

GPS의 반송파 위상을 이용한 상대측지 S/W의 개발¹

안 용 원 · 김 천 휘

충북대학교 천문우주학과

박 필 호 · 박 종 욱 · 조 정 호

한국표준과학연구원 천문대

DEVELOPMENT OF A S/W SYSTEM FOR RELATIVE POSITIONING USING GPS CARRIER PHASE¹

Yong-Won Ahn, Chun-Hwey Kim

Department of Astronomy and Space Science, Chungbuk National University

e-mail: ahnyw@astro.chungbuk.ac.kr, kimch@astro.chungbuk.ac.kr

Pil-Ho Park, Jong-Uk Park, Jeong-Ho Jo

Korea Astronomy Obseatory

e-mail: phpark@daen.kaist.ac.kr, parkju@daen.kaist.ac.kr, jojh@daen.kaist.ac.kr

(Received October 31, 1997; Accepted November 20, 1997)

요 약

GPS(Global Positioning System) 위성에서 수신된 L1(1575.42MHz) 반송파 위상자료를 이용하여 지표면의 두 지점의 기선벡터와 기선거리를 계산할 수 있는 S/W를 이중차분(Double-Difference)법을 사용하여 개발하였다. 개발한 S/W는 크게 네부분으로 구성된다. 첫째는 위성의 위치를 계산하는 부분, 둘째는 단일차분 방정식을 구성하는 부분, 셋째는 이중차분을 구성하는 부분, 그리고 마지막으로 상관관계를 계산하는 부분이다. 개발한 S/W의 정확도를 검증하기 위하여, 대전 천문대의 GPS 관측소(N37°.75, E127°.37, H77.61m)를 중심으로 약 2.7, 42.1, 81.1, 146.6km 떨어진 네 지점에서 Trimble 수신기를 이용하여 동시에 GPS 위성으로부터 관측자료를 획득하였다. 획득한 관측자료를 이 연구에서 개발한 S/W로 처리하였고, 그 결과를 Trimble사의 자료처리 S/W인 GPSurvey에 GPS 위성의 방송궤도력을 적용하여 L1/L2 ION-Free 기법으로 계산한 결과와 비교하였다. 두 S/W 시스템으로 산출한 기선벡터의 각 성분은 약 50cm내외에서 잘 일치하였고 기선 거리는 약 10cm내외에서 서로 일치하였다.

ABSTRACT

We developed a GPS phase data processing S/W system which calculates baseline vectors and distances between two points located in the surface of the Earth. For this

¹이 연구는 과학재단의 연구비 지원으로 수행되었음.

development a Double-Difference method and L1 carrier phase data from GPS(Global Positioning System) were used. This S/W system consists of four main parts: satellite position calculation, Single-Difference equation, Double-Difference equation, and correlation. To verify our S/W, we fixed KAO(N36°.37, E127°.37, H77.61m), one of the International GPS Services for Geodynamics, which is located at Tae-Jon, and we measured baseline vectors and relative distances with data from observations at approximate baseline distances of 2.7, 42.1, 81.1, 146.6km. Then we compared the vectors and distances with the data which we obtained from the GPSurvey S/W system, with the L1/L2 ION-Free method and broadcast ephemeris. From the comparison of the vectors and distances with the data from the GPSurvey S/W system, we found baseline vectors X, Y, Z and baseline distances matched well within the extent of 50cm and 10cm, respectively.

1. 서 론

GPS는 인공위성을 이용한 전파항법 시스템으로 미 국방성에서 개발한 것으로 세계 측지 좌표계인 World Geodetic System 1984(Hofmann-Wellenhof *et al.* 1992)를 이용하여 사용자의 위치, 속도, 그리고 시간을 정확하게 결정할 수 있는 시스템이다. 특히 어떠한 기상 조건하에서도 사용할 수 있고, 수동적이며 무제한의 사용자, 그리고 간섭과 방해에 강하다는 장점을 지니고 있기 때문에 현재 GPS를 이용하여 수많은 분야에서 사용이 급속도로 확산되고 있다.

GPS를 이용하여 위치를 알아내는 경우 코드(Code)자료와 반송파 위상(Carrier Phase)자료를 이용하는데, 각 자료의 분해능 차이에 의해 코드자료는 SA(Selective Availability)하에서 표준 위치 추정(SPS, Standard Positioning Service)시 지심좌표계로부터 약 100m(2 drms, two-distance root-mean squared)의 오차를 보이고 있고, L1 또는 L2의 반송파 위상자료는 수 mm ~ 수 cm의 오차를 나타내고 있다. 이와 같이 GPS의 반송파 위상을 이용하여 수 mm의 정밀측위 방법으로 정지측위 기법이 제시된 것은 초장기선 간섭계(VLBI)의 연구에서 비롯되었고 1980년대에 실용화되었다. 그 이후 Remondi(1984, 1986)에 의해 정지측위에 대한 S/W가 개발되어 GPS를 이용한 정밀측위가 가능하게 되었다. 현재 GPS의 반송파 위상자료를 이용하여 제점간의 상대적인 위치를 결정할 경우 약 0.001ppm(parts per million) 즉, 10억분의 1이상의 높은 정확도로 지구상 두 지점간의 상대적 위치를 측정할 수 있다(Beutler *et al.* 1996).

대개 코드자료는 반송파 위상자료에 비해 자료처리가 간단하고 모호성(ambiguity)이 없으므로 주로 자동차와 같이 비교적 덜 정밀한 실시간 항법해를 결정하는데 이용하고 있는데 비해, 반송파 위상자료는 모호성으로 인해 실시간 항법해 보다는 일괄(batch)처리를 통하여 정밀성을 요구하는 지진예측, 지각운동, 그리고 극운동 등에 쓰이고 있다.

이 연구는 반송파 위상자료를 처리하여 수신기의 정밀한 3차원의 상대 위치 및 상대 기선거리를 측정할 수 있는 상대측지용 S/W를 개발하기 위한 것이 목적이다. S/W를 개발하기 위해 현재 전세계적으로 측지용 GPS 수신기에 이용되고 있는 반송파 위상 자료처리 S/W와 유사한 알고리즘을 지

니고 있는 스위스 베른대학 천문연구소에서 개발한 Bernese GPS S/W의 수학적 모델 중 일부를 이용하였다. 또한 개발한 S/W는 정밀측지용 Trimble 수신기에서 얻은 L1 반송파 위상 자료를 바탕으로 하고 있으며, 이러한 값들을 바탕으로 이중차분(Double-Difference)법을 이용하여 S/W를 개발하였다.

2. 상대측지를 위한 수학적 모델식

2.1 GPS의 관측치

GPS 관측치는 위성으로부터 수신한 신호와 수신기에서 발생한 신호를 비교하여 측정된 시간 즉, 두 신호의 위상 차이에서 유도되는 값이다. 기본적으로 GPS는 위성과 수신기에 있는 시계를 각각 이용하고 있다. 따라서 위성과 수신기 시계의 오차에 의해 거리(Range)값이 실제값과 차이를 보이고 있기 때문에 이를 의사거리(Pseudorange)라고 부르고 있다(Hofmann-Wellenhof *et al.* 1992). 여기에는 코드 의사거리와 반송파 위상 의사거리가 있다. 수신기는 시각 t 에서 수신된 위상 중 얼마만큼이 수신기 자체의 내장 시계보다 앞서 있는가를 측정하므로 수신기에서 수신한 자료는 위성에서 송신된 반송파 위상과 수신기에서 생성한 반송파 위상사이의 차이값에 해당한다. 그 차이값은

$$\varphi_R^S(t) = -f^S \frac{\rho}{c} - f^S \delta^S + f_R \delta_R + (f^S - f_R)t \quad (1)$$

이다. 여기서 ρ 는 위성에서 수신기까지의 거리, c 는 광속, 그리고 f^S , f^R 와 δ^S , δ^R 은 각각 위성과 수신기의 주파수와 시계오차를 나타낸다. (1)식에서 f^S 와 f^R 는 같은 값으로 볼 수 있으며 $\Delta\delta = \delta^S - \delta^R$ 이라 정의하면, 임의의 기점에서 대기에 의한 지연오차가 없는 반송파 위상식은

$$\Phi = \frac{1}{\lambda} \rho + \frac{c}{\lambda} \Delta\delta + N \quad (2)$$

이다. 여기서 $\Phi = -\Delta\varphi_R^S$ 이며, N 은 위성과 수신기 간의 모호정수(Integer Ambiguity)로서 연속적으로 위성을 추적한 경우 동일한 값을 가진다.

2.2 수학적 모델 방정식

상대측지(Relative Positioning)는 기선(Baseline)이라고 부르는 두 점 사이의 벡터를 결정하는 것으로 이미 정확히 좌표를 알고 있는 기지점을 중심으로 미지점의 좌표를 결정하는 것이다. 대부분의 경우 단일차분(Single-Difference), 이중차분(Double-Difference), 그리고 삼중차분(Triple-Difference)방법을 통해 선형조합을 구성하여 해를 구하고 있는데, 삼중차분은 Cycle Slip을 알아내기 위해 주로 이용한다. 반송파 위상에 대한 수학적 모델식인 (2)식을 보다 일반적으로 나타내면

$$\Phi_A^j(t) = \frac{1}{\lambda} \rho_A^j(t) + N_A^j + f^j \Delta\delta_A^j(t) \quad (3)$$

이다. 여기서 첨자 j 와 A 는 각각 위성과 관측지점을 나타낸다.

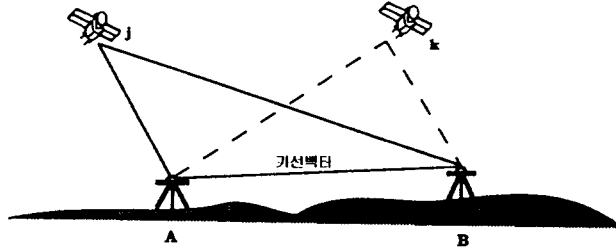


그림 1. 단일차분과 이중차분의 구성원리.

단일차분은 그림 1에서와 같이 두 관측지점 A, B에서 위성 j를 동시에 관측했을 때의 위상 차분방식이다. A, B 두 지점에 대해 (3)식을 적용하여 두 식을 서로 차분하면

$$\Phi_{AB}^j(t) = \frac{1}{\lambda} \varrho_{AB}^j(t) + N_{AB}^j - f^j \delta_{AB}(t) \quad (4)$$

이 된다. 여기서 $\Phi_{AB}^j = \Phi_B^j(t) - \Phi_A^j(t)$, $\varrho_{AB}^j = \varrho_B^j(t) - \varrho_A^j(t)$, $N_{AB}^j = N_B^j - N_A^j$, 그리고 $\delta_{AB}(t) = \delta_B(t) - \delta_A(t)$ 이다. 단일차분과 마찬가지로 이중차분은 관측지점 A, B에서 위성 j와 k를 동시에 관측했을 때의 각 위성의 단일차분으로부터 구할 수 있다. 즉

$$\Phi_{AB}^{jk}(t) = \frac{1}{\lambda} \varrho_{AB}^{jk}(t) + N_{AB}^{jk} \quad (5)$$

여기서 $\Phi_{AB}^{jk}(t) = \Phi_{AB}^k(t) - \Phi_{AB}^j(t)$, $\varrho_{AB}^{jk}(t) = \varrho_{AB}^k(t) - \varrho_{AB}^j(t)$, $N_{AB}^{jk} = N_{AB}^k - N_{AB}^j$ 이다. 단일차분의 경우 위성의 시계오차만이 소거됨을 알 수 있으며, 이중차분의 경우에는 위성의 시계오차 뿐만 아니라 수신기의 시계오차도 함께 소거됨을 알 수 있다. 그러나 두 가지 모두 모호정수 N값은 결정해야 한다. 또한 단일차분의 경우 차분을 통해 생기는 수학적인 상관관계가 존재하지 않지만 이중차분의 경우에는 존재하므로 이에 대해 고려해 주어야 한다. 이중차분의 경우 가중치 또는 상관관계 행렬이 공분산 행렬의 역행렬임을 이용하여 일반화된 가중치 행렬을

$$P(t) = \frac{1}{2\sigma^2} \frac{1}{n_{DD} + 1} = \begin{bmatrix} n_{DD} & -1 & -1 & \cdots & -1 \\ -1 & n_{DD} & -1 & \cdots & -1 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ -1 & -1 & -1 & \cdots & n_{DD} \end{bmatrix} \quad (6)$$

와 같이 구할 수 있다. 여기서 n_{DD} 는 기점 t에서의 이중차분의 개수를 나타낸다.

(3)식에서 미지수로서 비선형 함수의 형태를 띠고 있는 항은 수신기와 GPS 위성간의 거리인 ϱ 이며, $\varrho_A^j = f(X_A, Y_A, Z_A)$ 이다. 따라서 미지의 좌표점에 대한 대략적인 값 X_{A0}, Y_{A0}, Z_{A0} 를 알 수 있다면, 근사점에 대해 Taylor 급수전개를 할 수 있다. 이렇게 급수전개를 하여 2차항 이상의 고차항을 제외

하면

$$\varrho_A^j(t) = \varrho_{A0}^j(t) - \frac{X^j(t) - X_{A0}}{\varrho_{A0}^j} \Delta X_A - \frac{Y^j(t) - Y_{A0}}{\varrho_{A0}^j} \Delta Y_A - \frac{Z^j(t) - Z_{A0}}{\varrho_{A0}^j} \Delta Z_A \quad (7)$$

이 된다. 또한 (5)식을 거리의 단위로 환산하여 이중차분식에 대한 모델식을 세울 수 있다. 상대측지의 경우 한 점(예를들면 A점)에 대한 좌표값을 정확히 알고 있으므로 관측지점 B에 대한 대략적인 초기 좌표값 X_{B0}, Y_{B0}, Z_{B0} 를 설정한다면 이 좌표값으로부터 j 위성까지의 의사거리 ϱ_{B0}^j 를 계산할 수 있다. 그리고 이를 바탕으로 초기 모호정수 N_{AB0}^{jk} 를

$$\lambda_{L1} N_{AB0}^{jk} = \lambda_{L1} \Phi_{AB}^{jk}(t) - [\varrho_{B0}^k(t) - \varrho_{B0}^j(t)] + [\varrho_A^k(t) - \varrho_A^j(t)] \quad (8)$$

으로 구할 수 있다. 그러므로 (5)식은

$$\lambda_{L1} \Phi_{AB}^{jk}(t) = \varrho_{AB}^{jk}(t) + \lambda_{L1} (N_{AB0}^{jk} + \Delta N_{AB}^{jk}) \quad (9)$$

로 나타낼 수 있으며, 대략적인 초기값으로부터 구할 수 있는 값을 왼쪽으로 이항하여 이것을 l_{AB}^{jk} 라 하면

$$l_{AB}^{jk} = \lambda_{L1} \Phi_{AB}^{jk}(t) - [\varrho_{B0}^k(t) - \varrho_{B0}^j(t)] + [\varrho_A^k(t) - \varrho_A^j(t)] - \lambda_{L1} N_{AB0}^{jk} \quad (10)$$

이 된다. 이제 4개의 위성 j, k, l, m 과 2개의 기점 t_1, t_2 를 가정하고 선형화된 (7)식을 이용하여 (5)식을 행렬식으로 나타내면

$$\begin{bmatrix} l_{AB}^{jk}(t_1) \\ l_{AB}^{jl}(t_1) \\ l_{AB}^{jm}(t_1) \\ l_{AB}^{jk}(t_2) \\ l_{AB}^{jl}(t_2) \\ l_{AB}^{jm}(t_2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{XB}^{jk}(t_1) & a_{YB}^{jk}(t_1) & a_{ZB}^{jk}(t_1) & \lambda_{L1} & 0 & 0 \\ a_{XB}^{jl}(t_1) & a_{YB}^{jl}(t_1) & a_{ZB}^{jl}(t_1) & 0 & \lambda_{L1} & 0 \\ a_{XB}^{jm}(t_1) & a_{YB}^{jm}(t_1) & a_{ZB}^{jm}(t_1) & 0 & 0 & \lambda_{L1} \\ a_{XB}^{jk}(t_2) & a_{YB}^{jk}(t_2) & a_{ZB}^{jk}(t_2) & \lambda_{L1} & 0 & 0 \\ a_{XB}^{jl}(t_2) & a_{YB}^{jl}(t_2) & a_{ZB}^{jl}(t_2) & 0 & \lambda_{L1} & 0 \\ a_{XB}^{jm}(t_2) & a_{YB}^{jm}(t_2) & a_{ZB}^{jm}(t_2) & 0 & 0 & \lambda_{L1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta X_B \\ \Delta Y_B \\ \Delta Z_B \\ \Delta N_{AB}^{jk} \\ \Delta N_{AB}^{jl} \\ \Delta N_{AB}^{jm} \end{bmatrix} \quad (11)$$

이 된다. 여기서 j 위성이 기준 위성으로 이용되고 있음을 알 수 있으며,

$$\begin{aligned} a_{XB}^{jk}(t) &= -\frac{X^k(t) - X_{B0}}{\varrho_{B0}^k} + \frac{X^j(t) - X_{B0}}{\varrho_{B0}^j} \\ a_{YB}^{jk}(t) &= -\frac{Y^k(t) - Y_{B0}}{\varrho_{B0}^k} + \frac{Y^j(t) - Y_{B0}}{\varrho_{B0}^j} \\ a_{ZB}^{jk}(t) &= -\frac{Z^k(t) - Z_{B0}}{\varrho_{B0}^k} + \frac{Z^j(t) - Z_{B0}}{\varrho_{B0}^j} \end{aligned} \quad (12)$$

이다.

2.3 개발된 S/W의 흐름도

자료처리 방법으로는 최소자승법을 이용하였다. 입력자료는 RINEX(Receiver INdependent Exchange Format)형태의 관측화일과 방송케도력화일을 Bernese GPS S/W를 통해 단일차분 관측화일과 표준케도화일로 변환한 값들이며, 극운동에 의한 효과도 포함시켰다. 그리고 GPS 자료가 대류층과 이온층을 통과하며 생기는 전달지연을 고려해 주어야 하는데, 대류층 보정모델로는 대류층에서의 굴절률을 기체 방정식에서 유도한 Saastamoinen 모델식을 이용하였다(Hofmann-Wellenhof et al. 1992). 그림 2는 이 연구에서 개발한 S/W의 흐름도이다. 이 그림에서 입력부분의 일반상수로는 빛속도, L_1 주파수, 지구적도반경, 지구 각속도 등이 포함되어 있다.

3. 자료처리와 분석

일반적으로 GPS를 이용하여 정밀한 상대측지를 수행하기 위해 반송파 위상자료를 이용하는 경우, GPS 위성으로부터 송신된 신호가 여러 신호차단 매개체에 의해 차단되는 현상인 Cycle Slip을 해결해야 하는데, 이 연구는 반송파 위상의 자료처리 흐름을 파악하는 것이 초점이므로 Cycle Slip이 없는 아주 매끄러운 자료를 이용하였다. 자료처리에 앞서 천문대 GPS 관측소를 기준으로하여 기선거리 약 2.7km인 대전의 한국통신, 42.1km인 부여, 81.1km인 일죽, 그리고 146.6km인 보현산에서 관측한 자료를 이용하였다. 표 1은 입력자료 중에서 천문대 GPS 관측소의 기준 좌표값(WGS 84)과 미지점의 초기 좌표값을 나타내는데, 기준 좌표값은 박필호 등(1995)에서 인용하였고 미지점의 초기 좌표값은 RINEX 관측화일에 포함되어 있는 항법적으로 결정된 값들을 이용하였다.

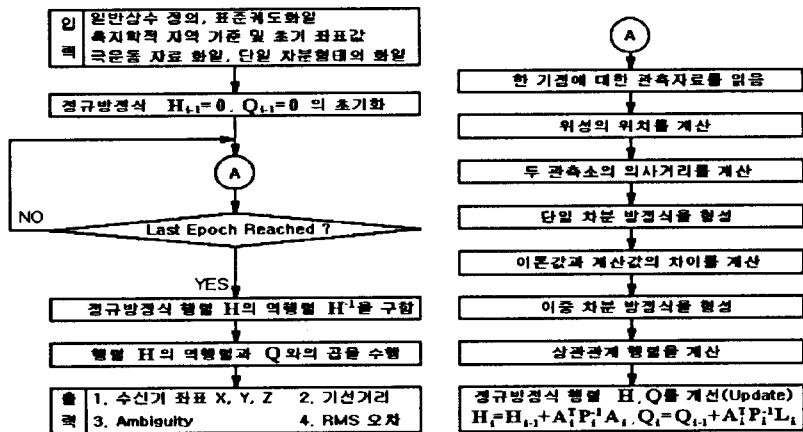


그림 2. S/W의 흐름도.

표 1. 천문대 GPS 관측소의 기준 좌표값과 미지점의 초기 좌표값. (단위: meter)

장소	X축	Y축	Z축	기선거리
천문대 GPS 관측소	-3120422.951	4086355.676	3761769.613	0
대전 한국통신	-3119961.599	4084786.134	3763949.765	2725.662
부여	-3091341.645	4115747.818	3753746.765	42118.719
일죽	-3099827.406	4041789.086	3826274.277	81062.995
보현산	-3243320.918	4008481.734	3743654.953	146616.514

표 2. 자료처리 결과. (단위: meter)

장소	성분	$P_{\text{이 연구}}$	P_{GPSurvey}	RMS 오차	$ \Delta P $
대전 한국통신	X	-3119961.987	-3119961.600	0.011	0.387
	Y	4084786.612	4084786.136	0.013	0.476
	Z	3763950.198	3763949.735	0.006	0.463
	기선길이	2725.693	2725.662	0.008	0.031
부여	X	-3091319.833	-3091319.469	0.066	0.364
	Y	4115753.904	4115753.150	0.053	0.754
	Z	3753751.358	3753750.782	0.031	0.576
	기선길이	42137.154	42136.988	0.071	0.166
일죽	X	-3099683.679	-3099683.001	0.044	0.678
	Y	4041702.785	4041702.240	0.035	0.455
	Z	3826208.706	3826208.175	0.020	0.531
	기선길이	81094.974	81095.025	0.022	0.051
보현산	X	-3243270.716	-3243270.475	0.019	0.241
	Y	4008395.568	4008395.073	0.018	0.495
	Z	3743651.823	3743651.421	0.009	0.402
	기선길이	146620.620	146620.732	0.022	0.112

관측장소에서 이용한 수신기는 Trimble 4000 SSE 또는 SST이며, 관측시간은 대략 20분에서 40분 정도이며, 관측위성은 최소 5개 이상이다. 위의 초기값을 가지고 그림 2의 흐름을 바탕으로 위의 네 지점에서 관측한 자료를 토대로 자료처리를 하였다. 또한 비교를 위해 Trimble사의 자료처리 S/W인 GPSurvey 프로그램에서 계산한 결과와 상호 비교하였다. 그 결과를 표 2에 나타내었는데, 이 연구에서 계산한 결과와 GPSurvey로 계산한 각 지점의 X, Y, Z 편차량이 50cm 내외에서 서로 일치하는 것을 알 수 있다. 특히 기선거리는 약 10cm내외에서 잘 일치하였다.

4. 결론 및 토의

이 연구를 통해 GPS 위성으로부터 송신되는 L1(1575.42MHz) 반송파 위상자료를 이용하여 이중 차분 방식을 통해 상대 기선벡터를 계산할 수 있는 소프트웨어를 개발하였다. GPS 위성에서 송신되는 반송파 위상자료의 생성과정, 그리고 대기를 통과하며 생기는 전달지연등을 고려하여 자료를 처리하는 과정을 구체적으로 분석하여 단일 주파수인 L1 반송파 위상의 자료처리 S/W를 개발하였다. 자료처리를 위해 국제 공용 GPS 관측망의 핵심 관측소 중의 하나인 대전의 KAO(N36.37도, E127.37도, H77.61m)의 좌표를 고정시킨 후, 이로부터 기선거리 약 2.7km, 42.1km, 81.1km, 146.6km에서 관측

한 GPS 자료를 이 연구에서 개발한 소프트웨어로 처리하여 각각의 장소에서 상대 기선벡터를 결정하였다. 검증을 위해 Trimble의 자료처리 소프트웨어인 GPSurvey프로그램에서 L1/L2 ION Free 기법으로 계산한 결과와 상호 비교하였다. 그 결과 기선벡터에서는 모두 50cm내외의 편차를 나타내고 있음을 알 수 있었고 기선거리는 10cm내외에서 잘 일치하고 있었다. 따라서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

우선 코드자료를 이용하는 DGPS 방법의 측량시 측위정밀도가 최소 50cm~1m 임을 감안하면, 이 연구에서 수행한 바와 같이 GPS의 반송파 위상자료를 이용하여 기선벡터를 결정하는 경우 DGPS보다 정밀한 좌표값을 얻을 수 있었다. 또한 Cycle Slip이 없을 때에는 짧은 관측시간에서 효과적으로 기선벡터를 정밀하게 결정할 수 있었다. 그리고 반송파 L1만을 이용하여 자료처리할 경우 기선거리는 이온층의 총전자수(TEC)가 10TECU (TEC Units)인 경우 Mask각이 20°에서 km당 0.8mm가 감소된다는 점을 감안하여 보면 기선길이가 길어질수록 이온층에 의한 전달지연이 중요한 오차요인으로 작용한다는 것을 알 수 있었다. 박필호 등(1996)에 의하면 방송력의 궤도오차가 대략 3m인 경우 기선측정시 기선길이 10~100km에서 약 0.1~1cm의 오차가 발생한다. 그러므로 기선길이가 커지면 오차량도 증가하므로 이 경우 정밀궤도력을 이용해야 한다고 판단되며, 기선길이가 짧은 경우 수신기의 noise나 관측소의 좌표에 미치는 조석현상 등에서 생기는 오차가 크게 작용되었다고 판단되었다.

이 연구에서는 단일 주파수만을 이용하였는데, 앞으로 이중주파수를 이용하여 선형조합을 통해 이온층은 물론 기하학적인 요소를 없애는 선형조합방법, 코드자료와 반송파 위상자료의 선형조합방법, Wide-Lane 및 Narrow-Lane 등 여러 가지 방법을 연구해야 할 것이다.

참고문헌

- 박필호, 박종욱, 신종섭, 김기봉, 조정호 1995, GPS 수신기의 자료처리 S/W 개발 (III)에 관한 연구 (정보통신부: 서울)
- 박필호, 박종욱, 조정호 1996, 한국측지학회지, 14, 199
- Beutler, G., Brockmann, E., Fankhause, S., Gurtner, W., Johnson, J., Mervart, L., Rothacher, M., Schaer, S., Springer, T. & Weber, R. 1996, Documentation of Bernese GPS Software Version 4.0, eds. M. Rothacher & L. Mervart, private communication
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H. & Collins, J. 1992, Global Positioning System : Theory and Practice (Springer-Verlag: New York)
- Remondi, B. W. 1984, Doctoral Dissertation, University of Texas at Austin
- Remondi, B. W. 1986, Navigation, 3, 194