

# 基于高重频卫星激光测距测算 AJISAI 卫星自转速率

汤儒峰<sup>1,2</sup> 李语强<sup>1</sup> 李 熙<sup>1,2</sup> 李荣旺<sup>1</sup> 黄 凯<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>中国科学院云南天文台, 云南 昆明 650216

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 随着千赫兹(kHz)卫星激光测距技术的发展,高精度、高重频的卫星测距数据为卫星自转速率的研究奠定了基础。基于中国科学院云南天文台 kHz 卫星激光测距系统的卫星实测数据,分析了 AJISAI 卫星的自转情况。利用正交最小二乘法对原始观测数据进行了预处理,然后利用频谱分析的方法获得了 AJISAI 卫星实测数据的频谱图,结合 AJISAI 卫星角反射器面板的排列规律,分析得出 2014 年 4 月 AJISAI 卫星自转的速率约为 0.4382 Hz,利用国内的测距数据得到了地球动力学卫星的自转速率。该方法可以推广到对其他类似激光卫星自转速率进行测定,同时为高精度卫星自转模型的建立提供了基础条件。

**关键词** 测量; 卫星激光测距; 卫星自旋; 频谱分析

中图分类号 P228.5

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0608010

## Spin Rate Determination of AJISAI Based on High Frequency Satellite Laser Ranging

Tang Rufeng<sup>1,2</sup> Li Yuqiang<sup>1</sup> Li Xi<sup>1,2</sup> Li Rongwang<sup>1</sup> Huang Kai<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Yunnan Observatories, Chinese Academy of Sciences, Kunming, Yunnan 650216, China

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** With the development of kilo-Hertz (kHz) satellite laser ranging technology, high precision and high frequency data of satellite laser ranging is becoming a foundation for the research of satellite spin. Based on Yunnan Observatories kHz satellite laser ranging system, the AJISAI satellite spin is analyzed. Firstly, the original observation data by the orthogonal least square method are preprocessed, and the data of AJISAI using the method of spectrum analysis are studied. Finally, AJISAI satellite corner reflector panel arrangement is combined, AJISAI satellite spin is analyzed, and the satellite spin mean rate is about 0.4382 Hz. This method can be extended to other laser satellite spin determination. At the same time, this method provides a basic condition for building a high precision satellite spin model.

**Key words** measurement; satellite laser ranging; satellite spin; spectral analysis

**OCIS codes** 120.1880; 070.4790; 280.3400

## 1 引 言

卫星激光测距(SLR)技术是现代空间大地测量最先进的技术之一,在地球动力学和大地测量学领域得到了广泛的应用,尤其是其中的地球动力学激光测距卫星。这类卫星被称为被动卫星,表面布满角反射器,形状为规则球形,使得表面力与卫星的指向无关,面质比小以尽可能减小表面力的影响,因此,这些卫星受各种摄动的影响较小,轨道稳定,可以用来解算诸多相关物理参量<sup>[1]</sup>。一般而言,球状测地卫星发射到轨道上会伴有初始的绕轴自转以帮助稳定卫星姿态。因为受到地球引力场和磁场以及太阳的影响,这些被动测地卫星的自转参数(自转轴方向、自转速率)在不断地变化。准确地测定被动卫星的自转参数可以用来改善和

收稿日期: 2015-01-18; 收到修改稿日期: 2015-03-09

基金项目: 国家自然科学基金(10803019)

作者简介: 汤儒峰(1988—),男,硕士研究生,主要从事卫星激光测距方面的研究。E-mail: tangrufengtrf@126.com

导师简介: 李语强(1978—),男,博士,副研究员,主要从事空间目标探测方面的研究。E-mail: lyq@ynao.ac.cn(通信联系人)

验证卫星轨道扰动模型,而更好的模型可以提高轨道分析的精确度,从而提高地面测站的位置精度和地球动力学参数(如:地心位置,极移等)精度<sup>[2]</sup>。

目前卫星自转参数主要由SLR资料解算法<sup>[3-4]</sup>和光度测量法<sup>[5]</sup>获得。光度测量数据解算法是依据卫星光度变化的闪烁周期进行解算,其光度变化是依赖于卫星、太阳及测站间的几何关系及卫星自身的姿态的,从而可以解算出卫星的自转参数,该法相对精度较高,但受限于卫星光学可见性条件,且自转周期不宜太长。SLR资料解算法是一种频谱分析方法,受限于测距频率及自转速率,自转速率越慢则需要的测距频率越高。SLR技术测定卫星自转参数不受光学可见性限制,测算中不需要考虑太阳-卫星-测站之间的几何关系,也不需要其他的辅助设备。

SLR实测数据中的频率信号的频率值由卫星的自转频率、卫星表面角反射器的位置排列及个数等因素决定。为了验证SLR数据解算卫星自转速率方法的正确性,本文选择自转速率快,角反射器排列非常规律的AJISAI卫星作为研究对象。

## 2 激光测距数据测算卫星自转速率原理

SLR是卫星观测中精度最高的测量技术,通过精确测量激光脉冲从地面站到卫星的往返飞行时间,获得星地间精密距离<sup>[6]</sup>。在观测中,旋转卫星AJISAI表面的角反射器被激光照射,随着卫星的自转,测距回波信号呈周期性分布,通过分析卫星反射器排列方式对回波信号的影响,结合测距数据的处理,可以得到卫星的自转速率。

AJISAI卫星是日本于1986年8月13日发射的一颗测地卫星。它运行在高度约为1500 km近似圆形(偏心率为0.001)的轨道上,其轨道倾角约为50°。该卫星是一颗完全被动球形卫星(见图1),其直径约为2.15 m,该卫星表面覆盖有318片用于可见跟踪的太阳光反射镜,另外有120个激光反射面板,每个面板分布有6个用于激光测距的角反射器(CRR)<sup>[7-8]</sup>。卫星AJISAI所携带的角反射器面板的排列情况如图2所示<sup>[9]</sup>,120个角反射器面板排成15个圆环分布在卫星不同的纬度上,经度上成120°对称分布。15个圆环中,其中有5圈( $R_0$ 、 $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_{-1}$ 、 $R_{-2}$ )包含了12个角反射器面板,4圈( $R_3$ 、 $R_4$ 、 $R_{-3}$ 、 $R_{-4}$ )包含了9个角反射器面板,2圈( $R_5$ 、 $R_{-5}$ )包含6个角反射器面板以及在靠近两极的4圈( $R_6$ 、 $R_7$ 、 $R_{-6}$ 、 $R_{-7}$ )包含3个角反射器面板<sup>[10]</sup>。在15个圆环中只有4圈( $R_6$ 、 $R_7$ 、 $R_{-6}$ 、 $R_{-7}$ )中的角反射器面板之间是严格的等距分布,其余的圆环中的角反射器面板之间都是近似等距分布。



图1 测地卫星 AJISAI

Fig.1 Geodetic satellite AJISAI

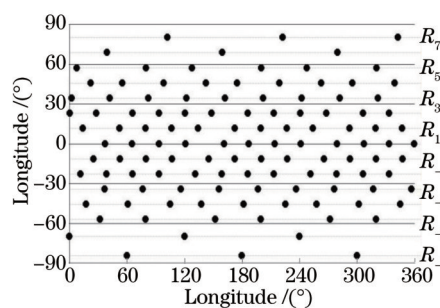


图2 AJISAI卫星角反射器面板分布图

Fig.2 Distribution of corner reflector panels of AJISAI

若假设AJISAI卫星的自转频率为 $f_0$ ,则当某特定角反射器面板圈反射回来的信号中包含的频率会有 $f_r = n \cdot f_0$ ,式中 $n$ 表示该角反射器面板圈所包含的角反射器面板个数。通过频谱分析提取出包含在SLR实测数据中的频率信号 $f_r$ ,即可分析得出AJISAI卫星的自转频率。

自从该卫星发射以来日本一直通过常规测光的方法得到其自转速率。AJISAI发射进入轨道时的初始自转速率约为40 r/min,并且其自转轴和地球自转轴近似平行,发射后用测光的方法获得其绕轴自转速率为0.67 Hz<sup>[11-12]</sup>,1997年10月减慢到0.57 Hz<sup>[8]</sup>。造成卫星这种长期的绕轴自转减慢的原因很可能是卫星的金属部件和地球磁场相互作用产生的涡电流,但是这个作用机理目前还没有精确的科学模型<sup>[8]</sup>。

### 3 测距距离周期变化的计算

经过多年的发展,SLR技术在这方面都有了很大的进步,中国科学院云南天文台激光测距站于1998年加入国际激光测距联测,2010年实现千赫兹SLR,并进入常规观测<sup>[13]</sup>。千赫兹SLR系统获得的大量高精度实测数据使得以前一些被忽略掉的误差源从噪声中显现出来,成为了可以进行分析的有用信息。对于卫星AJISAI,角反射器面板的位置排列及卫星自转导致角反射器到测站的距离在不断地变化,这些测距距离的变化频率就包含在了实测数据中。

因为AJISAI卫星的绕轴自转,且其所携带的角反射器面板的排列具有很好的规律性,所以在观测时,AJISAI卫星上每个角反射器面板到测站的距离随着卫星自转呈现周期性的变化。而这个周期由卫星的自转周期和参与测距激光反射的圆环所包含角反射器面板个数共同决定,可用公式 $f_r = n \cdot f_0$ 表示。测距距离周期变化的振幅则由球状卫星的直径、面板之间的间距以及激光入射的角度共同决定。

根据AJISAI卫星角反射器的分布情况,仿真了AJISAI卫星自转所造成的角反射器面板与测站之间距离周期性的变化情况,仿真计算结果如图3所示。

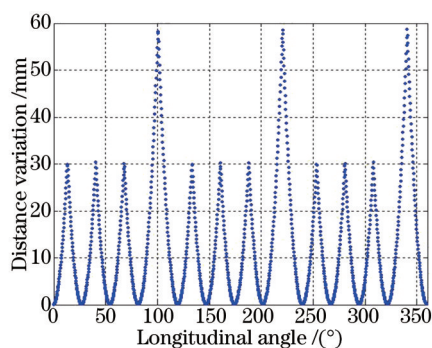


图3 测距距离变化模拟

Fig.3 Simulated distance variations

图3中的结果是模拟当激光垂直照射在卫星AJISAI的赤道上时,卫星自转一周,赤道上那一圈(包含12个角反射器面板)中的面板由于卫星自转而造成的测距距离变化。纵坐标为0时表示当角反射器面板正对激光入射方向,此时测站与角反射器面板间距离为最小,随着卫星自转测站与角反射器面板距离呈现周期变化。在卫星经度约为 $100^\circ$ 、 $220^\circ$ 、 $340^\circ$ 位置有三个较大的间距值,这也较好地符合了赤道上那一圈上角反射器面板排列情况,该圈12个角反射器面板分为了3组,每组有4个角反射器面板,组内面板之间的距离稍小,组与组之间相邻面板距离稍大。这只是关于卫星赤道上角反射器面板圆环的模拟,通常,在实际观测中参加到测距中的角反射器面板圈不止一圈,但其距离周期性的变化也是同样存在的。

## 4 数据处理与分析

### 4.1 原始数据预处理

在SLR实测中,获得的卫星原始数据是一种残差数据(O-C),即用实际测量到的距离减去了预报计算的距离。在对数据进行频谱分析之前,需要对原始数据进行一些必要的预处理。在测距中,回波探测器的暗噪声、发射激光的后向散射噪声和天空背景噪声等将会对回波探测器产生误触发,从而导致观测数据中包含大量的噪声信息<sup>[14]</sup>。因此,首先要从包含有噪声的数据中识别出需要的有效信号,信号识别可以采用文献[15]中介绍的方法,然后截取一段合适时间长度的有效信号。在截取一段合适时间长度信号时,尽量选择数据点密集的时间段,可以在截取前分段进行数据点个数统计以作为截取的参考。截取的信号数据需要进行低阶多项式拟合,拟合的过程采取了正交最小二乘法。为了去掉数据中的低频部分,并且保留由转动的角反射器面板所造成的高频部分,拟合之后需要减去拟合值获得拟合残差数据。

图4中数据分别是云台的卫星AJISAI实测数据(2014年4月)的测距残差数据和拟合残差数据,在时间长度截取了7s的时间(约包含了3个完整的自转周期),并经过了前面所述的数据处理过程。

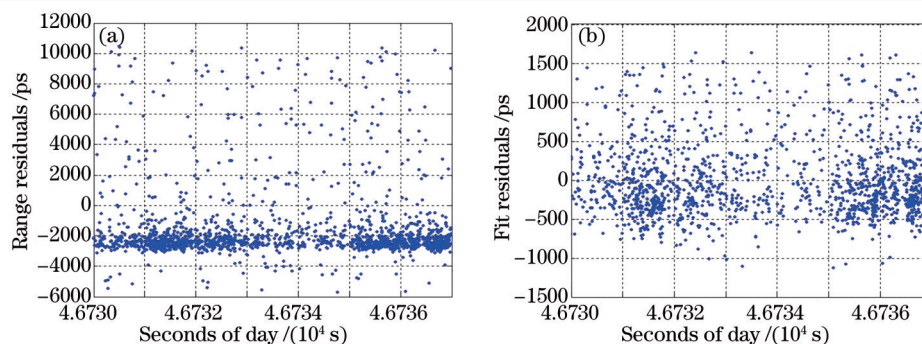


图4 数据及处理结果。(a) 原始的测距残差; (b) 拟合残差

Fig.4 Data and processed result. (a) Original range residuals; (b) fit residuals derived from range residuals

## 4.2 频谱分析

通常,在实际的观测中,即使在天气很好的情况下,SLR系统也达不到100%的回波率。因为在观测中,系统可能错过一些由卫星反射回来的光子,所以实测数据在时间序列上一般是非均匀分布的,对应的拟合残差数据也是非均匀分布的。对于这种数据情况,快速傅里叶变换(FFT)就不太适用了。可能可以使用插值的方式求得失去的数据点,但这有可能会产生新的频率出现,并且降低数据处理的精度。在文献[16]中提出的处理非均匀时间分布数据的Lomb频谱分析方法非常适合这里需要处理的数据,这个方法可以用最小二乘的方法估计非均匀分布数据的频谱。

图5是对图4中数据利用Lomb频谱分析方法做出的频谱图,在图中可以看到三个很明显的峰值A,B,C以及一个稍弱的峰值D以及一些更弱的峰值。其中A对应的频率值为1.324 Hz,B对应的频率值为2.624 Hz,C对应的频率值为5.262 Hz,D对应的频率值为7.973 Hz。很明显,B,C,D对应的频率值分别约为A对应频率值的2、4、6倍。A,B,C对应的频率值分别近似对应自转频率估计值的3、6、12倍,D对应的频率值近似对应自转频率估计值的18倍。由此,分析可判断A,B,C对应的频率值分别由有3、6、12个角反射器面板的圆环生成的。而D所对应的频率值据推测应该是由两圈相邻包含9个角反射器面板的圆环共同生成的,在后续的频谱分析中多次遇到类似重叠的情况。由此,用A,B,C对应的频率值分别除以3、6、12,即可得到卫星自转速率计算值分别为0.4413、0.4373、0.4385 Hz。

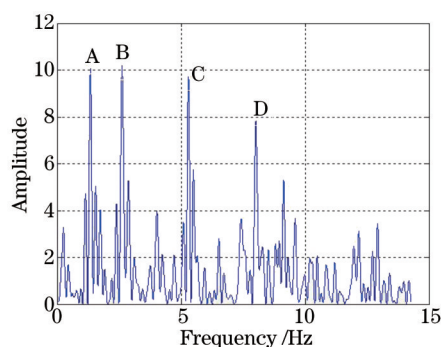


图5 频谱分析结果

Fig.5 Results of spectral analysis

对于该圈AJISAI实测数据,时间长度为400 s,数据点约为70000个。在这种情况下,截取了20个时间长度约为7 s的数据段分别进行以上的数据处理分析,这样处理主要有两个原因:一是避免数据处理时因数据量太大而耗费时间过长(主要是Lomb频谱分析阶段);二是因为在长时间观测中,激光入射角度相对卫星在不断的变化,不同时间主导激光反射的角反射器面板圈在不断变化,所以,在长时间观测数据中,某特定角反射器面板圈造成的频率强度在频谱分析图中会相对弱化从而峰值不突出,以及一定程度上的频率偏移,从而影响最后的自转速率解算精度。

表1展示了分别对20段数据进行处理分析的结果。表中有效数据段指的是,在该段数据中的频谱分析中,某特定角反射器面板圈所对应的频率的峰值相对比较突出,可以认定为有效的峰值。从表格中的统计

数据可以看出,包含3个角反射器板的圆环所产生的频率求得的自转速率精度比较低,由两圈重叠产生的频率求得的自转速率精度也相对较低。最后可取包含6与12个反射面板圈对应的17、16段数据的平均速率值的加权平均值0.4382 Hz作为该段AJISAI卫星实测数据的自转速率。AJISAI卫星自转速率在2005年5月约为0.5077 Hz,减慢速率约为0.0077497 Hz/year<sup>[8]</sup>,由此可推算本文所处理该段数据对应的2014年4月的自转速率约为0.4386 Hz。

表1 20段数据的频谱分析结果

Table 1 Results of frequency analysis of 20 data segments

| Number of CRR panels | Number of valid data segments | Mean frequency /Hz | Root-mean-square /Hz |
|----------------------|-------------------------------|--------------------|----------------------|
| 3                    | 14                            | 0.44403            | 0.00289              |
| 6                    | 17                            | 0.43696            | 0.00165              |
| 12                   | 16                            | 0.43958            | 0.00161              |
| 18                   | 12                            | 0.44370            | 0.00286              |

### 4.3 结果误差分析

在实际SLR观测中,激光相对于卫星的入射角度是在不断地变化的,而这个变化也会影响到包含在测距信号中的频率信息从而产生误差。在不同时刻,激光入射角的变化主要决定于卫星与测站之间的几何关系以及卫星自身的姿态。激光入射角度的变化主要分为两个部分,激光入射角度在卫星经度和卫星纬度上的变化。

在观测卫星过程中,考虑卫星与测站之间的位置关系,在该时段中由激光入射角度在卫星经度变化上对自转频率造成的影响可以由公式  $df_1 = dL/(360^\circ \cdot t)$  来描述,其中  $dL$  表示该时段入射角度在经度上变化,  $t$  表示该时段对应的时间(单位s),这一因素造成的频率偏移一般在0.001 Hz以内<sup>[17]</sup>。另一方面,激光入射角度在卫星纬度上发生变化时,主导激光反射的角反射器面板圈会从一个移到相邻的另一圈,这时候频率信号就会有变化。这一因素引起的频率变化主要决定于:激光入射纬度从一个转移到相邻的一圈时,这两圈的相对相位,由于相对相位的不同,纬度变化导致的频率信号的变化可能是频率正向偏移或者负向偏移。在本文的频谱分析过程中,由于数据时间段相对比较短,所以由纬度变化引起的频率偏移是可以忽略不计的。

## 5 结 论

利用中国科学院云南天文台千赫兹SLR系统获得的AJISAI卫星实测数据,结合卫星所携带激光反射器面板排列规律,经过处理分析得到卫星的自转速率。在相关的数据处理中,由于数据的时间非均匀分布的特点,因此使用合适的频谱分析方法至关重要,Lomb频谱分析方法是个较好的选择。本文只对一圈实测数据进行了处理,后期工作中,将对卫星AJISAI的自转速率进行长时间(半年以上)的连续的测算,可以用本方法获得一系列的自转速率值,从而拟合出一个AJISAI卫星自转速率随时间变化的关系,为后续建立更精确的卫星自转模型奠定基础。

### 参 考 文 献

- 1 Ye Shuhua, Huang Cheng. Astrodynamics[M]. Jinan: Shandong Science and Technology Publishing House, 2000: 97-98.  
叶淑华, 黄 斌. 天文地球动力学[M]. 济南: 山东科学技术出版社, 2000: 97-98.
- 2 D Kucharski, G Kirchner, H C Lim, *et al.*. New results on spin determination of nanosatellite BLITS from high repetition rate SLR data[J]. Advances in Space Research, 2013, 51(5): 912-916.
- 3 Kucharski D, Kirchner G, Schillak S, *et al.*. Spin determination of LAGEOS-1 from kHz laser observations[J]. Advances in Space Research, 2007, 39(10): 1576-1581.
- 4 Kucharski D, Kirchner G, Koidl F, *et al.*. 10 Years of LAGEOS-1 and 15 years of LAGEOS-2 spin period determination from SLR data[J]. Advances in Space Research, 2009, 43(12): 1926-1930.
- 5 Otsubo T, Sherwood R A, Gibbs P, *et al.*. Spin motion and orientation of LAGEOS-2 from photometric observation[J]. IEEE Trans Geoscience Remote Sensing, 2004, 42(1): 202-208.
- 6 Zhang Zhongping, Zhang Haifeng, Wu Zhibo, *et al.*. Experiment of laser ranging to space debris based on high power solid-state

- laser system at 200 Hz repetition rate[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(s1): s108005.
- 张忠萍, 张海峰, 吴志波, 等. 基于 200 Hz 重复率高功率全固态激光器空间碎片激光测距试验[J]. 中国激光, 2014, 41(s1): s108005.
- 7 T Otsubo, J Amagai, H Kunimori. The center of mass correction of the geodetic satellite AJISAI for single-photon laser ranging[J]. IEEE Trans Geoscience Remote Sensing, 1999, 37(4): 2011-2018.
- 8 T Otsubo, J Amagai, H Kunimori, *et al.*. Spin motion of the AJISAI satellite derived from spectral analysis of laser ranging data[J]. IEEE Trans Geoscience Remote Sensing, 2000, 38(3): 1414-1424.
- 9 D Kucharski, T Otsubo, G Kirchner. Spectral response of experimental geodetic satellite determined from high repetition rate SLR data[J]. Advances in Space Research, 2013, 51(1): 162-167.
- 10 Georg Kirchner, Walter Hausleitner, Elena Fristea, *et al.*. Ajisai spin parameter determination using Graz kilohertz satellite laser ranging data[J]. IEEE Transactions on Geoscience Remote Sensing, 2007, 45(1): 201-205.
- 11 T Kanazawa. Determination of the rotation phase angle and the rotation period of AJISAI (II)[C]. Proc 70th Meeting Geodetic Soc Jpn, 1988: 51-52.
- 12 M Sasaki, H Hashimoto. Launch and observation program of the experimental geodetic satellite of Japan[J]. IEEE Trans Geoscience Remote Sensing, 1987, (5): 526-533.
- 13 Zheng Xiangming, Li Zhulian, Fu Honglin, *et al.*. 1.2 m telescope satellite co-optical path kHz laser ranging system[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(5): 0512002.
- 郑向明, 李祝莲, 伏红林, 等. 云台 1.2 m 望远镜共光路千赫兹卫星激光测距系统[J]. 光学学报, 2011, 31(5): 0512002.
- 14 Li Zhulian, Zheng Xiangming, Fu Honglin, *et al.*. Processing method research for multi-pulse measured data of high repetition frequency laser ranging[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(s1): s108007.
- 李祝莲, 郑向明, 伏红林, 等. 高重复率测距中多脉冲测量数据的处理方法研究[J]. 中国激光, 2014, 41(s1): s108007.
- 15 Li Xi, Tang Rufeng, Li Zhulian, *et al.*. Laser ranging data processing based on the analysis of the binary image[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(12): 1208005.
- 李 熙, 汤儒峰, 李祝莲, 等. 基于二值图像的卫星激光测距数据处理[J]. 中国激光, 2014, 41(12): 1208005.
- 16 N R Lomb. Least-squares frequency analysis of unequally spaced data[J]. Astrophys Space Sci, 1976, 39(2): 447-462.
- 17 D Kucharski, G Kirchner, T Otsubo, *et al.*. 22 Years of AJISAI spin period determination from standard SLR and kHz SLR data[J]. Advances in Space Research, 2009, 44(5): 621-626.

栏目编辑: 何卓铭