에 따라 $\cos(\alpha_n - \theta_n)$ 는 음수가 되며 절대값은 커지게 된다. 따라서 식(5) 좌변의 좌변은 증가하지만 음수인 우항의 크기가 커져 좌변은 감소하게 된다. 좌변의 감소에 따라 우변도 감소하려면 $\|\bar{r}_n\|$ 이 증가해야 한다. 즉, 위치해 이동벡터로부터의 방위각이 커질수록 양의 방향으로 잔차가 증가하여, $\|\bar{r}_n\|$ 역시 증가하게 된다.

2) $\alpha_n > \pi$ 일 때

$\alpha_n > \pi$ 의 구간에서는 $\alpha_n < \pi$ 구간과 대칭인 결과를 얻게 된다. 결국 정상위성은 위치해 이동벡터로부터의 방위각이 클수록 잔차는 양의 방향으로 증가한다. 결론적으로 정상위성의 잔차는 고장에 의한 위치해 이동벡터로부터의 방위각이 클수록 양의 방향으로 증가한다.

Theorem 2. 동일 평면에서의 잔차 벡터의 합은 0이다.

Fig. 1에서 고장 삽입 전의 의사거리 벡터의 합은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\bar{\rho}_1^0 + \bar{\rho}_2^0 + \dots + \bar{\rho}_n^0 + \bar{x}_{hz}^0 = 0 \quad (6)$$

여기서 \bar{x}_{hz} 는 고장 삽입 전 의사거리 벡터의 합에 의해 생성되는 벡터를 나타낸 것이다. 여기에 고장이 삽입되면 식(6)은 다음과 같이 변한다.

$$\vec{\rho}_1^1 + \vec{\rho}_2^1 + \dots + \vec{\rho}_n^1 + \vec{x}_{hz}^1 = (n+1)\vec{m} \quad (7)$$

고장 삽입 전·후의 의사거리 벡터는 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$\vec{\rho}_n^0 + \vec{m} + \vec{r}_n = \vec{\rho}_n^1 \quad (8)$$

\vec{x}_{hz}^0 와 \vec{x}_{hz}^1 도 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$\vec{x}_{hz}^0 + \vec{m} = \vec{x}_{hz}^1 \quad (9)$$

식(6)과 (8)~(9)를 식(7)에 대입하면 잔차 벡터를 제외한 모든 항이 소거되므로 잔차 벡터의 합은 0이 된다.

$$\vec{r}_1 + \vec{r}_2 + \dots + \vec{r}_n = 0 \quad (10)$$

수직 분포에서는 식(6)~(9)이 다음과 같이 적용된다.

$$\vec{\rho}_1^0 + \vec{\rho}_2^0 + \dots + \vec{\rho}_n^0 + \vec{p}^0 + \vec{x}_{vt}^0 = 0 \quad (11)$$

$$\vec{\rho}_1^1 + \vec{\rho}_2^1 + \dots + \vec{\rho}_n^1 + \vec{p}^1 + \vec{x}_{vt}^1 = (n+2)\vec{m} \quad (12)$$

$$\vec{\rho}_n^0 + \vec{m} + \vec{r}_n = \vec{\rho}_n^1 \quad \vec{p}_n^0 + \vec{m} + \vec{r}_p = \vec{p}_n^1 \quad (13)$$

$$\vec{x}_{vt}^0 + \vec{m} = \vec{x}_{vt}^1 \quad (14)$$

식(12)에 식(11)과 (13)~(14)를 대입하면 다음과 같다.

$$\vec{r}_1 + \vec{r}_2 + \dots + \vec{r}_n + \vec{r}_p = 0 \quad (15)$$

결론적으로 동일 평면에서의 잔차 벡터의 합은 0이 된다.

Theorem 2에 의해 동일 평면에서의 잔차 벡터의 합은 0이다. 그러나 3차원 공간에서의 잔차 벡터의 합이 0이라고는 할 수 없다. 따라서 각 위성의 잔차 벡터를 동일 수평면 상에 투영하면 Theorem 2를 적용할 수 있다. 잔차 벡터를 평면 상에 투영하는 방법은 각 위성의 양각(Elevation Angle)을 이용한다. 이 양각은 고장이 삽입된 상태에서 구한 위치해를 이용하기 때문에 오차가 포함되지만, 오차에 의한 위치해 이동에 비해 위치해와 위성과의 거리가 현저히 크기 때문에 그 영향은 무시한다. 이 잔차 벡터 중 고장위성을 제외한 정상위성의 잔차는 Theorem 1에 의해 위치해 이동 벡터로부터 방위각이 양의 방향으로 증가한다. Theorem 1은 동일 수평면 상에서도 동일하게 성립한다.

잔차 벡터를 고장위성 방향과 반대방향으로

나눈다면 Theorem 1에 의해, 고장위성 방향의 정상위성은 잔차가 매우 작거나 음수가 되고, 반대방향의 정상위성은 상대적으로 큰 양의 잔차를 갖는다. Theorem 2에 의해, 이 잔차 벡터들과 고장위성의 잔차 벡터의 합이 0이 되어야 하므로, 상대적으로 작거나 음의 잔차를 갖는 고장위성 주변의 정상위성들과 고장위성은 잔차 벡터의 합이 상대적으로 큰 잔차를 갖는 반대방향 정상위성들의 잔차 벡터의 합과 크기는 갖고 방향은 반대가 된다. 따라서 고장위성의 잔차는 반대방향 정상위성들의 큰 잔차 벡터를 감당할 수 있을만큼 커야 한다. 결론적으로 Theorem 1, 2에 의해 '동일 수평면 상에 투영된 잔차를 비교하면 고장위성의 것이 정상위성의 것보다 크다'라는 가설은 성립한다. 따라서 어느 한 위성에 의사거리가 증가하는 고장이 발생했다면 그 위성의 수평 투영 잔차는 다른 정상 위성들의 것보다 크다. 즉, 수평 투영 잔차의 크기를 비교하면 고장이 의심되는 위성을 식별할 수 있으며, 그 위성이 고장으로 판단되는 수준을 넘었는지의 여부는 별도의 과정을 통해 판단해야 한다.

2.1.2 고장의심 위성 제거를 위한 판단 방법

본 절에서는 수평 투영 잔차 비교를 통해 식별된 고장의심 위성 제거를 위한 판단 방법을 기술하고자 한다. 본 알고리즘에서는 전체 위성군과 고장의심 위성을 제외한 위성군의 위치해 간의 거리를 이용하여 고장여부를 판단한다. 두 위성군에 의한 위치해 간 거리는 다음의 식으로 구한다.

$$D = \sqrt{(x_{all} - x_{isolation})^2 + (y_{all} - y_{isolation})^2 + (z_{all} - z_{isolation})^2} \quad (16)$$

만약 최대 수평 투영 잔차를 갖는 위성이 고장 위성이라면, 전체 위성군으로 구한 위치해는 고장 위성이 포함되어 있으므로 실제 수신기의 위치로부터 멀리 형성된다. 그러나 고장위성을 제외한 위성군으로 구한 위치해는 실제 위치와 상대적으로 가깝게 된다. 즉, 두 위치해 간의 거리가 커진다. 만약 고장이 발생하지 않았다면, 두 위성군 모두 고장 위성이 포함되어 있지 않으므로 실제 위치와 가깝게 위치해가 산출된다. 즉 두 위치해 간의 거리는 고장이 발생한 경우에 비해 상대적으로 작아진다. 따라서 이 거리를 적절한 임계값과 비교하면 고장 여부 판단이 가능하다.

임계값은 위치영역 (Position domain)에서 간단하게 위치해의 정확도를 나타낼 수 있는 PDOP σ_{range} 를 이용한다. 전체 위성으로 구한 위치해는 PDOP σ_{range} 를 반경으로 하는 구(Sphere)

내에 존재하게 된다. 이때 한 위성을 제외하고 위치해를 산출한다면 위치해의 정확도는 떨어지게 된다. 이는 $PDOP \sigma_{range}$ 의 값이 커지고 이를 반경으로 하는 구의 크기도 커진다는 것을 의미한다.

이 구의 반경은 두 위성군에서의 위치해의 위치 정확도 차이를 나타낸다. 또한 위성의 기하학적 배치에 의해 산출된, 전체 위성군에서 특정 위성을 제거하고 위치해를 구할 때 기대되는 위치해의 최대 이동거리가 된다. 고장이 발생하지 않았다면 해당 위성이 제거될 때 위치해의 이동거리는 기하학적 배치에 의한 위치해 최대 이동거리를 초과하지 않아야 한다. 따라서 이 위성 배치에 의한 위치 정확도 차이가 고장 의심 위성이 제거될 때의 위치해 이동거리의 임계값이 되는 것이다.

고장을 판단하기 위한 임계값은 전체 위성군으로 구한 $PDOP \sigma_{range}$ 와 고장가능성이 높은 1개 위성을 제외한 소위 위성군에서의 $PDOP \sigma_{range}$ 의 차가 된다. 다음은 이 알고리즘에 사용된 임계값 (TD)을 나타낸 것이다.

$$TD = (PDOP_{Isolation} - PDOP_{All}) \times \sigma_{range} \quad (17)$$

σ_{range} 는 Kuusniemi(2005)가 제시한 σ_{UERE} 에 의해 5.3으로 설정하였다.

한 가지 문제점은 제거될 고장의심 위성이 PDOP 기여도가 높다면, 즉 제거시 PDOP에 크게 상승하게 되면, 임계값이 높아져 고장을 검출하지 못하는 경우가 발생한다. 하지만 이 경우는 고장위성이 제거되더라도 PDOP이 높아 위치해에 많은 오차가 포함되게 되므로 고장검출의 의미가 크지 않으며, 수신기 자체 고장검출(RAIM)이 요구되는 대양지역에서는 PDOP이 내륙지역에 비해 양호한 것을 감안한다면 발생 확률은 매우 낮을 것으로 판단된다.

2.2 알고리즘 구성

잔차 수평 투영 비교를 이용한 의사거리 비정상 증가 위성 식별 알고리즘은 Fig. 2와 같은 단계를 거친다.

먼저 모든 위성의 측정된 의사거리(ρ_i)를 활용하여 위치해 (X_{all})를 산출한다. 산출된 위치해를 바탕으로 위성간의 거리 (GR_i)와 의사거리와 차분하여 잔차 (r_i)를 계산하고 이를 수평방향으로 투영시킨다 ($r_{H,i}$). 투영된 잔차 중 최대치를 갖는 위성이 고장의심위성으로 가정하고 그 위성을 제

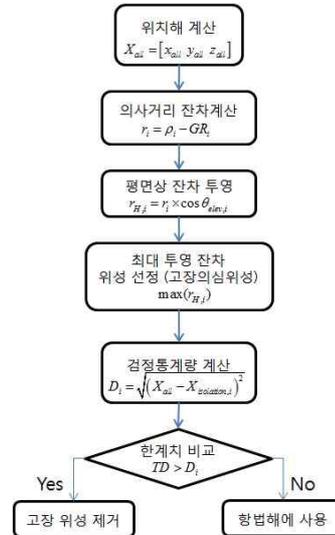


Fig. 2. 고장 검출 알고리즘 흐름도

외한 나머지 위성군을 통해 구한 위치해를 제거한 위치해와 차분하여 고장의심위성의 고장 여부 판별을 위한 검정통계량 (D_i) 산출한다. 마지막으로 한계치 (TD)와 비교하여 고장 여부를 판단한다.

III. Simulation 및 실험

3.1 Simulation 및 실험 조건

Simulation을 위한 알고리즘은 총 3단계로 구성하여, 1단계에서는 원본 데이터로 일반적인 위치해를 구하고, 2단계에서 인위적인 고장을 삽입, 그에 따른 위치해를 구하고, 마지막으로 3단계에서는 본 논문에서 제안하는 알고리즘을 통해 고장위성을 검출 및 분리한 후의 위치해를 구하도록 구성하였다. 즉, 고장 삽입 전·중·후의 위치해를 비교할 수 있도록 하였다.

실험 데이터는 NovAtel OEM-5 DL-V3 수신기를 사용하여 '08년 11월 21일 한국항공우주연구원(KARI)에서 수신한 데이터로, 수신율은 2Hz이고, 총 6066 epoch에 걸쳐 고정된 지점에서 수신하였다. 좌표는 지구 중심으로부터 각각 x축 -3166759.332m, y축 4279332.431m, z축 3501112.844m이다. 가시위성의 수는 10개 (PRN : 3, 6, 7, 13, 16, 19, 21, 23, 25, 27)가 유지된다.

본 논문에서 제시하는 알고리즘의 성능을 평가하기 위해 기존의 패리티 공간 기법을 통한 고장 검출 알고리즘과 비교하였다.

패리티 공간 기법을 이용하여 고장 검출에 사용된 한계치는 False Alarm Rate는 3.33×10^{-7} , 측정값 오차 분산값(σ_{range})은 5.3m, No-Detection Rate는 0.001로 설정하였다[5].

3.2 Simulation 결과

시뮬레이션은 인위적으로 삽입된 고장 외 다른 요인들의 영향을 제거하기 위해 고정된 기준점 (x축 : -3166759.332m, y축 : 4279332.431m, z축 : 3501112.844m, ECEF 좌표계)으로부터 각 위성의 기하학적 거리를 의사거리로 사용하였다. 따라서 고장 삽입 전의 위치는, 수평 분포에서는 (0, 0), 수직 분포에서는 y축이 0에 고정된다. 위성들은 기하학적 배치가 모두 다르기 때문에 그 위성이 제거되었을 때 발생하는 PDOP의 변화가 모두 다를 뿐 아니라, 각 위성의 의사거리가 증가할 때 최소자승법을 통해 고장위성의 잔차가 최소화되는 정도도 차이가 생긴다. 따라서 고장을 검출하는 능력에도 차이가 발생한다. 본 절에서는 각 위성별 고장 검출 능력을 비교한다. 고장 검출 능력은 삽입된 바이어스 고장의 크기를 최소 1m부터 2m 간격으로 증가시키면서 검출 가능한 최소 바이어스 크기를 관찰하고, 고장 삽입 전 구간에서 고장을 완벽하게 검출해내는 최소 바이어스 크기를 관찰하였다. Table 1 (패리티 공간 기법)과 2 (제안된 고장검출 알고리즘)는 각 위성별 바이어스 크기에 따른 고장 검출 결과를 나타낸 것으로, 고장이 삽입된 5000epoch 중 고장 검출에 성공한 epoch의 수를 나타내었다. 고장이 검출될 수 있는 최소 바이어스의 크기는 검출 epoch 수가 0으로 되어 있는 부분을 확인하면 된다.

Table 1. The number of epoch detected the position bias using parity space method(/5000)

BIAS PRN	3	6	7	13	16	19	21	23	25	27
1m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11m	4925	4869	4985	4521	4635	3623	0	1121	4789	0
13m	5000	5000	5000	5000	5000	5000	0	3053	5000	4868
15m	5000	5000	5000	5000	5000	5000	1817	5000	5000	5000

Table 2. The number of epoch detected the position bias using proposed algorithm(/5000)

BIAS PRN	3	6	7	13	16	19	21	23	25	27
1m	0	0	0	3587	1667	0	0	1797	0	0
3m	1819	2499	5000	5000	5000	3962	0	1819	1959	4283
5m	5000	5000	5000	5000	5000	4687	0	1819	1959	4283
7m	5000	5000	5000	5000	5000	5000	979	1819	5000	5000
9m	5000	5000	5000	5000	5000	5000	2677	2240	5000	5000
11m	5000	5000	5000	5000	5000	5000	3800	3063	5000	5000
13m	5000	5000	5000	5000	5000	5000	4706	5000	5000	5000
15m	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000

전반적으로 Table 1, 2와 같이, 패리티 공간 기법보다 우수한 성능을 나타냄을 확인할 수 있다. 이는 패리티 공간기법에서의 한계치 검출 과정에서 위성의 배치에 관련된 정보보다는 개수에 의한 확률적인 값을 사용하여 일정한 한계치를 계산함으로써, 일정 크기 이상 (11m)의 고장에만 일률적 반응하는 것을 알 수 있다[5].

본 논문에서 제시한 알고리즘의 성능을 살펴보면, 고장 검출이 가능 PRN 13, 16, 23 위성은 1m의 바이어스에서도 고장검출이 시작되는 반면, PRN 21 위성은 바이어스가 7m가 되어야 고장검출이 시작되었다. 즉, PRN 13, 16, 23 위성은 아주 미세한 바이어스도 일부 구간에서는 검출이 가능하나 PRN 21 위성은 7m 이내의 바이어스는 전혀 검출해낼 수 없다는 것이다. 고장 검출이 완벽하게 이루어지는 최소 바이어스의 크기는 검출 epoch 수가 5000으로 되어 있는 부분을 확인하면 된다. 대부분의 위성이 10m 이내의 바이어스에서 완벽한 검출 능력을 보이는 반면, PRN 21 위성은 바이어스가 15m에 이르러 완전한 고장검출이 이루어졌다. 15m 이후에는 모든 구간에서 모든 위성에 대해 고장검출이 성공적으로 이루어졌다. 최초 고장위성 분리 시점이나 최소 고장위성 완전 분리 시점 모두 PRN 21, 23 위성이 상대적으로 나쁜 성능을 보이고 있다. 이는 본 알고리즘의 한계치를 PDOP의 변화량을 이용하여 계산하여, Fig. 3과 같이 PDOP의 기여도가 큰 위성의 경우 한계치를 크게 산출하게 하여 같은 크기의 고장이라도 다른 위성들보다 둔감한 것을 확인할 수 있다. 하지만 향후에 다중 위성항법시스템을 활용할 경우 각 위성의 DOP 기여도가 낮아져 위와 같은 단점은 개선될 것으로 예상된다.

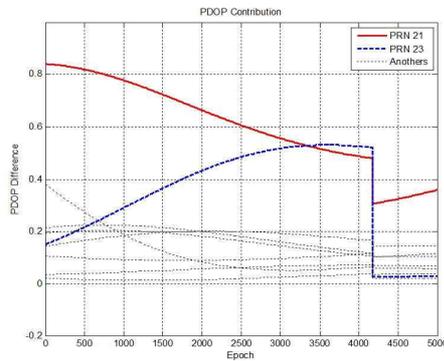


Fig. 3. 가시위성 PDOP 기여도

결 론

본 논문에서는 GPS 고장 검출 및 분리를 위한 새로운 알고리즘을 제안하였다. GPS 고장 검출 및 분리 알고리즘은 이미 여러 알고리즘이 개발되었으나, 기존의 알고리즘은 GPS 고장 검출을 위해 가시위성 수만큼의 위성군을 만들어 각 기법마다의 검정통계량을 비교하여 왔다[5]. 본 논문에서는 기존의 알고리즘과 달리, 잔차 수평 투영 비교만으로 고장 의심 위성을 먼저 식별함으로써 단 1개의 위성군에 대한 고장여부 검사만으로 GPS 고장 검출이 가능함을 보였다. 이를 위해 '동일 수평면 상에 투영된 잔차를 비교하면 고장위성의 것이 정상위성의 것보다 크다'라는 가설을 제시하여 이를 수학적으로 타당함을 증명하였다. 이렇게 식별된 고장의심 위성의 고장 여부 판단 방법 또한 전체 위성군과 고장의심 위성을 제외한 위성군의 위치해 간 거리를 이용하는 방법을 제시하였다. 이를 위한 임계값은 두 위성군의 기하학적 배치에 관련된 위치 정확도 ($PDOP \sigma_{range}$)의 차이를 이용하였다.

시뮬레이션 결과는 15m 이상의 바이어스 고장에 대해 완벽하게 고장위성을 식별함을 확인하였다. 앞서 언급한 바와 같이 본 알고리즘은 기존

의 알고리즘보다 간단한 과정만으로 고장위성 식별이 가능하다. 하지만 해당 위성의 기하학적인 배치에 따라 고장 검출 성능이 변화할 수 있음을 확인하였다. 이에 대한 해결방법 및 의사거리가 감소하는 고장에 대한 연구를 향후에 계속하여 진행할 것이다.

후 기

본 논문은 기초기술연구회 협동연구사업 '항공 응용을 위한 다중 GNSS의 RAIM 연구' 및 2009년 건국대학교의 지원에 의해 연구되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 1) Hoffman, Wellenhop, Lichtenegger, Wasle, "GNSS-Global Navigation Satellite Systems", Springer, 2008
- 2) 안용운, 성상경, 이영재, "거리잔차 및 위치 비교를 이용한 비정상 위성 식별 및 분리", GNSS workshop, 2009.
- 3) Lee, Y.C., "Analysis of Range and Position Comparison Methods as a Means to Provide GPS Integrity in the User Receiver", Proceeding of the Annual Meeting of the ION, June 24~25, 1986, pp. 1~4.
- 4) Parkinson, B. W., and Axelrad, P., "Autonomous GPS Integrity Monitoring Using the Pseudorange Residual", *Navigation*, Vol. 35, No. 2, 1988, pp. 255~274.
- 5) R. Grpver Brown, Gerald Y. Chin, "GPS RAIM : Calculation of Threshold and Protection Radius Using Chi-Square Methods-A Geometric Approach", Global Positioning System 'GPS and Its Augmentation System', The Institute of Navigation Redbook, Vol. 5, 2002.