

GPS 위성의 위상신호를 이용한 이온층의 전자수 파악

박성원, 최규홍¹, 박필호²

¹연세대학교 천문우주학과

²한국표준과학연구원 천문대

DETERMINATION OF TEC IN THE IONOSPHERE BY USING THE GPS PHASE SIGNAL

Seong-Weon Park, Kyu-Hong Choi¹, Pil-Ho Park²

¹Dept. of Astronomy and Space Science, Yonsei University, Seoul 120-749

E-mail: swpark@galaxy.yonsei.ac.kr, khchoi@galaxy.yonsei.ac.kr

²Korea Astronomy Observatory, Taejon 305-348, Korea

E-mail: phpark@hanul.issa.re.kr

(Received March 31, 1999; Accepted May 15, 1999)

요 약

GPS를 이용하여 위치를 결정할 때, 정밀도를 높이기 위하여 이온층의 영향은 반드시 고려되어야 한다. 따라서, GPS 위성으로부터의 신호를 이용하여 이온층의 총전자수(TEC : Total Electron Contents)를 파악하는 시도가 이루어져왔는데, 이러한 작업의 결과는 현재에 와서는 정밀도를 높이기 위한 수단으로서 뿐만 아니라 이온층의 연구를 위한 도구로 널리 활용되고 있다. 이번 연구에서는 한반도 주변에 위치한 8개 GPS 수신소의 자료를 처리하여, 한반도 상공에 대한 이온층의 총전자수를 지도의 형태로 나타내주는 TEC MAP을 얻어내었다.

ABSTRACT

To determine a geographical position by GPS signal, the effect of the ionosphere must be considered to improve accuracy. This has led us to continuously try to find the TEC of the ionosphere by using the GPS signal. So far the way to find TEC has been developed and the information obtained from this can be used not only to increase the accuracy of determining the position, but also to study the ionosphere. In this research, the TEC MAP over Korea was obtained by using the data collected from eight GPS stations around the Far East Asia, which is the common way to represent TEC over some regional or global region.

1. 서론

Global Positioning system이라는 이름에서도 알 수 있듯이 본래의 GPS 개발목적은 정확한 위치결정 system을 만들어 내고자 함이었다. 정확한 위치를 결정하기 위해 우리가 알아내어야 할 요소들은 여러 가지가 있겠지만 그 중에서도 이온층의 상태를 정확히 알아내는 것은 오차를 줄이기 위해 반드시 고려해야 할 것 중의 하나이다. 위성으로부터 지구로 도달되어지는 신호는 지구상공의 이온층을 통과하면서 굴절이 되어 직선이 아닌 경로를 통하여 도달한다. 정확한 위치결정을 위해서는 위성과 수신기와의 거리를 정확히 알아내는 것이 반드시 필요하게 되는데, 이온층의 굴절을 고려하지 않고 거리를 구하게 되면 코드자료를 이용할 경우 실제거리보다 더 길게, 위상신호를 이용할 경우 더 짧게 측정되게 한다. 이것은 위치결정에 있어서 오차의 원인이 되므로 정확한 위치결정을 위해서는 이온층의 전자수를 정확히 파악하는 일이 무척 중요하게 된다. GPS의 신호가 L_1, L_2 두 가지로 이루어진 이유가 바로 이온층으로 인한 전파의 지연 혹은 앞섬을 정확히 파악하여, 위치결정의 정확도를 높이기 위함이었다. 그러나, GPS 위치결정의 정확도를 높이기 위하여 수행되어진 이러한 작업은 단순히 오차의 보정을 위해서 뿐만 아니라, 이제는 독립적으로 이온층의 상태를 연구하기 위한 좋은 수단으로 사용되어지고 있다. 지금까지 이온층의 상태를 파악하기 위하여 사용되어진 방법은 로켓 또는 위성에 관측기를 실어서 이온층으로 올려보내어 관측하는 방법과 지상에서 전파를 수직으로 발사하여 반사파를 측정하는 방법 등이 주로 사용되어져 왔으나 최근에는 GPS 연구그룹에 의해서도 활발히 연구가 진행되고 있는 상황이다.

이번 연구에서는 GPS 위성으로부터의 위상신호를 이용하여 이온층의 총전자수를 파악하는 작업을 시도하였다. GPS의 신호를 이용하여 이온층의 전자수를 파악하는 방법은 크게 코드자료를 이용하는 방법과 위상신호를 이용하는 방법이 있다. 이번 연구에서는 두 가지 방법 중에서 더욱 정밀한 결과를 얻을 수 있는 위상신호를 이용한 방법으로 한반도 상공에 대해 이온층의 총전자수를 파악하여 TEC MAP을 구현하였다. TEC MAP이라는 것은 어떤 지역, 혹은 전지구 상공의 이온층의 전자수를 지도의 형태로 보여주는 방법으로서 현재 이온층의 총전자수를 표현하기 위해 보편적으로 사용되고 있는 방법이다.

2. 거리의 차와 이온층의 전자수

GPS 관측값들은 위성으로부터 수신기로 도달되어지는 신호와 수신기에서 만들어지는 신호의 위상차이를 이용한 위상의사거리 혹은 시간차이를 통하여 얻게되는 코드의사거리이다. 의사거리라함은 오차를 담고있는 거리를 의미하며 이번 연구에서 이용한 위상의사거리는 다음과 같다.

$$\Phi = \frac{1}{\lambda}\rho + \frac{c}{\lambda}\Delta\delta - \frac{\Delta I_{iono}}{\lambda} + \frac{\Delta T_{trop}}{\lambda} + N \quad (1)$$

식(1)에서, N 은 초기 모정수(initial ambiguity)이며, λ 는 신호의 파장 길이, ρ 는 위성과 수신기의 실제거

리, c 는 빛의 속도, $\Delta\delta$ 는 위성시계와 수신기시계의 차이 즉, $\delta^S - \delta_R$ 이며, Δ^{Iono} , Δ^{Trop} 는 각각 이온층과 대기층의 수증기가 의사거리에 주는 영향을 나타내는 항이다. 위상신호의 경우 이온층의 영향을 나타내는 부분은 음의 값을 갖게되어 실제 거리보다 관측거리를 단축시킨다.

이온층으로 인한 거리의 차이를 구하면 그것을 이용해 이온층의 전자수를 나타내는 TEC 값을 얻을 수 있다. TEC은 단위면적당의 총 전자수를 나타내는 값으로서 다음의 식으로 정의되어진다(Poularikas 1973).

$$TEC = \int N_e ds_0 \quad (2)$$

위 식에서, N_e 는 단위부피당의 전자수, ds_0 는 전파가 이동하는 기하학적인 경로를 의미하며, 1 TEC은 $10^{16} electrons/m^2$ 을 나타내고 TECU(TEC unit)으로 사용되어진다. Fermat의 원리에 따르면, 관측되는 거리 s 는

$$s = \int n ds \quad (3)$$

과 같이 나타내어진다. 적분은 전파가 이동하는 경로를 따라서 행하여지며, n 은 전파가 통과하는 매질의 굴절율을 나타낸다. 위성과 수신기사이의 기하학적인 직선 거리를 s_0 라고 하면, 이 값은 굴절이 전혀 생기지 않는 진공을 이동했을 때의 거리가 될 것이므로 다음과 같이 나타내어질 수 있다.

$$s_0 = \int ds_0 \quad (4)$$

한편 관측되어진 거리와 기하학적인 거리의 차이는 이온층 굴절(ionospheric refraction)이라고 하며 아래와 같이 나타내어진다.

$$\Delta^{Iono} = \int n ds - \int ds_0 \quad (5)$$

위의 식에서 n 은 굴절율을 나타내는데, Clynch *et al.* (1989)에 따르면 위상의 굴절율은 다음과 같이 근사되어질 수 있다.

$$n_{ph} = 1 + \frac{c_2}{f^2} \quad (6)$$

여기서, 계수 c_2 는 주파수에는 의존하지 않고, 전파 진행경로상의 전자밀도(전자수/ m^3)에만 의존하게되는 값으로서 Seeber(1993)에 의하면 $c_2 = -40.3N_e$ 의 관계가 있다. n_{ph} 를 식(5)에 대입해주고, 작업을 단순화하기 위하여 전파의 이동경로를 기하학적인 경로라고 가정하고 식(2)를 이용해 다시 써주면(Leick 1990)

$$\Delta_{ph}^{Iono} = \frac{-40.3}{f^2} TEC \quad (7)$$

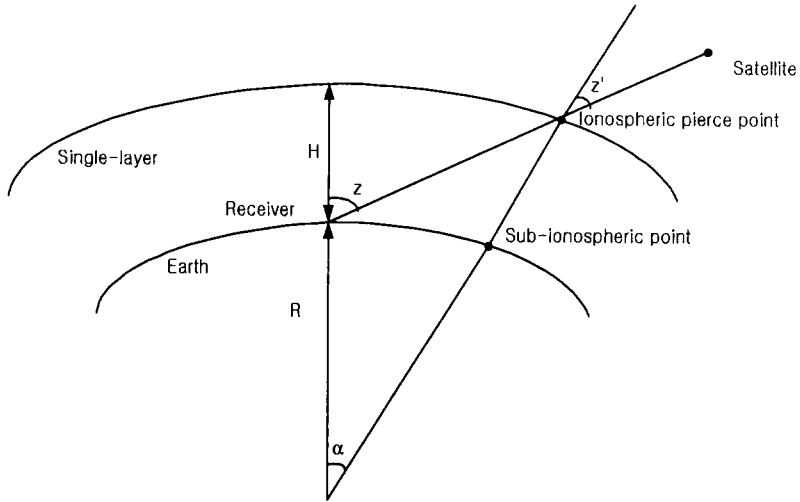


그림 1. 단일층 모델의 기하학적인 모형.

이 된다. 위의 식(7)에서 알 수 있듯이 이온층으로 인하여 발생하는 기하학적인 거리의 차이는 신호가 통과하는 이온층의 총전자수와 연관성을 갖게된다. 식(9)에서 알 수 있듯이 Δ_{ph}^{iono} 는 주파수에 의존하는 값인데 이 사실을 이용하여 TEC 값을 쉽게 구할 수 있다. 위상신호 L_1 과 L_2 를 이용하여 구한 위성과 수신기 사이의 거리는 다음과 같이 표현되어질 수 있다.

$$R_{ph}(L_1) = R_{0ph} + \Delta_{ph}^{iono}(L_1) \tag{8}$$

$$R_{ph}(L_2) = R_{0ph} + \Delta_{ph}^{iono}(L_2) \tag{9}$$

식(8)과 식(9)에서 L_1 과 L_2 에 의하여 측정되어진 두 거리의 차이는 이온층에 의한 효과뿐이어서 두 식의 R_{0ph} 는 같은 값을 나타내므로, 두 식을 서로 빼주고 TEC에 대해 정리하면

$$TEC = \frac{\Delta R_{ph}}{40.3 \left(\frac{1}{f_{L_2}^2} - \frac{1}{f_{L_1}^2} \right)} \tag{10}$$

이 된다. 이 식을 이용하여 각각의 관측값 마다의 TEC 값을 구할 수 있는데, Bishop(1997)에 의하면 2 TEC 1 ns 정도의 전파지연을 일으키게 된다.

3. 이온층의 모델링

GPS 위성의 신호를 이용하여 이온층의 전자수를 파악하기 위해서는 모든 자유전자가 무한히 얇은 두께의 평면상에 존재한다고 가정하며 이를 단일층(Single-layer) 모델이라고 한다(그림1 참조). 이온층이라고 가정된 얇은 껍질(shell)의 지상으로부터의 높이 H 는 모델에 따라 달라지는데 Gervaise *et al.*(1985)은 300km, Wild *et al.*(1989)은 350km, 그리고 Finn & Matthewmann(1989)은 400km를 사용하며, 보통 300-400km 사이의 값이 일반적이다. 그러나 이 값들은 고도각이 낮은 경우에만 중요해지며, 그 외에는 큰 차이가 없는 것으로 알려져 있다(Hofmann-Wellenhof *et al.* 1992). 이 모델에서는 위성으로부터의 신호가 이온층이 존재하는 평면과의 교차되는 지점 즉, IP(ionospheric pierce point)의 TEC 값을 식(10)을 이용하여 구한다. 한편, 이온층의 TEC 값을 구하기 위해 사용되어지는 자료의 조합은 기하학적으로 영향을 받지 않는(geometry free) L_4 조합으로서(Beutler *et al.* 1996) L_4 조합의 의사거리는 식(10)를 담고 있다.

GPS는 사용자가 어떤 시간, 지구상의 어떤 지역에 위치하더라도 적어도 4 개 이상의 GPS 위성을 관측할 수 있도록 설계되었으므로 수신기가 수신할 때는 적어도 한번 수신에 4개 이상의 위성으로부터 신호를 얻을 수 있고, 이 신호들이 단일층과 교차되는 지점에 대한 TEC 값을 식(10)에 의해 얻게 된다. 관측값을 통하여 얻는 TEC 값들은 단일층 상의 개개의 점들이므로 TEC MAP을 구현하기 위해서는 관측값을 근거로 하여 우리가 원하는 지역의 TEC 값을 얻게 해주는 함수가 필요하게 되는데, 이러한 함수는 Schaer *et al.* 1996이 제시한 구형조화 급수(Spherical Harmonics)를 이용하였다. 구형조화급수는 E 는 식(11)과 같으며, 단일층 모델을 이용하여 얻은 개개의 관측값들을 근거로 삼아 최소자승법을 이용하여 함수의 계수를 결정하였다.

$$E(\beta, s) = \sum_{n=0}^{n_{max}} \sum_{m=0}^n \bar{P}_{nm}(\sin\beta)(a_{nm}\cos ms + b_{nm}\sin ms) \quad (11)$$

위 식에서, n_{max} 는 급수의 최고차수, β 는 지구중심좌표계의 위도, s 는 태양고정좌표계의 경도, \bar{P}_{nm} 은 normalized associated Legendre 함수, a_{nm} , b_{nm} 은 각각 추정되어지는 계수이다. 이번 연구에서 작업한 자료들은 전 세계에 분포되어있는 190여 개의 수신소 중에서 표1에 나와있는 한반도 주변의 8개의 수신소에서 수집한 것들이다. 구형조화급수를 사용할 때는 대상이 되는 지역의 크기에 따라 사용되어지는 수신소의 수가 달라지며 사용되어지는 수신소의 수에 따라 식(11)의 차수가 달라지게 되는데, 이번 8개의 수신소를 이용하는 작업에서는 n_{max} 는 3, 그리고 m_{max} 는 1을 이용하였다.

4. 결 과

이번 연구에서 사용한 자료는 1998년 5월 10일 하루치의 자료이며, 이를 두 시간 단위로 나누어 12번의 작업을 2차 차분 방법으로 처리 하였고, 단일층의 높이는 450km를 사용하였으며, 이번 작업결과 타당성을 검증하기 위하여 CODE(Center For Orbit Determination in Europe)에서 전지구 상공에 대한

표 1. 이번 연구에서 사용되어진 수신소.

수신소명칭	위치(도시)	위치(국가)	위도(도)	경도(도)	높이(m)	운용기관
guam	Dededo	Guam	13.6	144.9	202.9	NASA/JPL
irkt	Irkutsk	Russia	52.2	104.3	503.4	DUT
shao	Sheshan	China	31.1	121.2	23.1	CAS-JPL
suwn	Suwon-shi	Korea	37.3	127.1	83.9	NGI
taej	Taejon	Korea	36.4	127.4	78.5	KAO
tskb	Tsukuba	Japan	36.1	140.1	68.3	GSJ
usud	Usuda	Japan	36.1	138.4	1509.6	NASA/JPL
wuhn	Wuhan	China	30.5	114.4	26.8	NOAA-JPL

여 만들어낸 결과 중 한반도 상공의 자료만을 취하여 비교하였다. CODE의 자료는 <ftp://ubecu.unibe.ch> site에서 다운로드 받았으며, CODE 자료와 이번 결과값 사이의 표준편차는 표2와 같고 두 결과의 그림상의 비교는 그림2와 같다.

그림2는 이번 연구의 결과 중 UT 8-16시 동안의 TEC MAP을 나타내는 것인데, 1.5 TEC 단위로 색을 구분하여 할당하였다. 좌측의 그림들이 CODE의 결과이고 우측의 그림들이 이번 연구의 결과이다. 두 그림 상에서 TEC 값들은 불과 2-3TEC 안에서 잘 일치하는 것을 볼 수가 있으며, 위도가 낮아질수록 TEC 값이 커지는 것을 볼 수 있다. 위도가 낮아질수록 TEC 값이 커지는 이유는 TEC 값이 태양의 고도각과 밀접한 관계가 있으므로 태양의 고도각이 높을수록 값이 커지게 되는데 우리나라의 지리적 위치상 위도가 낮아질수록 고도가 높아지므로 값이 커지는 것을 예상할 수 있는데 결과는 이와 잘 일치한다.

표 2. 1998년 5월 10일의 CODE 결과와 이번 결과의 표준편차.

시간(UT)	표준편차(in TECU)
0 시 - 2 시	1.355
2 시 - 4 시	3.836
4 시 - 6 시	2.960
6 시 - 8 시	3.178
8 시 - 10 시	3.040
10 시 - 12 시	1.603
12 시 - 14 시	2.109
14 시 - 16 시	2.548
16 시 - 18 시	2.158
18 시 - 20 시	2.838
20 시 - 22 시	2.726
22 시 - 24 시	1.871

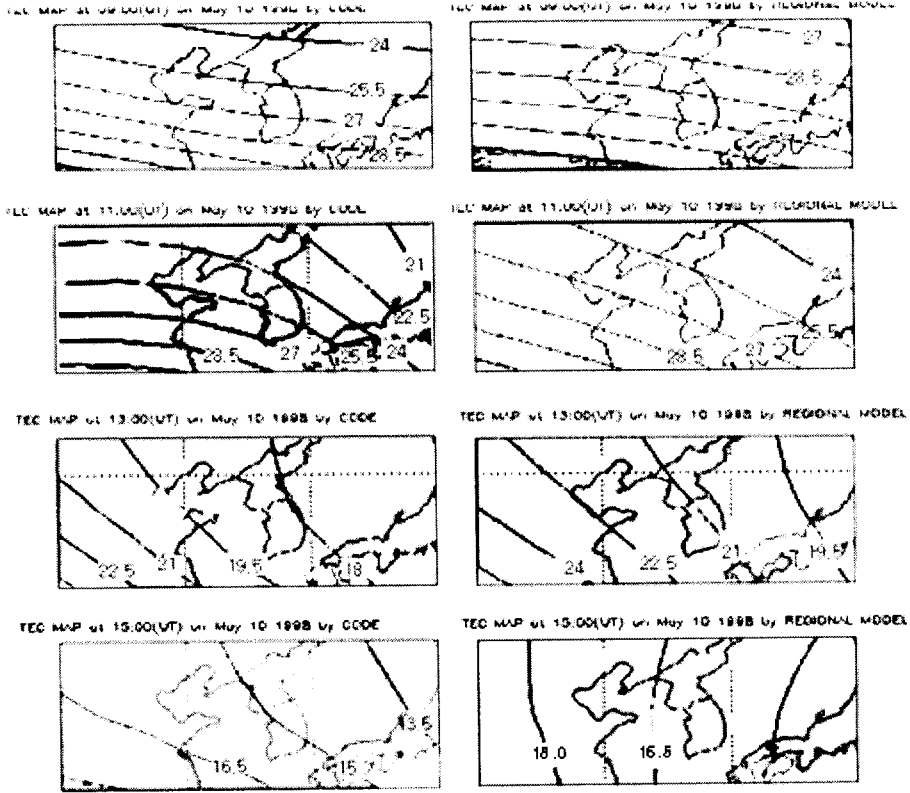


그림 2. 1998년 5월 10일 하루의 GPS 자료를 두 시간 단위로 나누어 구현한 TEC MAP들 중 UT 8시부터 16시까지의 것들.

그림2의 결과는 UT 8-16시 동안의 결과인데, 이 시각은 한국 시간으로 대략 오후 5시에서 새벽1시 정도이다. 그림2에서 우측지역은 좌측지역보다 시간상으로 미래의 시간인데, 태양이 지고 있는 상황이므로 우측지역의 태양 고도각이 좌측지역보다 낮게 된다. 따라서 그림2의 등전자수를 나타내는 직선의 기울기가 음의 값을 갖는 점을 예상할 수 있는데 결과는 이와 일치한다.

5. 결 론

이번 연구에서는 GPS 위성으로부터 지구로 도달되어지는 위상신호가 이온층을 통과하며 경험하게 되는 굴절 현상을 이용하여 이온층의 전자수를 파악하여 한반도 상공의 TEC MAP을 구현하였다. 작업한 결과를 CODE의 결과와 비교한 결과, 잘 일치하였고 따라서 국내에서도 GPS 위상신호를 이용하

여 이온층의 전자수를 파악하고 TEC MAP을 구현하는 기술을 확보하였다고 결론지을 수 있겠다. 이번 연구를 통하여 습득한 기술은 앞으로 한반도 전역에 대한 이온층의 감시 및 예보를 위한 시스템 구축에 널리 활용되리라 여겨진다.

참 고 문 헌

- Beutler, G., Brockmann, E., Fankhauser, S., Gurtner, W., Johnson, J., Mervart, L., Routhacher, M., Schaer, S., Springer, T. & Weber, R., 1996, Bernese GPS Software Version 4.0 ed. Markus Rothacher & Leo Mervart, p.175, p.179
- Bishop, G. J., Coco, D. S., Lunt, N., Coker, C., Mazzella, A. J. & Kersley, L., 1997, Proceedings of ION GPS, p.207
- Clynch, J. R., Coco, D. S. & Coker, C., 1989, Proceedings of ION GPS, pp.445-450
- Finn, A. & Matthewman, J., 1989, Proceedings of Fifth International Geodetic Symposium on Satellite Positioning, vol 2, pp.737-756
- Gervaise A., Mayoud, M., Beutler, G. & Gurtner, W., 1985, Proceeding of Joint Meeting of FIG Study Groups 5B and 5C, vol 20-2, pp.337-358
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H. & Collins, J., 1992, Global Positioning System(Springer-Verlag Wien New York), p.90, p.104, pp.212-227
- Leick, A., 1990, GPS Satellite Surveying(John Willey & Sons : New York)
- Poularikas, 1973, IEEE. Trans. Aerospace and Electronics System, AES-2, 104
- Schaer, S., Beutler, G., Rothacher, M. & Springer, T. A., 1996, Daily Global Ionosphere Maps Based on GPS Carrier Phase Data Routinely Produced Produced by the CODE Analysis Center, presented at the IGS Analysis Center Workshop, NOAA, Silver Spring, MD, USA, March 19-21, 1996
- Seeber, G. 1993, Satellite geodesy: foundations, methods, and applications Walter de Gruyter: Berlin New York
- Wild, U., Beutler, G., Gurtner, W. & Rothacher, M., 1989, Proceedings of Fifth International Geodetic Symposium on Satellite Positioning, vol 2, pp.724-736