

지구 대기와 광시간 효과를 고려한 인공위성 추적자료의 보정 S/W 개발

김경희 · 김천휘
충북대학교 천문우주학과

김성규
한국항공우주연구소 무궁화 위성 그룹

CORRECTION OF THE TRACKING DATA OF AN ARTIFICIAL SATELLITE CONSIDERING THE EARTH ATMOSPHERE AND LIGHT TIME EFFECTS

K. H. Kim and C. H. Kim

Department of Astronomy and Space Science, Chungbuk National University

S. K. Kim

KOREASAT Group, Korea Aerospace Research Institute

(Received April 30, 1995; Accepted May 9, 1995)

요 약

인공위성의 추적자료 (시선거리, 시선거리변화율, 방위각, 고도)에 영향을 줄 수 있는 여러 가지 요인들을 모델링하여 궤도 추적 자료를 추적 안테나에서 받은 실제 자료와 가능한 거의 같게 이론적으로 생성하는 S/W를 개발하였다. 개발한 S/W를 이용하여 광시간 효과와 지구 대기에 의한 추적자료의 지연량을 산출하였다. 대기에 의한 추적자료 지연량들의 변화를 살펴본 결과, 대류층에 의한 지연량은 온도, 상대습도, 압력이 클수록 증가하고, 이온층에 의한 지연량은 최대전자밀도와 주파수에 따라 차이가 나는데, 최대전자 밀도가 증가할수록 지연량은 점점 증가하고, 주파수가 증가할수록 지연량이 감소함을 알 수 있었다. 또한, 광시간 효과에 의한 추적자료의 지연량은 위성의 고도가 낮을수록 빠른 궤도운동으로 지연량이 커짐을 알 수 있다.

ABSTRACT

We developed a S/W system to simulate the orbit tracking data as nearly equal as the real data obtained at the tracking antenna by modeling various causes

that could have effects on the tracking data (range, range rate, azimuth, elevation) of an artificial satellite. Using the S/W developed we produced delay values of tracking data due to the light-time effect and the terrestrial atmosphere. According to the simulation results due to the Earth atmosphere, the values delayed by the troposphere were increased as the temperature, relative humidity, and pressure of the troposphere are more larger. However, delay values due to the ionosphere were dependent on both the maximum electron density and the frequencies used. They are more and more increased as the maximum electron density and frequency are more larger. And the delaying values by the light-time effect are more larger by the fast orbital motion as the altitude of an artificial satellite is more lower.

1. 서 론

인공위성 추적자료는 추적방식과 사용기기에 따라 다르지만 전파방식인 경우 보통 시선거리(range), 시선거리 변화율(range rate), 방위각(azimuth)과 고도(elevation, 또는 altitude)를 말한다. 추적자료는 인공위성의 예비궤도 (preliminary orbit)를 결정하기 위하여 그리고 인공위성의 궤도를 개선하는데 사용하므로 추적자료는 매우 정확하게 관측되거나 또는 이론적으로 계산되어야 한다.

이 연구는 인공위성의 궤도 추적자료를 추적안테나에서 받은 실제 자료와 가능한 거의 같은 이론적으로 생성하는 S/W를 개발하는데 그 목적이 있다. 추적자료를 이론적으로 계산할 때 여러가지 보정을 해야하는데 그 이유는 관측으로 얻은 추적자료는 지상추적소 안테나에서 위성까지 송수신한 전파로 구하기 때문에 지상안테나 내에 있는 전자장치와 위성탑재기기 (가령 트랜스폰더(transponder) 또는 비이콘(beacon)) 등에서 기계적인 전파 전달 지연과 지구주변환경, 즉, 대기에 의한 전파의 굴절현상과 전파속도 감소로 야기된 전파지연, 그리고 광시간(light-time)지연 등이 추적자료에 내재되어 있기 때문이다. 특별히 전파가 대기를 통과할 때 야기되는 전파지연과 굴절이 추적자료에 가장 많은 영향을 끼치는 것으로 알려져 있다.

인공위성의 추적자료에 영향을 주는 지구대기는 크게 대류층과 이온층으로 나눌 수 있다. 대류층은 중성원자들로 구성되어 있으므로 전파가 이 층을 통과할 때 주파수의 변동은 없고 열역학적인 특성에 의해 지연이 발생한다. 대류층 지연에 관련한 인수들은 주로 고도에 따라 변화하고 평균지수함수 굴절유폴은 중위도 모델 대기에 적합한 것으로 나타난다(CCIR 보고서 255-6). 대기의 또 하나의 구성성분인 이온층에서 지연의 원인은 이온층을 구성하고 있는 전자밀도분포에 의해 전파가 대기층을 통과할 때 야기되는 굴절현상 때문이다. Chapman (1931a, b) 등은 상층 대기에 대한 전자와 이온의 플라즈마 밀집도를 계산하였다.

지구대기와 광시간 효과가 추적자료에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 이 논문에서는 1) 대류층 대기 모델을 위하여 고도가 증가함에 따라 지수함수적으로 대류층 지연이 감소하는 지수함수

적 굴절윤곽 (Roda 1988, Cappellari *et al.* 1976, CCIR 보고서 255-6, 563-3, 563-4, 718-3)을 사용하였고, 2) 이온층에 대하여 Chapman 모델 (Budden 1955)을 수정한 모델 (Cappellari *et al.* 1976)을 이용하여 지구 대기에 의한 추적자료의 지연량을 각각 산출하였다. 그리고 3) 지상 추적소와 위성 간의 거리에 의해 야기되는 광시간 지연을 반복방법을 통하여 계산하여, 그 각각에 대한 결과들을 살펴보았다.

2. 추적자료의 보정모델

2.1 인공위성의 추적모델

Cappellari *et al.* (1976)에 의하면 이론적으로 추적자료를 산출하기 위한 추적모델은 다음과 같이 표현된다.

$$O_c = f_0[r_{it}(t + \delta t, \mathbf{p}, \mathbf{r}_s), (t + \delta t, \mathbf{p}, \mathbf{r}_s)] + b + RF_c \quad (1)$$

여기서, t 는 추적시간, δt 는 시간 bias, O_c 는 $t + \delta t$ 에서 계산한 보정된 추적자료, r_{it} 와 \dot{r}_{it} 는 $t + \delta t$ 에서의 위성의 위치와 속도, b 는 측정 bias, f_0 는 시간 $t + \delta t$ 에서 관측형태에 의해 정의한 기하학적 관계, RF_c 는 대기굴절, 광시간, 트랜스폰더 지연, 그리고 안테나 마운트 오차 등에 기인한 관측보정이다. 윗 식을 이용하여 추정할 수 있는 추적모델 변수들은 \mathbf{p} , \mathbf{r}_s , b , δt 인데 \mathbf{p} 는 운동 방정식에서 추정할 수 있는 역학변수들로, 위치와 속도, 중력조화계수, 저항인수들이며, \mathbf{r}_s 는 지구 고정좌표계에서 추적소 위치, b 는 측정 형태와 추적소에 의존하는 측정 bias, 그리고 δt 는 추적소와 경로(path)에 의존하는 시간측정 bias이다.

2.2 광시간 지연 보정모델

광시간 지연은 그림 1에 보인바와 같이 지상추적소에서 위성까지 전파가 송신될 때 그리고 지상추적소가 위성에서 오는 전파를 수신할 때 걸리는 거리에 의해 일어난다. 따라서 추적자료인 시선거리, 시선거리변화율, 방위각, 고도는 광시간 지연을 보정해야만 한다.

먼저 광시간을 보정하여 보다 정밀한 시선거리를 구하기 위해서는 관성좌표계로 표현한 위성의 위치벡터에서 지상추적소 위치벡터를 반복적으로 빼주어 광시간이 보정된 시선거리 $\rho(t_R)$ 를 구하는 반복방법을 이용할 수 있는데 이 방법은 다음과 같이 표현한다.

$$\rho(t_R) = \frac{1}{2} [|\mathbf{r}_v(t_v) - \mathbf{r}_T(t_T)| + |\mathbf{r}_v(t_v) - \mathbf{r}_R(t_R)|] \quad (2)$$

여기서, \mathbf{r}_v 는 위성 관성위치벡터, \mathbf{r}_T 는 송신장소의 관성위치벡터, \mathbf{r}_R 는 수신장소의 관성위치벡터, t_T 는 측정된 신호가 지상송신기를 떠날때의 시간, t_v 는 측정된 신호가 위성에서 수신하고 제

송신하는 시간으로 트랜스폰더 지연시간이 없는 순간적인 선회 (turnaround)를 가정한다. 위성의 전자적 지연에 의해 야기된 시선거리의 일정한 bias는 측정오차로 보정과정 후에 고려한다. 그리고 측정신호가 지상수신기에 도착한 시간(t_R)을 이론적으로 계산한 시선거리의 측정시간으로 사용한다. 그리고 가장 정확한 시선거리 변화율 예측값을 위한 모델링은 (3)식과 같이 측정 시간 간격의 시작과 끝에서 구한 시선거리 값을 평균하여 뺀 값으로 구한다.

$$\dot{\rho}(t_R) = \frac{[\rho_u(t_R) + \rho_d(t_R)] - [\rho_u(t_R - \Delta t_{RR}) + \rho_d(t_R - \Delta t_{RR})]}{2\Delta t_{RR}} \quad (3)$$

여기서, $\rho_u(t_R)$ 는 t_R 에서 위성 수신기에 도착한 신호의 uplink 전파경로, $\rho_d(t_R)$ 는 t_R 에서 추적소 안테나 수신기에 도착한 신호의 downlink 전파경로, 또 Δt_{RR} 는 도플러 측정 시간 간격이다. Uplink와 downlink의 시선거리 계산은 앞에서 설명한 시선거리 예측값을 계산할 때와 같은 방법으로 광시간 지연에 대해 반복방법으로 보정한다.

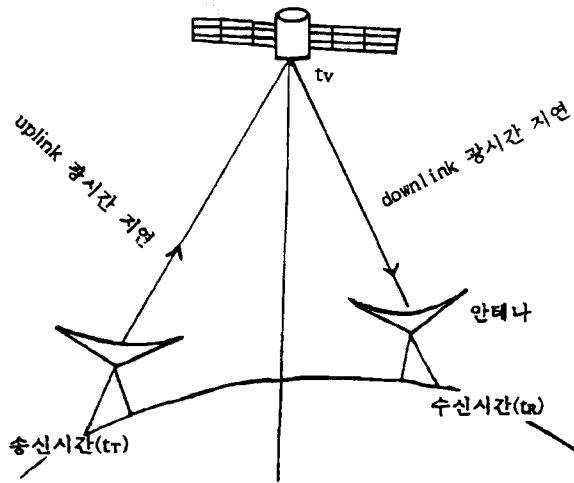


그림 1. 광시간 지연.

2.3 대기 지연 보정모델

전파는 진공이 아닌 지구대기를 통과하므로 대기의 영향이 전파속도 감소와 전파의 굴절을 야

기하여 실제의 추적자료와 다른 겹보기 추적자료를 측정하게 된다. 따라서 겹보기 추적자료와 실제의 추적자료 사이의 관계를 알기 위해서는 대기에 의한 전파속도 감소와 굴절에 의한 전파지연의 과정을 파악해야 한다. 전파지연에 관한 모델을 통하여 계산된 전파지연량을 대기에 의한 보정량이라고 하면, 그 보정량은 두 추적자료와 다음과 같은 관계가 있다. 즉,

$$\text{겹보기 추적자료} = \text{실제 추적자료} + \text{대기에 의한 보정량}$$

이다. 대기에 의한 보정이 필요한 추적자료는 고도, 시선거리, 시선거리 변화율이다.

대류층은 지구표면에서 약 30km까지 뻗어있다. 위성을 추적하는 단파 주파수에 대해서, 대류층은 비분산 매질이다. 즉, 굴절지수 n 은 매질을 통과하는 송신주파수와 무관하다. 또한 대류층은 등온으로 이루어져 있지 않고 대기의 수증기 상태는 이상기체와는 매우 다르다. 따라서 건조공기층과 습윤공기층으로 분류하여 대류층의 굴절도를 표현하는 것이 실용적이다 (Takahashi 1970, Berrada *et al.* 1988). 수직높이에 따른 온도와 압력 자료를 쉽게 얻을 수 없으므로 지표면의 굴절도 N_s 를 계산하기 위해 지표면 자료가 이용되며 높이에 따라서 굴절도가 지수 함수적으로 감소한다고 가정하면, 대류층 굴절도 N_T 은 Cappellari *et al.* (1976)에 의하면

$$N_T = N_s e^{-(h-h_s)/H_T} \quad (4)$$

이다. 여기서, h_s 와 h 는 각각 추적소와 위성의 수직높이, N_s 는 추적소의 굴절도, 그리고 H_T 는 대류층의 높이 척도(scale height)이다.

대류층 위에 전리층이라 불리는 또 다른 대기가 있는데, 이온화된 입자들로 구성되어 있으며 약 80km에서 1000km이상까지 뻗쳐 있다. 전리층은 분산 매질인데, 이 층의 굴절을 n 은 1이하이며 전리층의 수직높이 (z)에 따른 굴절도 N_I 는 수정된 Chapman의 전자밀도 율곡식에 의하면 다음과 같이 표현할 수 있다. 즉,

$$N_I = \frac{40.3N_m}{\nu^2} e^{(1-z-e^{-z})} \quad (5)$$

위에 설명한 굴절 보정 공식들은 구형 대칭 대기를 가정한다. 대류층에 의한 추적자료의 지연 보정은 (4)식을 활용하고 이온층에 의한 추적자료의 지연 보정은 수정된 Chapman 전자밀도 율곡에 관한 (5)식을 사용하였다.

3. 보정모델의 모의실험과 결과

제2장에서 설명한 추적자료의 보정모델 중에서 지구대기와 광시간 효과를 고려하여 이 논문에서 작성한 컴퓨터 프로그램으로 추적자료를 모의실험 하였다. 모의실험에 사용한 위성은, 95년에 발사될 정지위성인 무궁화 방송통신위성과 중고도 위성인 NOAA 기상 위성이다. 이 두 위성의 각각의 궤도자료는 표 1, 표 2와 같다.

표 1. 무궁화 위성의 가상적인 정지 궤도 자료 (김천휘 등 1988).

궤도 요소		위치와 속도벡터(km, km/sec)	
궤도요소명	값	성분	값
장반경	42164.550 km	x	23287.491826
이심율	0.0001371	y	35157.061933
경사각	0.1도	z	-33.605235
승교점 경도	81.91047도	\dot{x}	-2.56301086
근지점 이각	143.31170도	\dot{y}	1.69760426
평균근점 이각	191.26100도	\dot{z}	0.00484573

(1989년 6월 4일 3시 35분 40초)

표 2. NOAA 위성의 궤도 자료 (김천휘 등 1988).

위치와 속도벡터(km, km/sec)	
성분	값
x	23287.491826
y	35157.061933
z	-33.605235
\dot{x}	-2.56301086
\dot{y}	1.69760426
\dot{z}	0.00484573

(1989년 6월 25일 0시 3분 56.756초)

3.1 광시간 지연 보정 모의실험

그림 2는 무궁화 위성의 광시간에 의한 시선거리의 지연값의 약 1달간의 변화를 나타낸 것으로 그림에서와 같이 정지위성인 경우는 광시간 지연에 의한 시선거리의 변화량은 약 $\pm 1.5m$ 정도로 작음을 알 수 있다. 정지위성 궤도에서 $\pm 1.5m$ 의 변화는 각거리로 환산하면 대단히 작은 값이므로 무궁화 위성인 경우 광시간에 의한 시선거리의 변화량은 고려하지 않아도 무방할 것이다. 그러나 조직적인 오차를 없애기 위해서는 광시간 지연을 보정하여 추적자료를 계산하여야 한다. 그림 3은 지상추적소에서 볼 때 NOAA 기상 위성이 뜨고 지는 약 8분간동안 이 위성의 광시간 지연량의 변화를 나타낸 것으로 정지위성인 무궁화 위성의 광시간 지연값이 수 미터 정도로 작은 반면에 중고도 위성인 NOAA 위성은 광시간 지연값이 약 $\pm 30m$ 이상으로 나타난다. 그림 3에 나타난 변화는 NOAA 위성이 중고도 태양 동주기 극궤도 위성이기 때문에 지구 자전 속도보다 빨리 움직이고 이심률과 섭동력에 기인하여 궤도운동을 하기 때문에 정지위성보다 변화가 크게 나타난 것으로 생각된다.

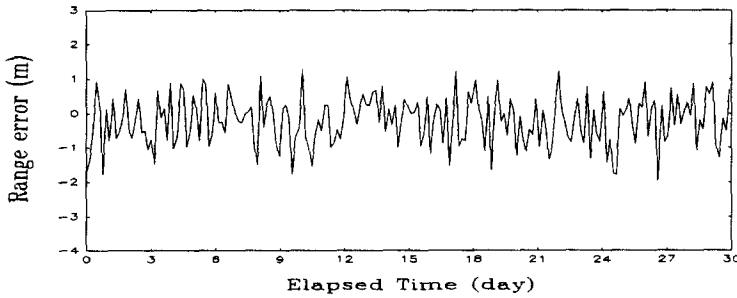


그림 2. 무궁화 위성의 시선거리에 대한 광시간 보정.

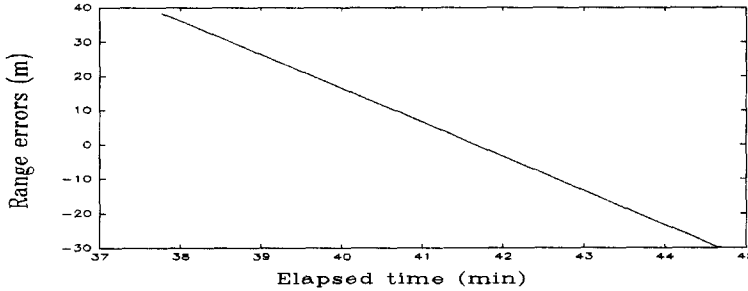


그림 3. NOAA 기상 위성의 광시간 보정값.

3.2 대기 지연 보정 모의실험

지구 대기에 의한 무궁화 위성의 추적자료 지연을 모의실험한 결과는 그림 4와 같다. 이때 사용한 송신 주파수는 보통 위성을 추적하는데 사용하는 VHF band인 136MHz로 가정하였다. 그림 4a는 무궁화 위성이 위치한 고도 (약44도)에서의 대기에 의한 시선거리 지연량의 변화를 보인 것으로 평균 약 570m 정도의 시선거리의 지연이 발생한다. 그림4b는 무궁화 위성의 고도에 대한 대기 지연 변화량으로 그 평균 지연량은 약 0.024도이다. 그림 4c는 무궁화 위성의 시선거리 변화율에 대한 대기 지연 보정량이다. 그림에서 보는 것과 같이 시선거리 변화율의 지연량은 약 16cm/s으로 무궁화 위성같이 고고도 정지위성인 경우 대기에 의한 지연량은 비교적 적다는 것을 알 수 있다.

그림 5는 NOAA 위성의 대기에 의한 추적자료의 지연량을 모의실험한 결과들로서 그림 5a, 5b, 그리고 5c는 각각 NOAA 위성의 대기에 의한 시선거리, 고도 그리고 시선거리 변화율의 지연량 들이다. 그림에서 보듯이 무궁화 위성과 같이 정지위성인 경우에 비하여 그 변화가 매우 심한 것을 알 수 있다. 또한, 시선거리 변화율의 지연값은 고도가 가장 낮아지는 때 (약 41분과 42분 사이) 거의 0에 가까움을 알 수 있다.

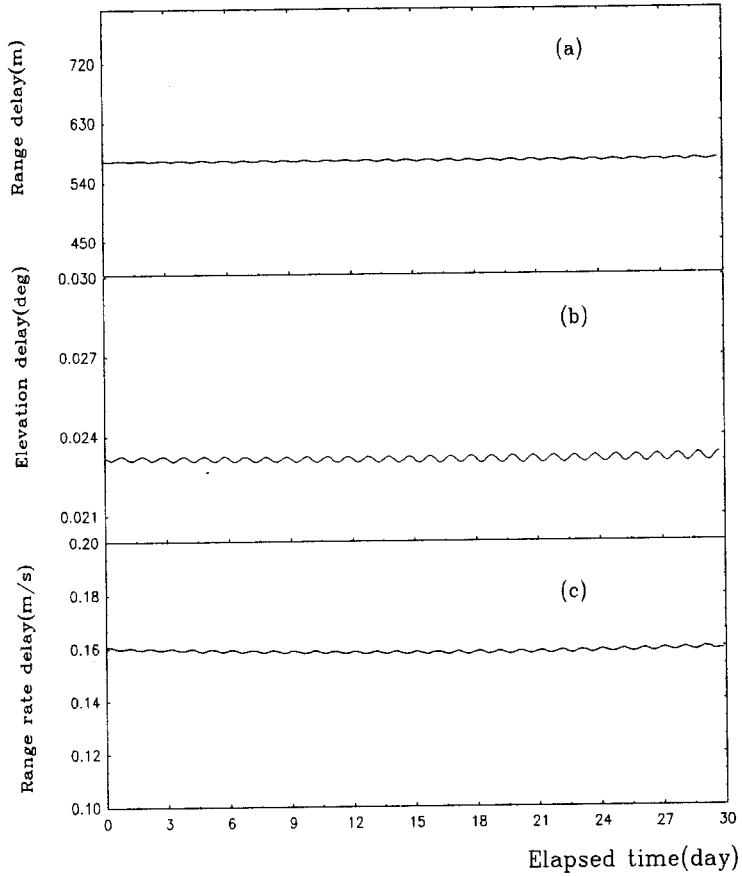


그림 4. 지구 대기에 의한 무궁화 위성의 추적자료 지연.

4. 결론 및 토의

인공위성의 추적자료 (시선거리, 시선거리 변화율, 방위각, 고도)에 광시간 효과와 대기가 끼치는 영향을 모델화하여 추적자료를 이론적으로 생성하는 S/W를 개발하였다. 이 보정 S/W 시스템을 고고도 위성인 무궁화 통신위성과 중고도 위성인 NOAA 기상위성에 적용하였으며 광시간과 대기에 의한 추적자료의 지연량을 모의실험하였다. 표 3은 시선거리에 대한 모의실험 결과를 나타낸 것이다. 이 표에서 알 수 있듯이 정지위성인 무궁화 위성의 광시간 지연은 그 값이 수 m정도여서 고려하지 않아도 무방할 것이다. 그러나 조직적인 오차를 없애기 위해서는 광시간 지

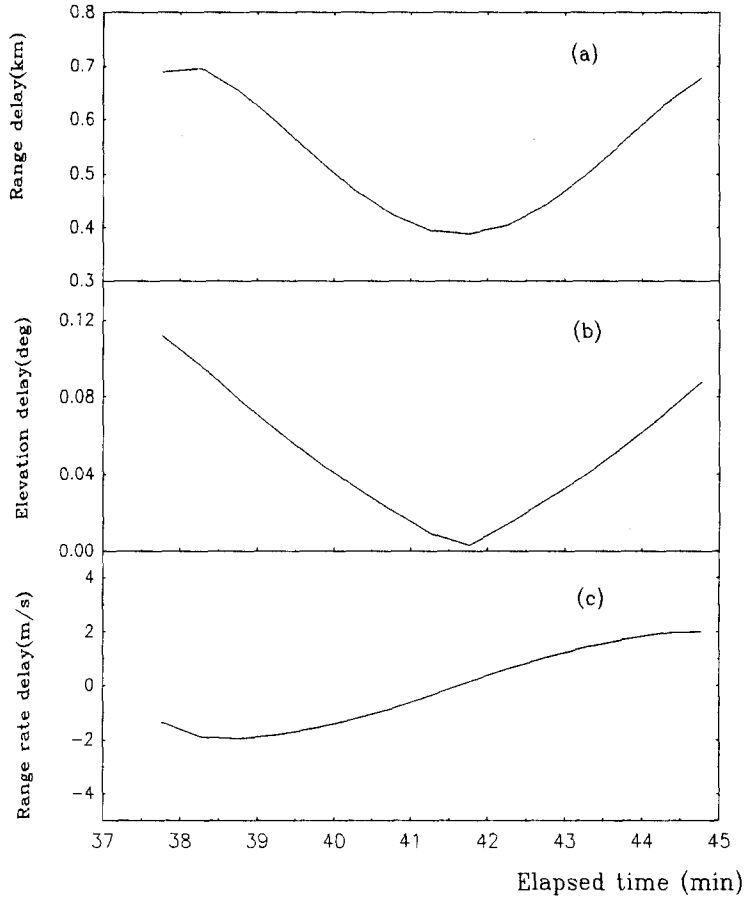


그림 5. 지구 대기에 의한 NOAA 위성의 추적자료의 지연.

연을 보정해야한다. 그리고 중고도 위성인 NOAA 위성의 경우 지연값은 변화폭이 심한데 이는 위성이 지구 자전 속도보다 빠르게 궤도운동을 하기 때문이다. 따라서 위성의 고도가 낮을 수록 빠른 궤도운동으로 광시간 지연값이 커짐을 알 수 있다. 대기에 의한 지연량은 표 3에서 보듯이 무궁화 위성인 경우 약 600m 정도이며, NOAA 위성은 400~700m로, 무시할 수 없는 양임을 모의실험을 통하여 알 수 있었다.

이 논문에서 개발한 지구대기와 광시간 효과를 고려한 인공위성의 추적자료 보정 S/W 시스템에 안테나 마운트 보정과 트랜스폰더 지연 보정 모델을 더 포함한다면 더 정확하게 추적자료를 이론적으로 산출할 수 있는 S/W 시스템이 구성될 수 있을 것이다. 이러한 S/W 시스템으로 예측

표 3. 광시간과 대기에 의한 시선거리의 지연값.

지연 요인	무궁화 위성(m)	NOAA위성(m)
광 시간	-2~1	-30~40
대 기	~ 570	390~690

주파수 : 136MHz

한 추적자료와 실제 관측한 추적자료를 비교 분석함으로써 인공위성의 임무 해석을 위한 궤도 결정과 궤도 개선에 유용하게 쓰여질 수 있을 것이다.

감사의 글: 이 연구는 한국항공우주연구소 지원을 받아 진행되었음을 밝혀 둡니다. 이에 저자들 (KHK and CHK)은 심심한 사의를 표합니다.

참고문헌

- 김천휘, 최규홍, 안영숙, 신종섭, 박필호, 이병선, 박상영, 홍일희, 박재우, 이정숙, 최윤정 1988, 인공위성 궤도의 추적과 예보의 기술 개발에 관한 연구 III (과학기술처 특정연구보고서 N8713)
- CCIR 보고서 255-6 (전파연구소)
- CCIR 보고서 563-3 (전파연구소)
- CCIR 보고서 563-4 (전파연구소)
- CCIR 보고서 718-3 (전파연구소)
- Berrada, B. H., Gole, P. & Lavergnat, J. 1988, Radio Sci., 23(6), 1023
- Budden, K. G. 1955, Proc. R. Soc. Lond., 227, 516
- Cappellari, J. O., Velez, C. E. & Fuchs, A. J. 1976, Mathematical Theory of Goddard Trajectory Determination System (Goddard Space Flight Center: Maryland)
- Chapman, S. 1931a, Proc. R. Soc. Lond., 43, 26
- Chapman, S. 1931b, Proc. R. Soc. Lond., 43, 483
- Roda, G. 1988, Troposcatter Radio Links (Artech House: London)
- Takahashi, K. 1970, IEEE., Trans. Aerospace & Electronic System, AEs-6, 770