

# 旋转卫星激光测距数据分析与处理

刘通<sup>1,2</sup>, 陈浩<sup>3</sup>, 沈鸣<sup>1</sup>, 高鹏骐<sup>1</sup>, 赵有<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国科学院国家天文台, 北京 100012;

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049;

<sup>3</sup>北京跟踪与通信技术研究所空间目标测量重点实验室, 北京 100094

**摘要** 为解决传统的旋转卫星激光测距数据频谱分析方法运算量大、耗时长的问题, 提出一种基于快速 Lomb-Scargle 算法的卫星激光测距数据处理方法。首先用经验模式分解方法来自适应地去除 O-C 残差中代表卫星轨道运动的低频趋势项; 然后采用快速 Lomb-Scargle 算法对预处理后的数据进行频谱分析, 得到相对应的周期图, 进而分析卫星的自转速率。采用该方法处理了奥地利 Graz 站千赫兹测距系统测量得到的 Ajisai 卫星的数据, 分析得出 2010 年 5 月 Ajisai 卫星自转的速率约为 0.472 Hz。并对 4 圈激光测距资料进行处理, 结果表明, 该方法可以将频谱分析运算量降低两个数量级, 节省大量处理时间, 为快速高效地处理大量的旋转卫星激光测量数据提供了新思路。

**关键词** 测量; 经验模式分解; Lomb-Scargle 算法; 旋转卫星; 激光测距; 频谱分析

**中图分类号** P228.5

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/CJL201744.0504001

## Spinning Satellite Laser Ranging Data Analysis and Processing

Liu Tong<sup>1,2</sup>, Chen Hao<sup>3</sup>, Shen Ming<sup>1</sup>, Gao Pengqi<sup>1</sup>, Zhao You<sup>1</sup>

<sup>1</sup>National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China;

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

<sup>3</sup>Key Laboratory for Space Object Measurements, Beijing Institute of Tracking and Telecommunications Technology, Beijing 100094, China

**Abstract** The traditional spectral analysis methods of processing spinning satellites laser ranging data have the disadvantages of large computational cost and long processing time. A new satellites laser ranging (SLR) data processing algorithm based on fast Lomb-Scargle algorithm is proposed to solve these problems. Firstly, empirical mode decomposition method is used to adaptively remove the low frequency trend term in the O-C residuals of SLR data, which represents the satellite orbital motion. The preprocessed SLR data is then processed for spectral analysis with fast Lomb-Scargle algorithm to get its periodogram and thus analyze the spinning rate of satellites. Processing the kilohertz SLR data of satellite Ajisai from Graz station of Austria, we can get that the spinning rate of satellite Ajisai during May 2010 is about 0.472 Hz. Further data processing of four passes also have been done by proposed fast algorithm. Results show that the computational cost of spectral analysis is reduced by roughly two orders of magnitude and the processing time is greatly saved by using the fast algorithm. It provides a new way to process large amount of SLR data of spinning satellite fast and efficiently.

**Key words** measurement; empirical mode decomposition; Lomb-Scargle algorithm; spinning satellite; laser ranging; spectrum analysis

**OCIS codes** 120.1880; 070.4790

**收稿日期:** 2016-12-06; **收到修改稿日期:** 2017-01-13

**基金项目:** 国家重大科研装备研制项目(ZDYZ2013-2)

**作者简介:** 刘通(1989—), 女, 博士研究生, 主要从事空间目标激光测距方面的研究。E-mail: liutong@nao.cas.cn

**导师简介:** 赵有(1964—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事激光测距与空间目标监测技术方面的研究。

E-mail: youzhao@bao.ac.cn

# 1 引 言

卫星激光测距在大地测量、雷达标校和空间目标监测等领域发挥了重要的作用<sup>[1-2]</sup>。对卫星等空间目标激光测距回波的处理和分析也受到了各国科学家的广泛关注。对于空间非旋转卫星或目标,其有效回波可以用泊松滤波或多项式拟合等方法来提取<sup>[3-10]</sup>,进而分析目标的运动状态和轨道信息。结合激光测距的原理和空间旋转目标的运动特点,空间旋转卫星激光测距回波一般为非均匀采样的周期性时间序列,为了更有效地分析回波中所包含的目标运动信息,如卫星的运动姿态和自转速率等,一般选择在频域中处理这类信号。因此,时域中用于非旋转目标回波提取的方法不再适用。

目前,各国科学家对空间旋转目标激光测距回波的分析处理已经有了一些研究成果,主要体现在对一些废弃或者仍在轨工作的旋转卫星的激光测距数据的分析。Otsubo T 等<sup>[11]</sup>提出将 Lomb 算法用于 Ajisai 卫星的激光测距回波残差分析中,并且用此方法处理了澳大利亚 Orroral 站、美国 McDonald 站和 Haleakala 站、奥地利 Graz 站和德国 Wettzell 站测得的 Ajisai 的激光测距原始观测资料,表明 Ajisai 卫星的自转速率在逐渐变慢。Bianco G 等<sup>[12]</sup>采用 Lomb-Scargle 算法分析了意大利 Matera 站 Lageos-2 的观测数据,发现 Lageos-2 的自转速率呈指数规律减慢。Kirchner G 等<sup>[13-24]</sup>在 Otsubo T 等工作的基础上,采用 Lomb 算法分别处理了 Graz 站千赫兹激光测距系统对 Ajisai、Envisat、Etalon-1、Etalon-2、Lageos-1 和 Lageos-2 等旋转卫星的大量测量数据,并且得到了一系列的研究成果。在意大利的马泰拉举行的 2015 ILRS Technical Workshop 会议上,奥地利 Graz 站的 Kirchner G 和瑞士 Zimmerwald 站的 Schildknecht T 都提出可以将空间目标激光测距数据和光变曲线结合,来分析目标的自转速率和运动姿态,并且 Kirchner G 在会议报告中提出了傅里叶分析、自相关函数法和状态弥散最小化算法等提取周期信号的理论方法。与光变曲线的获取相比,空间目标激光测距没有天光地影观测条件的要求。国内,汤儒峰等<sup>[25]</sup>采用最小二乘和 Lomb 频谱分析的方法处理 Ajisai 卫星的原始观测数据,分析了其自转速率。

以上这些研究对旋转卫星激光测距原始观测资料的处理思路类似。先在时域中采用多项式拟合,去除数据中的长周期项;然后在频域中用 Lomb-Scargle 算法做出预处理后数据的周期图,从一些明显的谱峰所对应的频率值就可以分析出目标的自转速率;结合卫星上角反射器的分布状况和回波形状可以估计卫星的空间姿态。但是 Lomb 频谱分析耗时过长,大大影响了分析处理数据的效率。另外,在数据预处理时,多项式拟合方法需要确定多项式的阶数,并且拟合去除低频项的效果一般。本文考虑在预处理阶段采用 Huang 提出的经验模式分解(EMD)方法来自适应地去除测量数据中的低频趋势项<sup>[26]</sup>;然后采用快速 Lomb-Scargle 方法对回波数据进行频谱分析,推算卫星的自转速率。

## 2 旋转卫星激光测距回波数据分析

在对旋转卫星激光测距回波 O-C 残差进行处理之前,分析其代表的具体物理意义。以 Ajisai 卫星为例,其中观测值 O 代表的是卫星上激光角反射器的空间运动情况,包括角反射器随卫星做的近圆轨道运动和绕星体自转轴做的周期性圆周运动。而计算值 C 表示的是卫星本体质心运动情况的预测值。在一般情况下,对 O-C 残差数据进行质心修正以后,得到的数据包含两个方面的信息:代表卫星轨道运动预测偏差值的长周期低频趋势项和代表卫星自转运动状态的短周期高频项。一般在对这类数据进行分析处理时,先在时域中将低频趋势项去除,然后采用频域的分析方法来提取卫星自转速率等信息。下文也将沿用这个思路结合 EMD 和快速 Lomb-Scargle 算法对奥地利 Graz 站的 Ajisai 卫星激光测距回波进行处理分析。

## 3 EMD 算法提取数据低频项

### 3.1 EMD 算法

EMD 方法是 Huang 提出的一种自适应信号处理方法。该方法无需待处理信号的任何先验知识,可以自适应地根据待处理信号本身的特点,筛选出有限个本征模态函数(IMF)。一个 IMF 需要满足两个条件:函数局部极值点和零点数目最多相差一个;且函数局部极大值点构成的包络线(上包络线)和局部极小值点构成的包络线(下包络线)的均值为零。

假设原始信号序列  $p(t)$  含  $m$  个信号点,  $p(t)$  经过 EMD 得到

$$p(t) = \sum_{i=1}^n q_i(t) + r(t), \quad (1)$$

式中  $q_i(t)$  ( $i=1, \dots, n$ ) 是从原信号中分解得到的前  $n$  层 IMF, 这些信号叠加包含了原信号中的高频噪声以及周期性信号。  $r(t)$  为信号  $p(t)$  中含的趋势项, 趋势项里包含后几层 IMF 和分解残余项。可以采用能量比值法来确定  $n$  的值<sup>[27]</sup>。比值法是定义  $q_i(t)$  的零点数目比(RZCN)

$$R_i = \frac{z_i}{z_{i+1}}, \quad (2)$$

式中  $z_i$  为  $q_i(t)$  的零点数目。根据 EMD 分解得到的前  $n$  层 IMF 的特性,  $q_i(t)$  的频率近似是  $q_{i+1}(t)$  频率的两倍, 所以  $R_i \approx 2$ 。所以  $n$  为满足  $R_i \approx 2$  的最大  $i$  值。为减小误警概率, 同时用能量法对 IMF 的能量提出约束, 定义  $q_i(t)$  的能量为

$$E_i = \sum_{k=1}^m |q_i(t_k)|^2, i = 1, \dots, n. \quad (3)$$

对仅有白噪声和周期性信号构成的信号序列, 其能量是随  $i$  逐级递减的。因此,  $n$  也是满足能量逐级递减的最大  $i$  值。综合能量比值法,  $n$  的取值为满足比值  $R_i \approx 2$  且能量逐级递减的最大  $i$  值。求得  $n$  值以后, 将原始信号中前  $n$  层 IMF 叠加, 就得到去除低频趋势项预处理完的信号。

### 3.2 EMD 算法提取数据低频项

下面用 EMD 方法来预处理奥地利 Graz 站千赫兹激光测量系统得到的 Ajisai 卫星的测距回波 O-C 残差数据。图 1 为系统测量得到的卫星 O-C 残差数据。

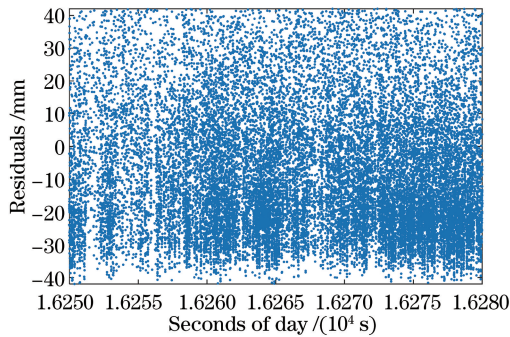


图 1 2010 年 5 月 7 日测量的时长 30 s 的 O-C 残差数据  
Fig. 1 Interval of 30 s O-C residuals measured at 7/5/2010

根据文献[28], 当处理的数据点数为  $N$  时, EMD 分解得到的 IMF 数应小于或约等于  $\log_2 N$ 。对于这段数据  $N=30000$ ,  $\log_2(30000)=14.87$ 。对测距回波 O-C 残差进行 EMD 后, 得到 14 个 IMF (这里将分解残余项也当作一个本征模式函数  $q_{14}$ )。各 IMF 在时域中的波形图如图 2 所示。零点数目比和能量分别如表 1 和图 3 所示。

表 1 经验模式分解得到的 IMF 的零点数目比  
Table 1 RZCN of IMF obtained by EMD

IMF	$q_1$	$q_2$	$q_3$	$q_4$	$q_5$	$q_6$	$q_7$	$q_8$	$q_9$	$q_{10}$	$q_{11}$	$q_{12}$	$q_{13}$
RZCN	1.7	1.7	1.6	1.8	1.9	2.0	2.0	2.0	2.2	1.9	1.8	3.2	Inf

从表 1 和图 3 中可以看出, 满足  $R_i \approx 2$  且能量逐级递减的最大  $i$  值是 11, 所以  $\sum_{i=1}^{11} q_i(t)$  为去除趋势项以后的测量数据。

图 4 中(a)图给出了没有经过处理的原始 O-C 残差数据的周期图, 可以看出在低频段, 趋势项和低频噪声的频谱峰值会淹没包含卫星自转信息的频谱峰值。图 4(b)和(c)分别是采用多项式拟合方法和 EMD 方法去除低频项得到的测量数据的周期图, 与原始信号的周期图相比, 两种方法都有效地去除了一部分低频噪声和数据趋势项。图 4(b)低频部分仍存在代表低频噪声或是趋势项的较高谱峰, 而图 4(c)的低频部分谱峰

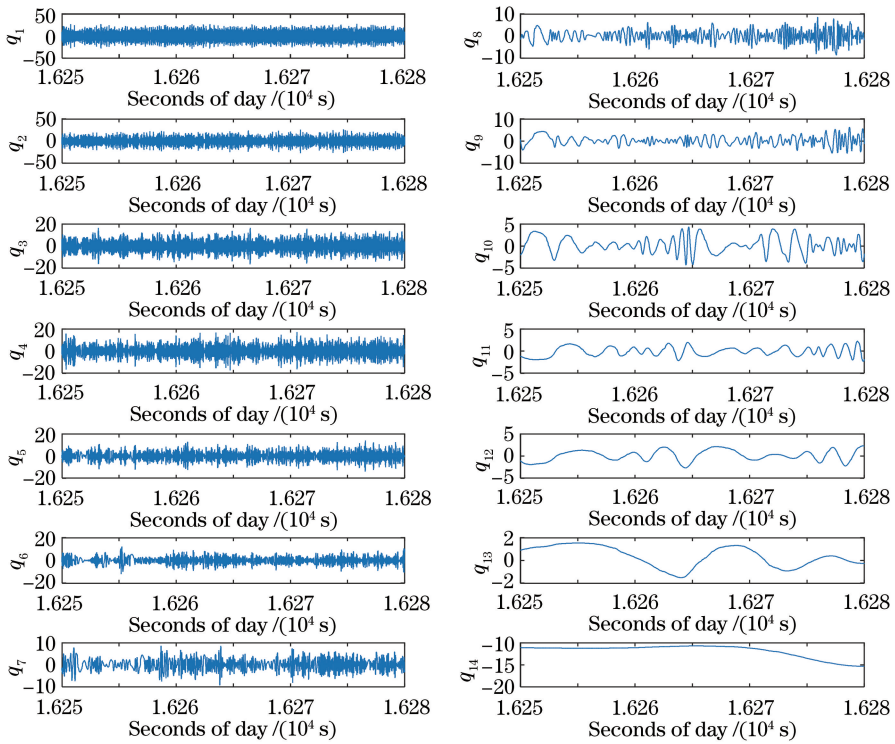


图 2 各 IMF 在时域中的波形图

Fig. 2 Waveforms of each IMF in the time domain

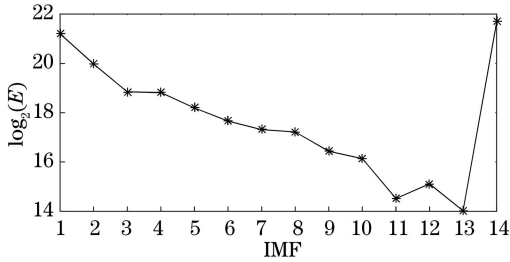


图 3 分解得到的各 IMF 的能量

Fig. 3 Energy of each IMF obtained by decomposition

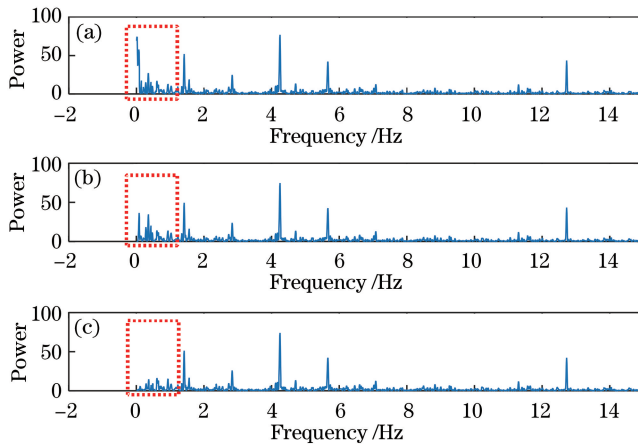


图 4 EMD 和最小二乘法去除趋势项效果对比。(a)原始周期图;(b)采用最小二乘法去除趋势项周期图;  
(c)采用 EMD 去除趋势项周期图

Fig. 4 Comparison on effects of detrending term between EMD and least square method. (a) Periodogram of original data; (b) periodogram of least square method detrending term; (c) periodogram of EMD detrending term



则对应 Ajisai 卫星上角反射器的周期性旋转运动,并且其他包含旋转运动信息的谱峰保持不变。

明显地,从周期图低频部分的谱峰可以看出 EMD 方法去除趋势项效果更好并且可以自适应地处理数据。但是由于 EMD 分解信号耗时较多多项式拟合方法长,在这个方面有待进一步改进和完善。

## 4 快速 Lomb-Scargle 算法

### 4.1 快速 Lomb-Scargle 算法

#### 4.1.1 Lomb-Scargle 算法

Lomb N R<sup>[29]</sup> 在 1976 年基于最小二乘谱分析的思想提出 Lomb 算法,算法采用正弦和余弦函数作为基函数,对测量数据序列进行最小二乘拟合,来估计数据的功率谱密度。算法可对非等间隔采样的数据序列进行频谱分析,提取其中隐藏的周期性信号的频率。Scargle J D<sup>[30]</sup> 在 1982 年对算法公式进行了化简和进一步完善。下面简述整个 Lomb-Scargle 算法的过程。

假设在时间点  $t_j (j=1, \dots, N)$  分别记录  $N$  个观测值  $h(t) = h_j$ , 首先计算所有观测值的均值和方差

$$\bar{h} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N h_j, \sigma^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N (h_j - \bar{h})^2, \quad (4)$$

然后,对于每一个角频率  $\omega$ , 计算得到一个时间偏移量  $\tau$

$$\tan(2\omega\tau) = \frac{\sum_{j=1}^N \sin(2\omega t_j)}{\sum_{j=1}^N \cos(2\omega t_j)}, \quad (5)$$

最后求 Lomb-Scargle 周期图

$$P_N(\omega) = \frac{1}{2\sigma^2} \left\{ \frac{\left[ \sum_{j=1}^N (h_j - \bar{h}) \cos \omega(t_j - \tau) \right]^2}{\sum_{j=1}^N \cos^2 \omega(t_j - \tau)} + \frac{\left[ \sum_{j=1}^N (h_j - \bar{h}) \sin \omega(t_j - \tau) \right]^2}{\sum_{j=1}^N \sin^2 \omega(t_j - \tau)} \right\}. \quad (6)$$

下面分析整个 Lomb-Scargle 算法的运算量。当对具有  $N$  个观测值的数据序列进行频谱分析时,假设需要分析  $N_\omega$  个频率点,那么从周期图的计算公式中可以得出,算法的运算量至少是  $NN_\omega$  的量级。具体来讲,对每个频率点  $\omega$  计算  $P_N(\omega)$  时,在采用倍角公式简化(5)式和(6)式的计算后,需要做的运算除了约  $8N$  量级的加减运算和数次乘除运算外,还有  $2N$  量级的三角函数的计算。由于在计算机运行程序时,一般采用泰勒级数展开的方法近似计算三角函数,这会导致总的运算量很容易达到  $10^2 NN_\omega$  量级。这样,当 Lomb-Scargle 算法应用在激光测距回波数据分析时,对于目前较为先进的千赫兹测距系统,其每圈测量得到的数据点数  $N$  非常大,导致算法的运算量大,耗时很长,大大限制了此算法的应用。例如,Kirchner G 等<sup>[13]</sup> 提到 Graz 站测得的典型的 Ajisai 卫星激光测距资料一圈时长为 15 min,用 3 GHz 的电脑采用 Lomb 算法需要 5 天时间来分析 195 圈的 Ajisai 数据。另外,汤儒峰等<sup>[25]</sup> 对云台激光测距系统测量回波数据分析时,需要将数据分为 7 s 的小段进行分析,这样处理的一个重要原因就是每次处理的点数过多,导致 Lomb 频谱分析耗时过长,影响数据处理效率。

#### 4.1.2 快速 Lomb-Scargle 算法

Press 等<sup>[31-32]</sup> 也注意到了 Lomb 算法计算量随处理的数据点数  $N$  增加而迅速增大的问题,并于 1989 年提出了解决方法,主要是将快速傅里叶变换(FFT)用于(6)式周期图公式中的系数计算,来降低其运算量。

具体的方法是首先定义 4 个系数

$$S_h = \sum_{j=1}^N (h_j - \bar{h}) \sin(\omega t_j), \quad (7)$$

$$C_h = \sum_{j=1}^N (h_j - \bar{h}) \cos(\omega t_j), \quad (8)$$

$$S_2 = \sum_{j=1}^N \sin(2\omega t_j), \quad (9)$$

$$C_2 = \sum_{j=1}^N \cos(2\omega t_j). \quad (10)$$

然后(6)式就可以化为以下表达式:

$$P_N(\omega) = \frac{1}{\sigma^2} \left\{ \frac{[C_h \cos(\omega\tau) + S_h \sin(\omega\tau)]^2}{N + C_2 \cos(2\omega\tau) + S_2 \sin(2\omega\tau)} + \frac{[S_h \cos(\omega\tau) - C_h \sin(\omega\tau)]^2}{N - C_2 \cos(2\omega\tau) - S_2 \sin(2\omega\tau)} \right\}. \quad (11)$$

如果  $t_j$  是等间隔的时间点,那么(7)~(10)式中的 4 个系数就分别是两个 FFT 计算结果的实部和虚部,可以很快计算得到。对于非等间隔采样的观测值  $h_j (j=1, \dots, N)$ ,可以采用插值来求(7)~(10)式中的 4 个系数值,具体过程如下<sup>[31-32]</sup>。

已知函数  $f(t)$  在非均匀时刻  $t_j$  处的采样值  $f(t_j) = f_j$ 。另外有一已知表达式的函数  $g(t)$ ,则可求出  $g(t)$  在均匀采样时刻  $t_k$  处的函数值  $g(t_k)$ ,由拉格朗日插值可以得到

$$g(t) \approx \sum_k \psi_k(t) g(t_k), \quad (12)$$

式中  $\psi_k(t)$  为各节点基函数。当  $f(t) = h(t) - \bar{h}$ ,  $g(t) = \sin(\omega t)$  时,由(12)式可以对  $S_h$  的表达式进行转换:

$$\begin{aligned} S_h &= \sum_{j=1}^N (h_j - \bar{h}) \sin(\omega t_j) = \\ &= \sum_{j=1}^N f(t_j) g(t_j) \approx \sum_{j=1}^N f(t_j) \left[ \sum_k \psi_k(t_j) g(t_k) \right] = \sum_k \left[ \sum_{j=1}^N f(t_j) \psi_k(t_j) \right] g(t_k) = \\ &= \sum_k \left[ \sum_{j=1}^N (h_j - \bar{h}) \psi_k(t_j) \right] g(t_k) = \sum_k (h_k - \bar{h}) \sin(\omega t_k), \end{aligned} \quad (13)$$

式中  $\sum_k (h_k - \bar{h}) = \sum_{j=1}^N (h_j - \bar{h}) \psi_k(t_j)$ 。同理,可以对  $C_h, S_2$  和  $C_2$  的表达式分别进行转换,得到

$$S_h = \sum_{j=1}^N (h_j - \bar{h}) \sin(\omega t_j) \approx \sum_k (h_k - \bar{h}) \sin(\omega t_k), \quad (14)$$

$$C_h = \sum_{j=1}^N (h_j - \bar{h}) \cos(\omega t_j) \approx \sum_k (h_k - \bar{h}) \cos(\omega t_k), \quad (15)$$

$$S_2 = \sum_{j=1}^N \sin(2\omega t_j) \approx \sum_k \sin(2\omega t_k), \quad (16)$$

$$C_2 = \sum_{j=1}^N \cos(2\omega t_j) \approx \sum_k \cos(2\omega t_k). \quad (17)$$

(12)式的精度只跟拉格朗日插值多项式  $\sum_k \psi_k(t) g(t_k)$  的函数曲线逼近  $g(t)$  函数曲线的程度有关,与函数  $f(t)$  以及非均匀时刻  $t_j$  无关,所以(14)~(17)式具有同样的特性。这样,  $S_h, C_h, S_2$  和  $C_2$  就可以采用 FFT 进行快速计算得到,大大减小了(5)式和(6)式的计算量。

#### 4.2 基于快速 Lomb-Scargle 算法的回波数据分析

下面对 EMD 去趋势项后的残差数据进行处理,计算环境为 win10 系统下的 Matlab 2012a,计算机内存 4 GB,处理器为 Intel Core(TM)2,主频 2.83 GHz。对比分析 Lomb-Scargle 算法与快速 Lomb-Scargle 算法处理结果与计算耗时。

表 2 Lomb-Scargle 算法和快速 Lomb-Scargle 算法处理时间

Table 2 Processing time of Lomb-Scargle algorithm and fast Lomb-Scargle algorithm

Algorithm	Lomb-Scargle algorithm	Fast Lomb-Scargle algorithm
Processing time /s	135.67	0.99

从图 5 和表 2 中可以看出,对预处理后的 O-C 残差数据采用 Lomb-Scargle 算法和快速 Lomb-Scargle 算法分别计算,得到的周期图基本一致。但是与标准的 Lomb-Scargle 算法相比,快速 Lomb-Scargle 算法的处理时间大大缩短,运算量降低了约两个数量级。

周期图中的几个明显谱峰所对应的频率分别为 1.417, 2.833, 4.250, 5.666, 7.083, 11.300, 12.730 Hz。

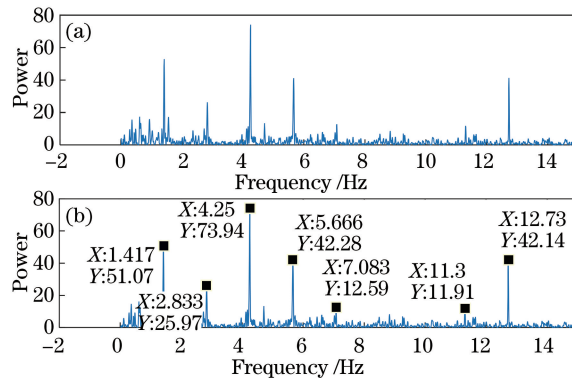


图 5 (a) Lomb-Scargle 算法和(b)快速 Lomb-Scargle 算法数据处理结果

Fig. 5 Data processing results of (a) Lomb-Scargle algorithm and (b) fast Lomb-Scargle algorithm

Ajisai 卫星上角反射器的分布情况如图 6 所示,该图取自参考文献[11]。星体上一共有 1436 个角反射器,分布在 120 个反射面板上,除了一个面板上有 8 个角反射器,其他面板上都有 12 个角反射器<sup>[11]</sup>。这些反射面板和 318 个曲面镜面板在星体表面间隔交叉分布。星体表面可视为有 15 个圆环,其中有 4 个圆环,每个环上严格等间距分布着 3 个反射面板。另外的环上,其中有 2 个,每个环上近似等间距分布 6 个反射面板;另外 2 个,每个环上近似等间距分布 9 个反射面板;其余的 2 个,每个环上严格等间距分布 9 个反射面板;有 5 个相邻的环,每个环上近似等间距分布 12 个反射面板<sup>[13,18]</sup>。周期图中前几个明显谱峰所对应的频率分别为 1.417,2.833,4.250,5.666 Hz,反映含反射面板个数分别是 3,6,9,12 的环的旋转运动。可以估算出 Ajisai 卫星自转的速率约为 0.472 Hz。而另外几个谱峰相对应的频率 7.083,11.300,12.730 Hz 则是相邻两个或者几个环上的角反射器同时反射激光所产生的。例如,11.300 Hz 可能是两个相邻的均分布 12 个反射面板的环同时反射激光信号所产生的谱峰(11.300 Hz/0.472 Hz $\approx$ 23.94)。

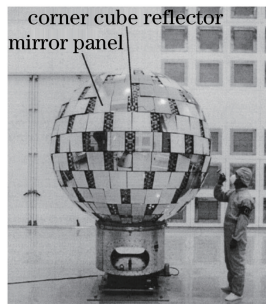


图 6 卫星 Ajisai 表面角反射器分布情况

Fig. 6 Distribution of corner cube reflector on the surface of satellite Ajisai

采用快速算法分别对 Graz 站测得的 4 圈 Ajisai 卫星的观测数据进行处理,在表 3 中统计每圈数据进行预处理后频谱分析的耗时和卫星自转速率估算结果。其中,卫星的自转速率为各圈数据分段处理后得出的自转速率的平均值。各圈数据以测量当天的简约儒略日标注。图 7 为针对每圈测量数据给出的其中一段数据频谱分析的周期图。

表 3 4 圈观测数据处理结果

Table 3 Data processing results of four passes

Pass	Time interval /s	Processing time of		Spin rate /Hz
		Lomb-Scargle algorithm /s	Processing time of fast Lomb-Scargle algorithm /s	
55274	700.460	3488.000	16.131	0.4728
55323	787.800	4305.247	22.215	0.4718
55357	814.300	7935.155	30.271	0.4710
55601	390.920	3246.721	12.218	0.4664

从表 3 中可以看出,采用快速 Lomb-Scargle 算法处理 4 圈 Ajisai 数据总的时间与标准的 Lomb-Scargle

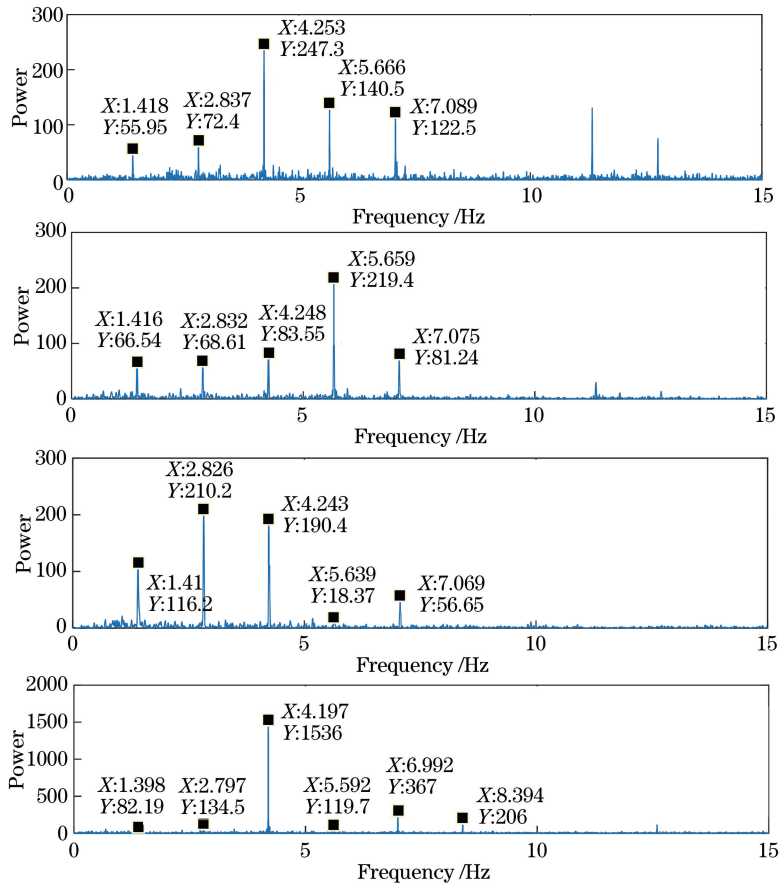


图 7 4 圈数据的周期图

Fig. 7 Periodograms of four passes

算法处理耗时相比,降低了约两个数量级。并且可以分析,快速 Lomb-Scargle 算法提高运算速度是由于采用了 FFT,运算过程的改变类似于 FFT 对于离散傅里叶变换(DFT)计算过程的优化。所以待处理的数据点数越多,运算量就减小得越多。当处理的总数据点数为  $N$  个时,DFT 和 FFT 运算量之比约为  $2N/\log_2 N$ 。但由于在采用 FFT 计算(7)~(10)式中的 4 个系数时,采用了拉格朗日插值和近似计算,计算量降低的量级并没有 DFT 和 FFT 之间那么大。

从表 3 和图 7 中的数据都可以看出 Ajisai 卫星自转速率逐渐减缓,与文献[11]和文献[13]的研究结论相符。但是由于数据量较少,无法拟合分析得到卫星自转速度减缓的具体表达式。另外,每次激光测距实验时,卫星自转使得直接反射激光的卫星部位不同,导致每圈不同时刻或者每一圈频谱的峰值均不相同。将这样的特性与卫星上角反射器面板的实际分布情况相结合,可以用来估计分析卫星自转的具体姿态。

## 5 结 论

提出了一种基于快速 Lomb-Scargle 算法的旋转卫星激光测距回波数据处理方法。首先用 EMD 方法通过筛选将测量数据自适应地分解为数个 IMF,从中去除低频趋势项。然后采用快速 Lomb-Scargle 算法做出相应周期图,得到卫星的自转速率。采用该方法处理了 4 圈奥地利 Graz 站千赫兹激光测距系统 Ajisai 卫星的实测数据,给出了各圈 Ajisai 卫星自转的速率。结果表明,该方法可以大大降低数据分析运算量,减少处理时间。目前偏重于算法的改进以提高数据处理效率,并结合周期图对卫星的运动状态给出了初步的分析。下一步工作考虑对其他旋转卫星的激光测距数据进行处理,并在此基础上进一步分析卫星的长期自转速率变化以及自转轴方向等更多的卫星姿态信息。



致谢 感谢奥地利 Graz 站的 Kirchner G 博士和澳大利亚空间环境研究中心的 Kucharski D 博士提供的 Ajisai 卫星的实测数据以及在激光测距数据分析方面提出的非常有价值的建议;另外感谢中国科学院云南天文台李语强副研究员在数据处理方面提出的宝贵意见。

## 参 考 文 献

- [1] Sun Mingguo, Gao Pengqi, Shen Ming, *et al.* Combined tracking and orbit determination for space objects using laser and optics measurements[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(7): 071203.  
孙明国, 高鹏骐, 沈 鸣, 等. 空间目标的激光和光学两种观测技术联合定位[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(7): 071203.
- [2] Meng Wendong, Tang Kai, Deng Huarong, *et al.* Research and experiment of satellite laser ranging with 1064 nm wavelength[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(s1): s112006.  
孟文东, 汤 凯, 邓华荣, 等. 1064 nm 波长卫星激光测距技术和实验研究[J]. *光学学报*, 2015, 35(s1): s112006.
- [3] Luck J, Moore C, Greene B. Autonomous laser ranging results from mount Stromlo[C]. 12<sup>th</sup> International Workshop on Laser Ranging, 2000: 2212.
- [4] Ricklefs R L, Shelus P J. Poisson filtering of laser ranging data[C]. 8<sup>th</sup> International Workshop on Laser Ranging, 1993: 15593.
- [5] Kirchner G, Koidl F, Friederich F, *et al.* Laser measurements to space debris from Graz SLR station[J]. *Advances in Space Research*, 2013, 51(1): 21-24.
- [6] Degnan J J. Optimization of the correlation range receiver parameters in SLR2000[C]. 13<sup>th</sup> International Workshop on Laser Ranging, 2002: 327.
- [7] Zhao Peng, Zhang Yan, Zhang Xiaoya, *et al.* Echo online extraction for diffuse reflection laser ranging[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(10): 1028002.  
赵 鹏, 张 艳, 张小亚, 等. 激光漫反射测距回波信号在线提取方法[J]. *光学学报*, 2015, 35(10): 1028002.
- [8] 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.
- [9] Liu Yanyu, Wu Xiaoping, Gao Hao, *et al.* Data pre-processing algorithm of satellite laser ranging based on curve recognition from points cloud[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2011, 31(1): 105-108.  
刘雁雨, 吴晓平, 高 皓, 等. 基于点云曲线辨识的卫星激光数据预处理算法[J]. *大地测量与地球动力学*, 2011, 31(1): 105-108.
- [10] Liu Tong, Chen Hao, Shen Ming, *et al.* Effective echo extraction for space debris laser ranging using randomized Hough transform[J]. *Chinese J Lasers*, 2016, 43(4): 0408002.  
刘 通, 陈 浩, 沈 鸣, 等. 随机 Hough 变换提取空间碎片激光测距有效回波[J]. *中国激光*, 2016, 43(4): 0408002.
- [11] Otsubo T, Amagai J, Kunimori H, *et al.* Spin motion of the AJISAI satellite derived from spectral analysis of laser ranging data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, 38(3): 1417-1424.
- [12] Bianco G, Chersich M, Devoti R, *et al.* Measurement of LAGEOS-2 rotation by satellite laser ranging observations[J]. *Geophysical Research Letters*, 2001, 28(10): 2113-2116.
- [13] Kirchner G, Hausleitner W, Cristea E, *et al.* Ajisai spin parameter determination using Graz kilohertz satellite laser ranging data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, 45(1): 201-205.
- [14] 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.
- [15] Kucharski D, Kirchner G, Cristea E, *et al.* ETALON spin period determination from kHz SLR data[J]. *Advances in Space Research*, 2008, 42(8): 1424-1428.
- [16] Kucharski D, Kirchner G, Otsubo T, *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.
- [17] 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.
- [18] Kucharski D, Otsubo T, Kirchner G, *et al.* Spin axis orientation of Ajisai determined from Graz 2 kHz SLR data[J]. *Advances in Space Research*, 2010, 46(3): 251-256.

- [19] Kucharski D, Kirchner G, Koidl F. Spin parameters of nanosatellite BLITS determined from Graz 2 kHz SLR data[J]. *Advances in Space Research*, 2011, 48(2): 343-348.
- [20] Kucharski D, Kirchner G, Lim H C, *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.
- [21] Kucharski D, Lim H C, Kirchner G, *et al.* Spin parameters of LAGEOS-1 and LAGEOS-2 spectrally determined from Satellite Laser Ranging data[J]. *Advances in Space Research*, 2013, 52(7): 1332-1338.
- [22] Kucharski D, Otsubo T, Kirchner G, *et al.* Spectral filter for signal identification in the kHz SLR measurements of the fast spinning satellite Ajisai[J]. *Advances in Space Research*, 2013, 52(5): 930-935.
- [23] Kucharski D, Otsubo T, Kirchner G, *et al.* Spectral response of Experimental Geodetic Satellite determined from high repetition rate SLR data[J]. *Advances in Space Research*, 2013, 51(1): 162-167.
- [24] Kucharski D, Kirchner G, Koidl F, *et al.* Attitude and spin period of space debris envisat measured by satellite laser ranging[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(12): 7651-7657.
- [25] Tang Rufeng, Li Yuqiang, Li Xi, *et al.* Spin rate determination of Ajisai based on high frequency satellite laser ranging [J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(6): 0608010.  
汤儒峰, 李语强, 李 熙, 等. 基于高重频卫星激光测距测算 Ajisai 卫星自转速率[J]. *中国激光*, 2015, 42(6): 0608010.
- [26] Huang N E, Shen Z, Long S R, *et al.* The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[C]. *Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1971, 454: 903-995.
- [27] Moghtaderi A, Flandrin P, Borgnat P. Trend filtering via empirical mode decompositions[J]. *Computational Statistics & Data Analysis*, 2013, 58(1): 114-126.
- [28] Wu Z H, Huang N E. Ensemble empirical mode decomposition: a noise-assisted data analysis method[J]. *Advances in Adaptive Data Analysis*, 2009, 1(1): 1-41.
- [29] Lomb N R. Least-squares frequency analysis of unequally spaced data[J]. *Astrophysics and Space Science*, 1976, 39(2): 447-462.
- [30] Scargle J D. Studies in astronomical time series analysis II : Statistical aspects of spectral analysis of unevenly spaced data[J]. *The Astrophysical Journal*, 1982, 263(2): 835-853.
- [31] Press W H, Rybicki G B. Fast algorithm for spectral analysis of unevenly sampled data[J]. *The Astrophysical Journal*, 1989, 338: 277-280.
- [32] Press W H, Teukolsky S A, Vetterling W T, *et al.* Numerical recipes 3rd edition: The art of scientific computing[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007: 685-691.