

LAGEOS II 위성의 LASER 관측자료를 이용한 정밀거리 결정

김광열 · 김형규 · 장홍술 · 손건호 · 최규홍
연세대학교 천문대기과학과

PRECISE RANGE DETERMINATION USING LASER RANGING DATA OF LAGEOS II

Kwang-Ryul Kim, Hyung-Gyu Kim, Hong-Sool Jang,
Gunn-Ho Sohn and Kyu-Hong Choi
Department of Astronomy and Atmospheric Science,
Yonsei University, Seoul 120-749

(Received November 10, 1993; Accepted December 15, 1993)

요 약

상해 천문대 Sheshan 관측소의 레이저 위성거리 측정기기를 이용하여 LAGEOS II 위성에 대한 레이저 관측을 수행하여 총 1,838 점을 얻었다. 관측된 거리 자료를 지상목표물 관측에 의한 관측기기 지연 보정, 대기굴절 보정, 위성의 질량중심거리 보정, 일반 상대론적 보정과 지구 고형체 조석, 극 조석, 태양 조석을 포함한 조석보정을 통해 지연값을 결정하였는데 거리보정의 평균값은 19.12 m 이다. 결국 다항식 fitting 과 최소 자승법을 이용하여 계산한 관측값의 내부 정밀도 평균은 ± 7 cm 이다. 잡음을 제거하고 보정된 최종 관측점은 1,340점으로 관측점 총수에 대한 잡음비율은 27.1 % 이다.

ABSTRACT

Satellite laser ranging observation of LAGEOS II has been performed using the SLR System at Sheshan Laser Ranging Station, Shanghai Observatory. And we obtained 1,838 observational points. The observed range data is corrected by means of system delay correction using ground target observation, atmospheric refraction delay correction, offset correction, general relativistic correction and tide correction including solid tide, polar tide and ocean tide. As a result, the determined range delay mean value is 19.12 m and the mean internal accuracy by means of polynomial fitting and least square method is ± 7 cm. Corrected observational points are 1,340 and noise ratio to total observational points is 27.1 %.

1. 서 론

1960년에 레이저 기술이 발견된 후 레이저를 이용한 위성의 거리측정 가능성이 제시되면서 SLR (Satellite Laser Ranging)에 관한 연구가 시작되었다(Sasaki 1990). 이 연구의 결과로 레이저 반사를 위한 일련의 레이저 반사경을 장착한 BEACON-B 위성이 1964년 발사되었고 BEACON-C, GEOS-A, DIADEM-C, DIADEM-D, GEOS-B 위성이 계속하여 발사되었다. 그러나 1975년에 이르러서야 레이저를 이용한 위성거리 측정만을 위한 구형의 STARLETTE 위성이 프랑스에 의해 발사되었으며 그 이듬해 미국에 의해 LAGEOS II(Laser Geodynamics Satellite II) 위성이 발사되었다(Sasaki 1990). 그 후 현재까지 AJISAI, TOPEX/POSEIDON, ERS I, ETALON I, II, LAGEOS II, STELLAR 등 15개 이상의 레이저 거리측정 위성이 발사되었고 전 세계 25개의 인공위성 관측소와 NASA의 8개의 MOBILAS-class mobile system과 4개의 TLRS transportable system, 일본의 HTLRS (Hydrographic Department Transportable Laser Ranging Station) 등 다수의 이동 관측소에 의해 계속 관측되고 있다 (Murdoch 1992).

2. 위성의 레이저 관측 및 자료

상해 천문대 Sheshan 관측소에서 LAGEOS II 위성을 3일동안 관측하여 총 1,838점을 얻었다. 그 중 잡음과 상대적으로 오차가 큰 자료를 제거하고 모두 1,340점의 처리된 관측값을 구했다. 아래의 표 1에 각 날짜별로 관측에서 얻은 관측점 수와 자료처리를 거친후의 관측점의 수를 나타냈다.

표 1. LAGEOS II 위성의 날짜별 관측점과 보정 후의 관측점 수

관측일 Y. M. D.	Obs. No.	관측시작시각(U.T.)			관측점 수 points	보정된 최종 관측점 points
		h	m	s		
1993 9 6	Ob#1	17	29	14	234	152
1993 9 7	Ob#2	11	45	43	375	299
	Ob#3	15	38	34	642	440
	Ob#4	19	42	30	333	250
1993 9 8	Ob#5	17	45	32	254	199
Total					1,838	1,340

초기의 레이저 관측자료는 표 2와 같이 잡음값을 포함한 관측 시각, 방위각, 고도, 거리 등이다. 위성의 관측시각의 보정은 각각의 위성 관측소가 서로 다른 시스템을 운용하기 때문에 고유의 상수값을 이용하여 보정하며 초기의 관측시 기계어로 관측 제어 컴퓨터에 기록되면서 보정된다. 그러므로 관측 시각은 보정할 필요가 없고 단지 방위각, 고도, 거리에 대한 관측자료만 보정을 해주면 된다. 그림 1의 관측 자료는 초기의 자료 중에서 잡음을 제거하고 거리 지연값을 포함한 자료이기 때문에 이를 위성거리 보정 방법에 의해 보정한 후 정밀도 추정을 위해 16차의 다항식 fitting과 최소 자승법을 이용했다.

표 2. LAGEOS II위성의 레이저 관측자료및 자료형식 일부
(상해 천문대 Sheshan 관측소, 1993년 9월 7일 관측)

U.T.			Azimuth			Elevation			Range
h	m	s	°	'	"	°	'	"	μs
15	38	34	60	54	00	41	12	04	45082.76
15	38	55	62	01	09	41	38	30	44950.80
15	40	50	68	32	00	43	53	15	44316.17
15	41	03	69	18	32	44	07	06	44252.66
15	41	51	72	14	16	44	55	12	44042.27
15	42	12	73	33	52	45	14	55	43958.51
15	42	14	73	43	26	45	17	17	43947.57

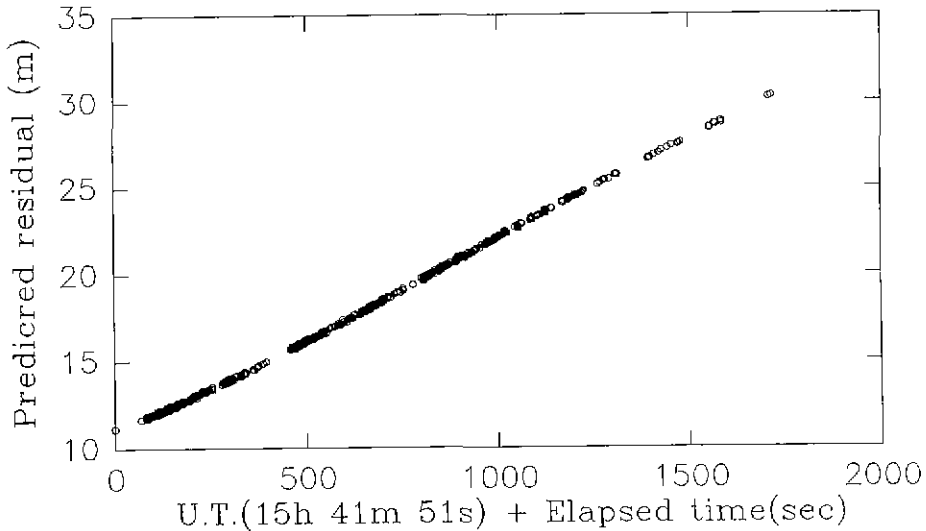


그림 1. LAGEOS II 위성의 관측 결과 (1993년 9월 7일)

3. 위성거리 측정 자료의 보정

3-1. 시간 지연 보정

시간 지연 보정에는 지상의 목표물 관측에 의해 레이저 관측기기 내부의 전로와 광로의 지연 값을 보정하는 관측기기 지연 보정 $\Delta\rho_s$, 자동 제어장치에서 레이저 기기에 발사를 명령한 시각과 실제로 주파수 증폭기에서 발사되어 관측시각을 기록하기까지의 지연시간을 보정하는 격발 보정 Δt_T , 관측전후에 컴퓨터내의 작업 시각과 실제 시각과의 차이를 보정하는 시계지연 보정 Δt_C , 관측시 발사된 레이저가 위성까지 가는데 걸리는 지연을 보정하는 광행차 시간 지연 보정 Δt_A

가 있다. 관측기기 지연보정은 위성까지의 거리지연 보정에 이용되며 촉발, 시계, 광행차 시간지연 보정은 관측시각 보정에 이용한다.

관측시각을 t_N 이라고 하고 격발 지연 보정, 시계 지연 보정, 광행차 시간지연 보정을 이용하면 레이저가 위성의 표면에 도달하는 시각 t 는

$$t = t_N + \Delta t_T + \Delta t_C + \Delta t_A$$

에 의해 결정한다.

3-2. 거리 지연 보정

대기 중에서 빛의 전파 속도는 진공속의 전파 속도보다 느리므로 레이저 펄스가 위성에서 관측점에 도달하는 시간에는 지연이 발생한다. 또한 대기 굴절에 의해 레이저의 광로는 휘어지게 된다. 이러한 두 가지 이유 때문에 관측된 위성의 거리는 실제보다 증가하므로 보정이 필요하며 이를 대기 굴절 보정 $\Delta \rho_{rf}$ 이라 한다 (Marini-Murray 1973).

위성까지의 거리란 관측점에서 위성의 질량 중심까지의 거리를 의미한다. 그러나 레이저는 위성 표면의 레이저 반사경에 반사되어 되돌아오므로 거리 보정시 이를 고려하여야 한다. 위성의 질량중심거리는 위성의 설계시 이미 계산되어 있으므로 하나의 상수값으로 존재한다. 그러나 구형이 아닌 불규칙한 형태의 위성은 각기 다른 계산과정을 거쳐서 산출하여야 한다. LAGEOS II 위성의 경우 위성의 질량중심거리 보정 $\Delta \rho_{mc}$ 는 24 cm 이다.

아인슈타인의 일반 상대론에 의하면 빛은 중력장에서 그 진로가 휘어지고 속도도 늦어진다. 그러므로 레이저가 위성으로부터 관측점까지 도달하는데 걸리는 시간은 중력장이 없을 때보다 길다. 이것이 바로 전자기적 지연의 효과로 보정이 필요한데 이를 일반 상대론적 보정 $\Delta \rho_{rel}$ 이라 한다.

지구 고형체 조석이란 지구의 대양의 변화와 대기의 변화 그리고 지구내부의 유동적 운동에 기인한 조석을 의미한다. 지구 고형체 조석에 의한 관측소의 위치변화는 상대적으로 위성과 관측점과의 거리를 변화시킨다. 1979년 Wahr에 의해 제안된 지구 고형체 조석 모델로부터 관측소 고도의 주기적인 변화를 계산할 수 있다. 그리고 지구의 극 운동은 지구의 대기와 유동적인 핵의 운동, 대양의 장주기 변화에 의해 관측소의 위치를 변화시킨다 (Wahr 1990).

지구의 대양 조석에 의한 관측지점의 위치변화의 계산은 Schwiderski (1983)의 GOTM (Global Ocean Tide Model)을 기초로 하여 Scherneck (1991)의 시간에 종속적인 11개의 조석 독립 변수를 수치 적분에 의해 계산하는 방법을 이용했다.

지구 고형체 조석, 극 조석, 대양 조석에 의해 변화되는 관측점의 위치 변화값들을 더하면 조석 보정 $\Delta \rho_{td}$ 를 구할 수 있다.

대기굴절 보정, 위성의 질량중심거리 보정, 일반 상대론적 보정, 조석 보정과 관측 기기 지연 보정을 이용하고 관측된 거리를 ρ_0 라 하면 위성까지의 실제 거리 ρ 는

$$\rho = \rho_0 + \Delta \rho_{rf} + \Delta \rho_{mc} + \Delta \rho_{rel} + \Delta \rho_{td} + \Delta \rho_s$$

가 된다.

4. 보정결과및 검토

관측된 자료의 보정을 위해서 사용된 상수값들과 지구의 포텐셜 모델은 GEM 10N 과 BIH 1976년 보고서의 값들을 사용하였고 상해 천문대 Sheshan 관측소의 지심 좌표값과 고도는 최근 10년간의 전세계 SLR 관측 자료로부터 계속 보정되었으며 아래의 표 2와 같다.

표 3. 상해 천문대 Sheshan 관측소의 지심 위치와 고도 (He 1993)

Geocentric coordinates(m)			Height m
X	Y	Z	
-2831087.752	4676203.497	3275172.911	29.023

초기 관측자료의 결과에서보면 거리 관측값들이 약간의 차이를 두고 2개나 3개로 나뉘어져 작은 집단을 형성하는데 이는 출력되는 레이저 빛의 다중 펄스에 의해 나타나는 결과이다. 그리고 무작위로 관측값과 큰 차이를 보이며 나타나는 점들은 모두 관측값과 상관없는 잡음이다. 관측결과를 살펴보기 위해서 Ob#1과 Ob#5의 잡음을 제거한 초기의 관측자료를 보정하여 다항식 fitting을 실시한 후의 최종 오차를 관측시각과 소요된 시간에 대해 표시한 그림을 다음의 그림2와 그림 3에 나타냈다.

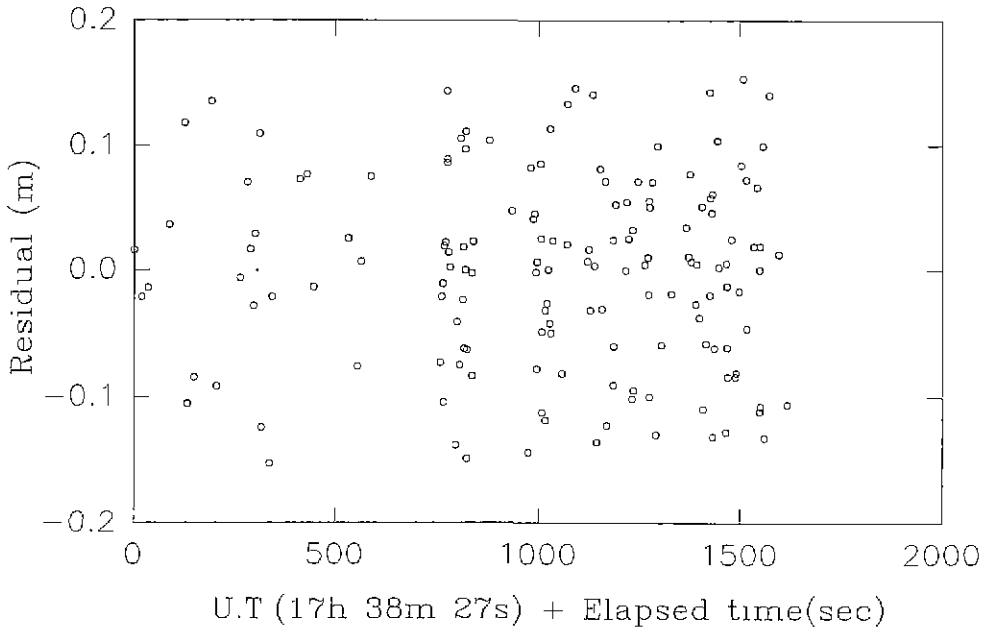


그림 2. 다항식 fitting 후 SLR 자료의 오차 (Ob#1). 내부 정밀도 ± 0.08 m, 다항식 차수는 16차이다

표 4. 보정과 정밀도 추정을 위한 측정자료 및 결과 (Ob#1)

Relative humidity(%)				83
Atmospheric temperature(°)				22.5
Atmospheric pressure(mb)				1017
Polynomial order				16
Polynomial coefficients to elapsed time, determined by least square method (1st order - 16th order)				
-0.8879601527	0.0048501854	-0.0001097698	0.0000012189	
-0.0000000066	0.0000000000	0.0000000000	0.0000000000	
0.0000000000	0.0000000000	0.0000000000	0.0000000000	
0.0000000000	0.0000000000	0.0000000000	0.0000000000	
Internal accuracy(m)				± 0.08

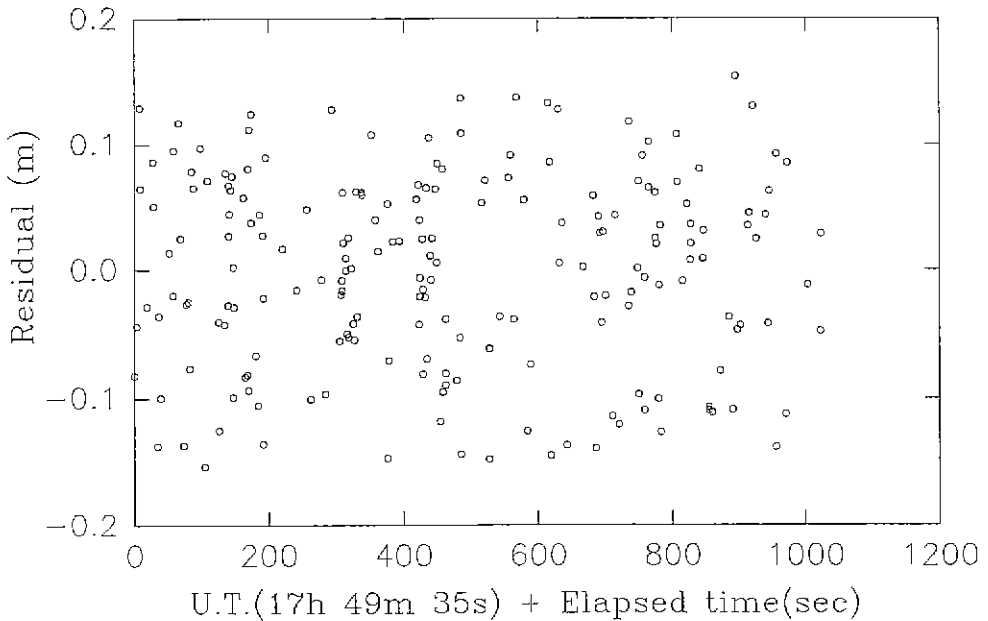


그림 3. 다항식 fitting 후 SLR 자료의 오차 (Ob#5). 내부 정밀도 ± 0.08 m, 다항식 차수는 16차이다

표 5. 보정과 정밀도 추정을 위한 측정자료및 결과 (Ob#5)

Relative humidity(%)				87
Atmospheric temperature(°)				22.8
Atmospheric pressure(mb)				1016
Polynomial order				16
Polynomial coefficients to elapsed time determined by least square method (1st order - 16th order)				
-0.3255519566	0.0046727365	-0.0000845405	0.0000005892	
0.0000000011	0.0000000000	0.0000000000	0.0000000000	
0.0000000000	0.0000000000	0.0000000000	0.0000000000	
0.0000000000	0.0000000000	0.0000000000	0.0000000000	
Internal accuracy(m)				± 0.08

초기의 관측 자료는 위에 기술한 거리 보정 방법에 의해 보정되었으며 거리보정 결과와 보정된 자료의 다항식 fitting 후의 내부 정밀도는 표 6과 같다.

표 6. 관측 자료에 대한 보정 결과및 내부 정밀도

관측 번호	위성 거리보정 평균값 m	내부 정밀도 m
Ob#1	19.20	± 0.08
Ob#2	19.29	± 0.06
Ob#3	19.10	± 0.07
Ob#4	19.24	± 0.07
Ob#5	19.24	± 0.08
Total mean	19.22	± 0.07

5. 결 론

고궤도 위성인 LAGEOS II를 상해 천문대 Sheshan 관측소에서 3일동안 5회의 SLR 관측을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, 레이저를 이용한 위성의 관측은 전파나 사진 건판등을 이용한 광학 관측에 비해 그 정밀도가 매우 뛰어나다. 5회에 걸친 LAGEOS II 위성의 레이저관측 결과 보정된 관측값의 내부 정밀도 평균은 ± 7 cm 이다.

둘째, 전파에 의한 위성의 추적이 기후 조건에 영향을 받지 않는데 비해 레이저를 이용한 위성의 추적은 기후 상태에 따라 관측의 효율이 좌우되며 비나 눈이 올 경우 관측을 할 수 없다.

셋째, 레이저를 이용한 위성의 관측에는 반드시 보정과정의 따라야 하며 시간 지연과 거리 지연에 의한 LAGEOS II 위성의 거리 보정의 평균값은 19.12 m 이다.

넷째, 최초의 관측시 예상거리값이 정밀하게 계산되지 못하면 정확하게 관측된 자료의 일부를 제거할 수도 있고 또한 정밀한 위성의 추적을 위해서는 예측 궤도의 정밀한 계산이 필요하다. 5회의 관측에 의한 총 관측점 수는 1,838점이고 보정된 최종관측점은 1,340점으로 관측점 총수에 대한 잡음비율은 27.1 % 이다.

현재 수신기기로 이용되고 있는 광전 증배관 대신에 SPAD (Single Photon Avalanche Diode)를 이용할 경우 그 정밀도는 2배 이상 증가한다. 또한 낮에 관측할 경우 잡음은 기하급수적으로 증가하여 관측의 효율이 매우 떨어진다. 그러므로 대기 상태에 따라 낮에도 관측이 가능하도록 효율적인 필터의 개발이 필요하다.

참 고 문 헌

- Cui Douxing 1993, 개인 서신
He Miaofu 1993, 개인 서신
Marini, J. G. & Murray, C. W. Jr. 1973, Correction of laser range tracking data for atmospheric refraction at elevation above 10 degree(NASA Rep.), pp. 39
Murdoch, A. 1992, Crustal dynamics satellite laser ranging network LAGEOS II support plan(NASA Rep.), pp. 1-10.
Sasaki, M. 1990, Study of the earth's dynamics by means of satellite laser ranging techniques - Rep. Hydrogr. Researches (Hydrographic Department of Japan:Tokyo), pp. 100-123
Scherneck, H. G. 1991, Geophys. J. Int., 106, 677
Wahr, J. 1990, Geophys. J. Int., 101, 709