

## 위성항법시스템을 이용한 정밀 자세 결정

류희섭, 라승호, 권태무  
대우중합기계 특수사업본부 정밀센서담당 연구개발팀  
전화 : 031-330-7705 / 핸드폰 : 011-9780-2923

### Precise Attitude Determination using Global Positioning Systems

Hee-Seob Ryu, Seung-Ho Ra, Tae-Moo Kwon  
Precision Sensor Production Engineering Dept., Defense Products Division,  
DaeWoo Heavy Industries & Machinery, LTD.  
E-mail : davis21@iae.re.kr

#### Abstract

This paper deals with the attitude determination using GPS carrier phase. The main factors on attitude reliability are accuracy, error factors and the real-time ambiguity resolution speed. Firstly, these factors are reviewed. And then, the attitude reliability is improved by applying the averaging method. Finally, the attitude determination software is verified by the experiments. The accuracy of the proposed attitude determination method is 0.013° PE in live test. This result is more accurate than the existing INS equipment.

이에 현재 위성항법시스템을 이용한 자세 결정에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 방법들은 주로 위성항법시스템 안테나 간에 구성되는 기저선 벡터의 방위각을 의사거리 차분방식으로 구하거나 또는 미지정수를 추정한 후 반송파 위상을 이용하는 이중 차분 방식 등이다.[1]

본 논문에서는 시공간에 제약 조건을 갖는 상황에서 정밀한 자세 결정을 위해 반송파 위상을 이용한 이중 차분 방식을 사용한다. 이를 위해 개발된 소프트웨어는 미지정수 검색범위를 최소화시켜 실시간 성능 및 신뢰도가 개선되었으며, 평균화 기법을 적용하여 정확도를 향상시켰다.

#### I. 서론

지금까지 자세 결정을 위해서는 북극성 관측 혹은 자이로스코프를 이용한 관성항법장치와 같은 계측 장비가 이용되었다. 이러한 측정방법은 주변 환경이나 날씨에 크게 의존하며 매우 고가의 장비를 필요로 하였다. 또한 자이로스코프는 측정시간에 따라 오차가 누적되는 특성으로 인해 일정주기마다 오차교정을 해야 하는 단점이 있다. 이러한 기존 방법을 대체할 수 있는 방법으로 오늘날 위성항법시스템(GPS)이 널리 사용되고 있다. 위성항법시스템은 WGS-84 좌표계로 위치, 속도, 시각을 정확하게 측정할 수 있으며 사용되는 수신기가 자이로스코프를 사용하는 관성항법장치에 비해 매우 저렴하다.

#### II. 위성항법시스템 측정치 및 오차

GPS 수신기에서 의사거리와 반송파 위상은 위성과 수신기의 거리 정보를 포함하는데 위성의 위치오차, 이온층 지연, 대류권 지연, 다중경로, 수신기 시각 및 측정 잡음 오차 등에 의해서 수식 (1)과 (2)와 같이 표현된다. 여기서 반송파 위상은 1.57542 GHz의 주파수 신호에서 순간 시각에 측정된 위상을 의미하며 파장 19 cm로 의사거리를 나눈 정수부분을 의미하는 미지정수  $N$ 이 존재한다.[2]

$$\rho_{code} = r + \delta_{eph} + \delta_{iono} + \delta_{trop} + \delta_{mp,code} - cT + v_{code} \quad (1)$$

$$\lambda\phi = r + \delta_{eph} - \delta_{iono} + \delta_{trop} + \delta_{mp} - cT + v_{carrier} + \lambda N \quad (2)$$

의사거리는 위성으로부터 수신기까지의 도달시간을 나타내는 C/A 코드로부터 측정되기 때문에 모호성을 가지지 않는데 반해 다중경로 및 측정오차가 크다. 이에 비해 반송파로부터 측정되는 위상은 앞에서 살펴본 미지정수  $N$ 이 존재하는데 반해 다중경로 및 측정 잡음 영향이 매우 적다. 한편 의사거리와 반송파 위상 측정에 있어서 공통된 오차인 위성의 위치오차, 이온층 오차, 대류권 지연오차는 주국과 종국으로 구성된 차분위성항법 방식으로 줄일 수 있다. 차분위성항법을 적용하면 위성 위치 오차는 제거되며, 이온층 오차, 대류권 오차 및 다중경로는 안테나 사이의 거리에 반비례하여 감소하므로 상대위치 정확도는 향상된다. 이러한 상대위치는 지구자전축을 고려한 ECEF 좌표계로 표현되므로 방위각을 구할 수 있다.[3]

### III. 자세 결정 알고리즘

항체의 자세 요소인 방위각, 양각, 롤은 항법좌표계로부터 동체좌표계로 변환하는 좌표변환행렬의 각도로서 수식 (3)과 같이 표현된다.

$$\begin{pmatrix} x_b & y_b & z_b \end{pmatrix}^T = R \begin{pmatrix} e & n & u \end{pmatrix}^T, \quad (3)$$

여기서  $R$ 은 회전행렬이다.

수식 (3)의 양변에  $R$ 의 역행렬과 같은  $R^T$ 를 곱하고 위의 좌표값을 대입하면 다음과 같이 방위각  $h$ 와 양각  $p$ 를 직접 구할 수 있다.[1]

$$h = -\tan^{-1}(e/n) \quad (4)$$

$$p = -\tan^{-1}(u/\sqrt{e^2+n^2}) \quad (5)$$

제한된 시공간에서 정밀한 자세 결정을 위해서는 항법좌표계로 표현된 상대위치를 매우 정확하게 측정해야 한다. 이러한 정확도는 주국과 종국의 안테나로 구성된 기선벡터의 반송파 위상을 차분하여 이용함으로써 다중경로, 수신기 측정 잡음, 안테나 중심이동 등에 의한 영향만 받기 때문에 가능하다. 위성항법시스템 수신기에서 상대위치는 항법좌표계가 아닌 ECEF 좌표계로 표현되는데 절대위치에 따라 변한다. 그런데 절대위치 오차가 50 m 정도 존재할 때 상대위치 오차는 0.3 mm 이하이다. 현재 GPS 수신기는 약 10 m CEP 정확도로 절대위치를 제공하므로 반송파 위상의 오차인 2 mm에 비해 무시할 수 있을 정도로 작다.

항법좌표계에서 측정된 좌표의 오차에 대한 방위각

의 영향을 분석하기 위해 수식 (4)를 미분하여 방위각 오차를 방위각  $h$ , 양각  $p$ , 안테나 사이거리  $L_{12}$ 로 나타내면 수식 (6)과 같이 표현된다.

$$\sigma_h = \frac{\sqrt{\cos^2(h)\sigma_e^2 + \sin^2(h)\sigma_n^2}}{L_{12} \cos(p)} \quad (6)$$

방위각의 정확도는 항법좌표계의 상대위치 정확도와 안테나 사이거리 및 양각의 크기도 영향을 미친다. 방위각 정확도를 향상시키기 위해서는 상대위치 정확도를 작게, 안테나 사이거리를 크게, 양각을 0도에 가깝게 하는 것이 필요하다. 상대위치 정확도를 2 mm, 양각을 0도로 정했을 경우 0.4 mil PE의 방위각을 얻기 위해서는 5 m 정도의 안테나 사이거리가 필요함을 알 수 있다. 이상과 같이 절대위치 정확도, 양각, 안테나 사이거리 등의 조건들은 방위각 측정 조건이라고 할 수 있다. 근본적으로 방위각 정확도는 ECEF 좌표계에서 상대위치 측정 정확도에 따라서 결정된다고 할 수 있다.

주국을 중심으로 한 종국 GPS 수신기의 상대위치를 정확하게 구하기 위해, 각각 다른 GPS 위성의 반송파 위상과 차분함으로써 시각오차를 제거할 수 있는 이중차분 방식이 주로 쓰이고 있다. 이러한 이중차분 방식에 의한 반송파 위상은 수식 (7)과 같고 다중경로 오차는 작아지지만 안테나 중심이동이나 수신기 내부 열적 잡음 등에 의한 측정 잡음은 반송파 위상의 측정 잡음의 4배로 증가한다. 또한 미지정수  $N$ 을 정확하게 추정해야 반송파 위상을 이용할 수 있다.[2]

$$\nabla\Delta\lambda\phi = \nabla\Delta r + \nabla\Delta\delta_{mp} + \nabla\Delta v_{carrier} + \nabla\Delta\lambda N \quad (7)$$

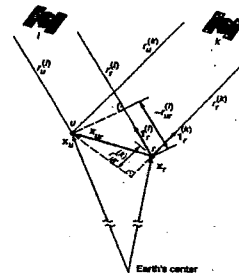


그림 1. 이중 차분 방식의 변수 설정

식 (7)을 이용하기 위해 그림 1에서 설정된 시선 벡터, 주국  $r$ , 종국  $u$  등의 변수로 표현하면 아래와 같다.

$$\phi_{ur}^{kl} = \lambda^{-1} r_{ur}^{kl} + N_{ur}^{kl} + v_{\phi,ur}^{kl} \quad (8)$$

$$r_{ur}^{kl} = -(1_r^k - 1_r^l) \cdot \bar{x}_{ur} \quad (9)$$

여기서,  $\bar{x}_{ur}$ 는 항법좌표계에서 주국에 비한 종국의 상대위치이다.

공간에서의 3개의 자유도를 가지는 상대위치를 구하기 위해서는 최소 4개 이상의 GPS 위성을 추적하여 반송파 위상을 측정해야하고  $K$ 개의 GPS 위성을 추적하고 있을 때 측정 방정식은 다음과 같이 된다.

$$\begin{bmatrix} \phi_{ur}^{2a} \\ \phi_{ur}^{3b} \\ \vdots \\ \phi_{ur}^{Kn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(1_r^2 - 1_r^a)^T \\ -(1_r^3 - 1_r^b)^T \\ \vdots \\ -(1_r^K - 1_r^n)^T \end{bmatrix} \bar{x}_{ur} + \begin{bmatrix} N_{ur}^{2a} \\ N_{ur}^{3b} \\ \vdots \\ N_{ur}^{Kn} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{ur}^{2a} \\ v_{ur}^{3b} \\ \vdots \\ v_{ur}^{Kn} \end{bmatrix} \quad (10)$$

반송파 위상을 이용한 상대위치 측정 방정식인 수식 (10)의 좌변은 GPS 수신기로부터 측정되는 값이고 우변의 시선벡터는 천문력 자료로부터 정확하게 계산이 가능하다. 따라서 미지정수 벡터인  $N$ 항만 추정하면 최소자승법 등으로 상대위치 계산이 가능하다.

#### IV. 미지 정수 추정 기법

기존 미지정수 추정 기법은 모호성이 존재하지 않는 의사거리 이용 방법, 장시간 반송파 위상 측정 후 직접 계산법, 안테나 교환법 등이 있다. 그러나 높은 신뢰도와 제한된 공간에서 안테나 사이거리의 측정이 가능하고 매초마다 추정된 미지정수를 검증하기 위해 반송파 위상 오차를 분석하여 미지정수를 추정하는 보간법이 효과적이다. 그림 2는 안테나 사이 거리를 입력받아 보간법으로 미지정수를 추정하는 흐름도이다. 안테나 사이 길이  $b$ , 최소추정시간, 신뢰비율, 주국 위치 등의 입력에 따라서 미지정수 추정영역을 설정하며 반송파 위상의 오차를 분석하여 최종적으로 1개의 미지정수 조합을 선택한다.

방위각 측정시간 및 신뢰도와 관련이 깊은 미지정수 추정 시간은 안테나 사이 길이가 2배 길어지면 GPS 위성의 반송파 위상 미지정수 검색범위가 2배로 증가

하고 상대위치를 구하기 위한 최소 GPS 위성이 4개이므로 최대 24배로 기하급수적으로 증가한다. 따라서 4개로 구성된 주위성의 선택이 중요하다. 본 논문에서는 주 위성으로 GPS 위성 사이 각도가 가장 작은 4개를 선택한다.

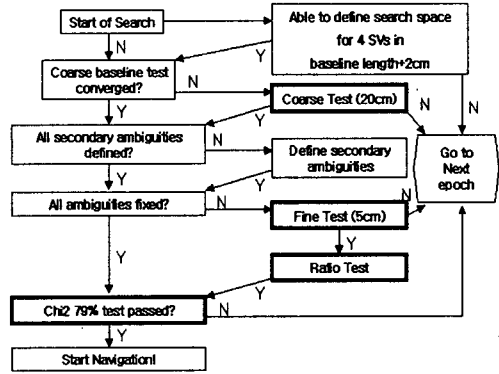


그림 2. 미지정수 추정 기법 흐름도

아래 수식 (11)은 이중 차분 반송파 위상 측정식이다.

$$\begin{aligned} \phi_{ur}^H &= |b|(\cos(\theta_k - \theta_b) - \cos(\theta_l - \theta_b)) \\ &= -2|b|\sin(\theta_k - \theta_b + \Delta\theta/2)\sin(\Delta\theta/2) \end{aligned} \quad (11)$$

미지정수  $N_{ur}^H$ 은  $\theta_b$ 가 임의일 때, 수식 (11)의 변동 크기에 따라 제한된다. 이를 수식으로 표현하면 수식 (12)로 나타내지며  $\Delta\theta$ 가 작을수록 미지정수 검색범위는 작아진다.

$$-2|b|\sin(\frac{\Delta\theta}{2}) \leq N_{ur}^H \leq 2|b|\sin(\frac{\Delta\theta}{2}) \quad (12)$$

GPS 위성 사이 각도는 수식 (13)과 같은 내적개념을 적용하면 적은 계산량으로 구해지므로 관측 가능한 모든 GPS 위성의 사이 각을 구하는 것은 가능하다.

$$1 \times 1 \times \cos(\Delta\theta) = x_1x_2 + y_1y_2 + z_1z_2 \quad (13)$$

이와 같은 기준으로 주 위성을 선택할 때 양각이 높은 GPS 위성 순서대로 주 위성을 선택할 경우보다 평균 50% 정도의 방위각 측정 시간단축 효과가 있다.

### V. 평균화 적용

주파수영역에서 방위각 데이터를 분석해보면 0.04 Hz 이하의 저주파수 영역의 다중경로 및 안테나 중심 이동 영향을 크게 받고 있다. 고주파수 오차요인을 제거하고 저주파수 오차요인의 영향을 줄이기 위해 그림 3과 같이 평균시간에 따른 정확도를 분석하였다. 분석 결과 300초 정도 평균할 때 만족할 만한 정확도를 얻을 수 있었다. 다중경로나 안테나 중심 이동이 없는 시뮬레이터 실험에서는 백세 측정 잡음 오차만 존재하므로 20초 정도만 평균할 때 정확도는 크게 증가한다.

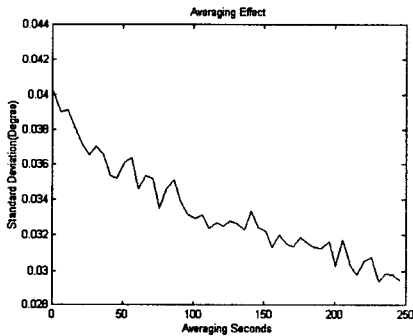


그림 3. 평균화시간에 따른 정확도 변화

### VI. 실험 결과 분석

본 논문에서 제안한 미지정수 검색 범위 설정법과 평균시간(300초) 설정에 따라 작동하고, 광학장비와 연동하여 안테나 사이거리를 자동적으로 입력받아 반송파 위상을 이용한 이중 차분 방식의 위치 결정 소프트웨어를 개발하였다. 이 소프트웨어를 이용하여 위치 결정 실험을 수행하였으며 그 결과는 안테나 사이 거리가 5.67 m인 경우 그림 4와 같고 참값은 측지점과 광학장비를 이용, 측정하였다.

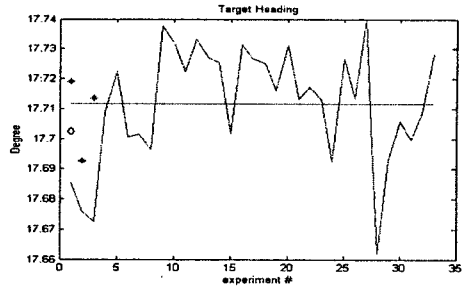


그림 4. 방위각 측정 결과

### VII. 결론

본 논문은 위성항법시스템의 반송파 위상 신호를 이용한 자세 결정 알고리즘의 연구 결과로, 자세 결정의 정확도 및 오차 유발 요인, 위성항법시스템 위성 배치 상태에 따른 효율성, 평균화 기법을 적용한 정확도 향상에 대해 살펴보았다. 정밀 자세 결정에서 안테나 사이 거리와 평균시간은 반비례하여 설계할 수 있다. 이를 고려하여 수행한 자세 결정 야외실험에서 0.01315° PE (0.236 mil) 정확도를 얻었는데 이는 자동측지장비, 항체의 자세측정 및 제어, 천측장비 개발 등에 응용될 수 있을 것이다.

### 참고문헌

- [1] Gang Lu, "Development of a GPS Multi-Antenna System for Attitude Determination", Ph.D Dissertation, University of Calgary, January 1995.
- [2] Pratap Misra, Per Enge, "GLOBAL POSITIONING SYSTEM Signals, Measurements, and Performance", Ganga-Jamuna Press, 2001.
- [3] James Rankin, Ph.D., P.E, "GPS and Differential GPS: An Error Model for Sensor Simulation", PCANS, 1994.