

## 위상 관측 자료를 이용한 GPS 위성의 정밀 궤도 결정<sup>1</sup>

지 명 국 · 최 규 홍  
연세대학교 천문대기학과

박필호  
한국표준과학연구원 천문대

### PRECISE ORBIT DETERMINATION OF GPS SATELLITES USING PHASE OBSERVABLES<sup>1</sup>

Myung-Kook Jee and Kyu-Hong Choi  
Department of Astronomy and Atmospheric Science, Yonsei University, Seoul 120-749  
e-mail: mkjee@galaxy.yonsei.ac.kr, khchoi@galaxy.yonsei.ac.kr

Pil-Ho Park  
Korea Astronomy Observatory, Taejon 305-348, Korea  
e-mail: phpark@daen.kaist.ac.kr

(Received October 20, 1997; Accepted November 20, 1997)

#### 요 약

GPS(Global Positioning System)에 있어서 궤도의 정밀도는 응용분야의 결과에 영향을 미치는 매우 중요한 파라미터이다. 따라서 GPS 사용자가 얻는 자료의 정밀도는 기준으로 삼고 있는 위성의 위치 자료를 얼마만큼 신뢰할 수 있느냐에 달려있는데 이들 위성의 위치 자료는 실 시간으로 제공되는 항법메세지에 포함된 방송궤도력에 의존할 경우 실제위치와 약 3~10m의 차이가 난다. 그러나 GPS를 이용하여 100km의 기선거리를 수 mm의 오차로 측정하기 위해서는 방송궤도력보다 실제 궤도에 매우 가까운 정밀 궤도력을 사용하여야 하는데 이 정밀 궤도력은 오차가 수 cm 정도로서 현재 이러한 수준의 정밀 궤도력을 계산할 수 있는 능력을 보유한 곳은 전 세계 약 7개 기관이다. 이번 연구에서는 정밀 궤도 결정에 필요한 궤도 모델링과 위상자료 처리 방법을 연구하였고 직접 전세계 28개 관측소로부터 관측된 위상 관측 자료들을 최소자승추정(Least Square Estimation)하여 국제 GPS 관측망에서 발표하는 궤도자료에 비길 수 있는 정밀 궤도력을 산출하였다.

#### ABSTRACT

The accuracy of user position by GPS is heavily dependent upon the accuracy of satellite position which is usually transmitted to GPS users in radio signals. The real-time

<sup>1</sup>이 연구는 과학재단 ERC KAIST 인공위성연구센터의 연구비 지원으로 수행되었음.

satellite position information directly obtained from broadcast ephemerides has the accuracy of 3 ~ 10 meters which is very unsatisfactory to measure 100km baseline to the accuracy of less than a few milli-meters. There are globally at present seven orbit analysis centers capable of generating precise GPS ephemerides and their orbit quality is of the order of about 10cm. Therefore, precise orbit model and phase processing technique were reviewed and consequently precise GPS ephemerides were produced after processing the phase observables of 28 global GPS stations for 1 day. Initial 6 orbit parameters and 2 solar radiation coefficients were estimated using batch least square algorithm and the final results were compared with the orbit of IGS, the International GPS Service for Geodynamics.

## 1. 서 론

원하는 정밀도의 측지를 위해서 필요한 궤도의 정밀도는 식(1)을 사용하여 간단하게 추정해 볼 수 있다(Bauersima 1983).

$$\frac{db}{b} = \frac{dr}{\rho} \quad (1)$$

여기서  $b$ 는 기선거리(Baseline Length),  $\rho$ 는 수신기로부터 위성까지의 거리(Range),  $dr$ 은 궤도오차,  $db$ 는 위성 위치 오차로 발생하는 기선거리 오차이다. 식(1)을 사용하여 수신기로부터 위성까지의 평균거리  $\rho=25000\text{km}$ , 기선거리  $b=100\text{km}$ 를 가정하였을 때 궤도오차가 발생시키는 기선거리 측정의 오차를 표로 나타내면 다음과 같다.

표 1에 따르면 현재 실시간으로 이용할 수 있는 방송궤도력은 약 3~10m의 오차를 가지므로 측지에 이용할 때 기선거리에 대하여 0.5ppm(Part Per Million) 이내의 정밀도를 제공한다. 만약 우리가 좀더 정밀하게 0.02ppm 이내의 오차로 측지를 수행하고 싶다면 50cm 미만의 오차를 가지는 매우 정밀한 궤도력이 필요한데 이런 정밀궤도력은 현재 국제 GPS 정보기관의 자료에 의존하고 있는 것이 국내의 현실이다. 본 연구에서는 직접 전세계 28개 관측소로부터 얻어진 위상자료를 최소자승추정(Least Square Estimation)하여 국제 GPS 관측망에서 발표하는 궤도자료에 비길 수 있는 정밀궤도력을 산출하였다. 인용된 많은 수학적 모델이 스위스 베른대학 천문연구소의 소프트웨어인 베르니스(Bernese)에 기초함을 밝혀 둔다.

표 1. 궤도의 정밀도와 측지오차.

위성위치 오차(m)	기선거리오차	
	ppm	cm
100 m	4	40
10 m	0.4	4
2.5 m	0.1	1
1 m	0.04	0.4
0.5 m	0.02	0.2

## 2. 위상관측자료의 처리

궤도결정을 정밀하게 수행하기 위해서는 되도록 관측소의 위치가 지표상에 골고루 분포해야 하며 하루 이상 장기간에 걸친 관측이 이루어져야 한다(Gurtner *et al.* 1989). 현재 전 세계에는 150개 이상의 IGS 공인 관측소가 가동중이나 계산에 사용한 워크스테이션의 처리능력과 용량의 한계상 다음의 그림에서 볼 수 있는 것과 같이 28개의 관측소를 선정하였으며 1997년 1월 20일 UT 24시간 동안의 관측자료를 이용하였다.

각 관측소의 관측자료는 모두 자료교환의 호환성을 위하여 전송 당시 RINEX 형식으로 제공되는데 RINEX 형식으로 제공되는 관측자료는 부호(Code)와 위상(Phase)으로 측정된 위성들의 의사거리(Pseudorange)로 구성된다(Hofmann-Wellenhof *et al.* 1992). 부호신호의 경우 모호성(Ambiguity)이 없고 다루기 쉽기 때문에 현재까지 많이 이용되어 왔고 지금도 저가의 수신기에서 위치결정에 사용하는 신호이지만 분해능(Resolution)이 수 m 정도로 낮기 때문에 정밀한 궤도결정을 위한 관측자료로서는 부적합하다(Beutler *et al.* 1984). 따라서 위상 의사거리(Phase Pseudorange)를 이용하기 위하여 RINEX 형식의 자료로부터 부호와 위상신호를 분리하는 것이 자료처리의 첫번째 단계이다. 이렇게 하여 분리된 위상 의사거리 자료는 GPS 신호가 산이나 나뭇가지 등에 부딪쳐 발생하는 Cycle Slip, 낮은 위성의 고도로 인한 신호왜곡, 대류권 통과시 발행하는 신호 지연, 신호가 바다나 지면에 반사되어 도달하기 때문에 생기는 다중경로 지연(Multipath delay) 등을 포함하고 있으므로 적절한

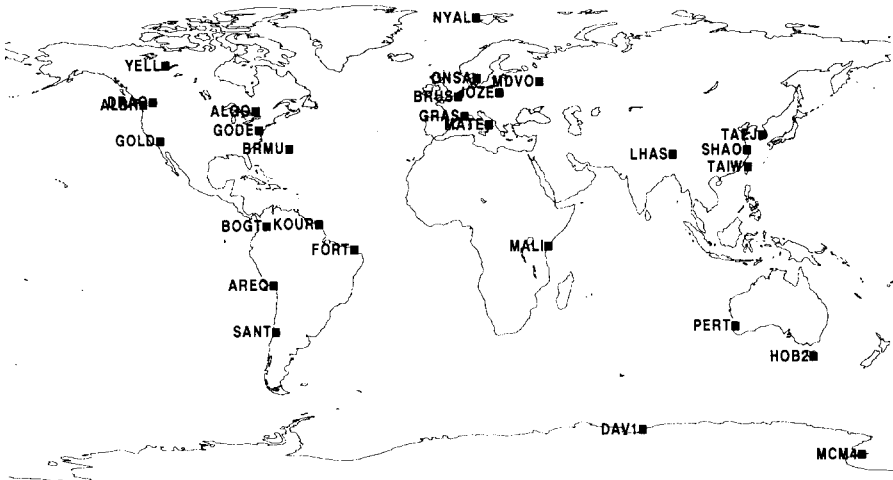


그림 1. 궤도결정에 사용된 IGS 소속 GPS 관측소.

표 2. 궤도결정 수행후 초기 접촉궤도요소(1997년 1월 20일 0시 UT, J2000).

위성	구분	장반경(m)	이심률	궤도경사각	승교점	근지점인수	평균근점이각
1	B	26561590.8	0.00345630	54.679487	161.089244	-88.577125	114.193155
	P	26561590.6	0.00345634	54.679493	161.089241	-88.576276	114.192303
2	B	26558693.1	0.01616052	54.090503	-82.505102	223.203126	-130.047242
	P	26558692.8	0.01616037	54.090507	-82.505109	223.202881	-130.046989
3	B	26561471.7	0.00307459	54.651260	-20.808570	147.725027	11.142452
	P	26561471.6	0.00307470	54.651257	-20.808573	147.725055	11.142427
4	B	26560478.1	0.00427470	55.758851	40.556038	-56.651010	10.277537
	P	26560478.0	0.00427458	55.758847	40.556039	-56.650549	10.277076

(\* B: 방송궤도력 P: 추정된 궤도요소, 장반경 이외의 값은 단위가 DEGREE 임)

모델을 도입하여 위의 오차발생원인을 제거하는 절차가 필요하다. 한편, 위성의 위치를 계산하는데 이용하는 궤도자료는 항법메세지(Navigation Message)로부터 얻을 수 있는데 위성에만 의존할 뿐 관측소에는 무관하므로 특정 관측소의 방송궤도력(Broadcast Ephemerides)을 사용하는 것으로 충분하다. 본 연구에서는 대전 천문대 GPS 관측소의 방송력을 이용하였다. 궤도력과 정돈된 위상 의사거리 자료가 준비되면 궤도결정을 수행할 수 있는데 이때 중요한 자료로 제공되어야 하는 것이 관측소의 정확한 위치와 극 운동 편차이다. 지각판의 움직임에 의해 관측소의 위치는 매년 수 cm씩 변하고 있으므로 해당 시점에서 관측소들의 위치를 정확히 아는 것은 궤도결정의 정밀도에 많은 영향을 미치게 된다. 또한 극운동 자료도 국제 지구자전 협회(IERS)에서 발표하는 자료를 이용하였는데 관측소의 위치 좌표와 함께 연결되므로 매우 중요한 입력 자료이다.

### 3. 궤도결정 결과

모두 25개의 GPS 위성에 대하여 궤도결정을 수행하였다. 관측자료는 28개 관측소의 위상자료를 이차 차분(Double Difference)취했으며 이온층에 의한 신호의 지연을 상쇄시키기 위하여 L1, L2의 선형조합 L3를 구성하였다. 한편 대기굴절에 의한 신호지연을 최소화시키기 위해 고도가 20도 미만인 경우의 자료를 제거하였는데 결과적으로 약 1/5 이상의 관측자료를 제외시켜야만 했다. 4개의 위성에 대하여 6개의 궤도요소를 일괄 최소자승추정환(Batch Least Square Estimation) 결과는 표 2와 같다. 실제로 방송궤도력보다 추정된 궤도력이 얼마나 실제 궤도에 접근하는지는 하루 동안 위성 위치의 차이를 나타낸 그림 2를 보면 알 수 있는데 기준으로 삼은 궤도력은 IGS에서 10일 이후 발표한 IGS 정밀궤도력이다.

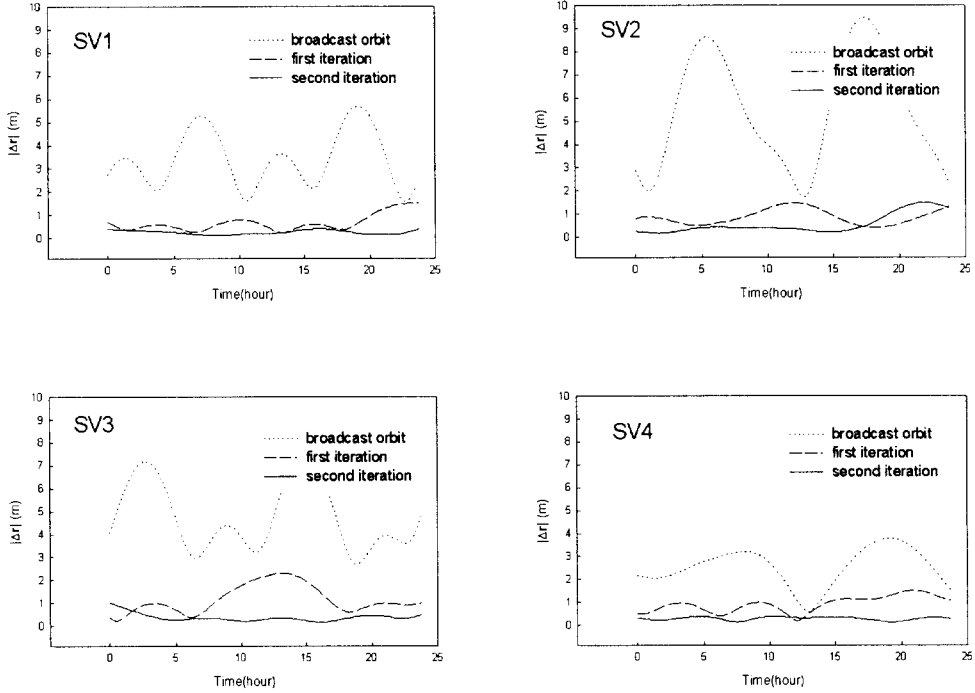


그림 2. 방송궤도력과 추정된 궤도력과의 비교.

#### 4. 결 론

위상관측자료를 이용하여 최소자승추정 알고리즘에 의해 결정된 궤도가 앞의 그림 2에서 볼 수 있는 것과 같이 IGS궤도와 비교했을 경우 평균 위치 차이가 약 20cm 정도로 나타났는데 이것은 100km의 기선 거리를 0.2cm의 오차로 측지하려고 할때 표 1에서 요구하는 궤도 정밀도 50cm를 충분히 만족시키는 결과이다. 이처럼 본 연구에서 결정된 궤도와 실제 위성의 위치가 가까울 수 있었던 것은 분해능이 정밀한 GPS 신호 반송파의 위상을 관측자료로 사용하였을 뿐만 아니라 L1, L2의 이중 주파수를 이용함으로써 이온층에 의한 지연효과를 소거할 수 있었기 때문이었다고 생각된다. 한편 지구의 극운동 자료와 관측소의 정밀 위치를 CODE(Center for Orbit Determination in Europe)에서 계산한 당일 자료를 사용한 점과 궤도결정에서 중요한 궤도전파기의 성능이 국제적으로 공인받는 NASA의 GEODYN과 비교했을 때 손색이 없는 점도 결과의 정밀도를 향상시키는데 많은 기여를 했을 것으로

생각된다. 현재 IGS소속 7개 기관에서 발표하는 정도의 양질의 궤도력을 산출하기 위해서는 전세계 약 150개 GPS관측소의 자료 10일 분 이상을 동시에 처리할 수 있어야 하며 향후의 과제도 이러한 용량을 감당할 수 있는 시스템 구축 및 알고리즘의 개발이다.

#### 참 고 문 헌

- Bauersima, I. 1983, NAVSTAR/Global Positioning System GPS II (University of Berne: Berne), X-582-76-77
- Beutler, G. Beutler, G., Langley, R. B., Delikaraoglou, D., Nickerson, B., Santerre, R., Vanicek, P. & Wells, D. 1984, Switzerland and Department of Surveying Engineering Technical Report (University of Berne: Berne)
- Gurtner, W. Beutler, G., & Rothacher, M. 1989, Proceedings 5th International Geodetic Symposium on Satellite Positioning, 1, 362
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H. & Collins, J. 1992, Global Positioning System Theory and Practice (Springer-Verlag: New York)