

文章编号: 1001-3806(2008)04-0417-03

## 卫星激光测距数据处理算法的研究进展

房庆海,赵永丽

(冶金自动化研究设计院,北京 100071)

**摘要:** 简述了卫星激光测距系统研究背景和发展现状,阐述了数据处理算法在卫星激光测距技术中的重要地位和作用,重点介绍了当前国际上普遍采用的一些数据处理算法的发展应用情况以及一些先进的数据处理算法的研究进展,包括屏幕处理技术、泊松统计滤波算法、相关检测算法等。最后展望了卫星激光测距技术及其数据处理算法的发展方向。

**关键词:** 光信号处理;卫星激光测距;数据处理算法;滤波算法;标准点

**中图分类号:** V557<sup>+</sup>.4 **文献标识码:** A

### The research progress in data processing algorithm of satellite laser ranging

FANG Qing-hai, ZHAO Yong-li

(Automation Research and Design Institute of Metallurgical Industry, Beijing 100071, China)

**Abstract:** The research background and development states of satellite laser ranging (SLR) systems were summarized. The data processing algorithm played an important part in the development of the SLR technique. So the applied aspects and research development states of the widespread and some advanced data processing algorithms at home and abroad were reviewed, including screen processing technique, Poisson statistic filter algorithm and correlation detection algorithm et al. Finally the research progress and developmental direction in data processing algorithms of SLR were also presented.

**Key words:** optical signal processing; satellite laser ranging; data processing algorithm; filter algorithm; normal point

### 引 言

目前,卫星激光测距(satellite laser ranging, SLR)已成为卫星精密定轨观测的主要手段之一,也是各种定轨观测手段中精度最高的一种。经过了 40 多年的发展,卫星激光测距技术取得了很大的进展。

在测距精度上,从最初的米级逐步提高到分米级、厘米级,现在处于亚厘米级,正向毫米级发展;在测距能力上,从最初的 1000km~2000km 提高到  $2 \times 10^4$  km 以上,激光测月的测距能力已经达到  $38 \times 10^4$  km;在自动化程度上,从开始时期的人工目视跟踪,发展到今天计算机控制、自动跟踪的新一代全自动化激光测距站;在测距波长上,目前正在研制的双色/多色激光测距系统,与现在普遍采用的单色测距系统相比,不再需要大气物理参量和大气模型的修正,而且可以达到更高的精度;在测距站的建设上,早期只有几个固定站,目前全世界约有 50 多个观测站,其中包括约十余个流动站<sup>[1]</sup>。

作者简介:房庆海(1965-),男,高级工程师,硕士生导师,主要从事控制理论与控制工程、卫星激光测距等方面的研究工作。

Email: fangqh@arim.com

收稿日期:2007-04-04;收到修改稿日期:2007-08-29

在卫星激光测距中,由于探测器的热噪声和天空背景噪声会对设备产生误触发,导致观测数据中存在异常值。尤其在白天测距时,即使采用多种滤波技术,如采用空间滤波技术、光谱滤波技术、时间滤波技术等,背景噪声仍然有数量级的增加,使观测资料中夹杂大量异常值。所以,必须对观测数据进行有效的数字滤波,剔除大量的噪声,提取有效信号,将好的数据归档,为应用研究之用。

随着卫星激光测距技术的快速发展,台站观测软件也在不断提高,新的数据处理算法也相继出现,它是衡量测距系统性能的一个重要指标,并为获取可靠观测数据做出保证。下面简要介绍国际上卫星激光测距数据处理方法的研究进展。

### 1 屏幕处理技术

常规的数据处理方法一般采用人工屏幕处理。白天的激光测距中,背景噪声比夜晚要大  $10^6$  倍,尽管已经尽力提高卫星轨道预报,并采用超窄带滤光片、小的接收光阑和很窄的距离门等措施进行滤波,噪声量级仍然很大,从大量噪声中识别出微弱的卫星激光回波十分困难。这种情况下,常规的多项式曲线拟合等处理方法不能有效处理,采用计算机屏幕处理方法,通过

人机对话剔除异常值,此方法提取信号的能力很强,能有效地处理大噪声的观测资料<sup>[2]</sup>。上海天文台 SLR 站和 Zimmerwald SLR 站<sup>[3]</sup>都曾采用这种屏幕处理方法,取得了良好的效果,但这种技术有一定的局限性,主要依赖人工经验,自动化程度不高。

## 2 Graz快速回波辨识算法

Graz站率先实现了千赫兹卫星激光测距技术,回波率大大提高,如表 1所示。在此基础上 Graz站发展

表 1 Graz 10Hz系统与千赫兹系统比较

Graz激光测距系统	10Hz激光 (2003-09)	2kHz激光 (2003-10)
波长	532nm	532nm
重复频率	10Hz	2kHz
能量 脉冲	30mJ	400μJ
脉冲宽度	35ps	10ps
CHAMP回波点数 圈	1000	300000

了一种快速回波辨识算法<sup>[4]</sup>,这种算法基于一种非常简单的策略:每次探测到 stop 事件,计算残差,然后把它与上次存储的 1000个残差值进行比较;如果在特定的带宽内(如 100ps),残差的最小个数大于某门限值,则将该新的残差打上标签,作为辨识到的信号,显示在屏幕上;该门限值可以由人工进行设定,根据虚警概率调节其灵敏度;接受带宽可以根据卫星、距离门宽和其它相关参量进行调整。该算法快速、有效,而且能对不同的卫星给出良好的人机界面;对低轨卫星有很高的探测概率(接近 100%),但对于高轨卫星,探测成功率比较低(在 1%以下)。

上海 SLR 站<sup>[5]</sup>进行了系统更新,应用了 Graz站的回波辨识算法,并嵌入到他们的软件程序中,比以往的人工操作更快、更有效。

## 3 SLR2000系统的相关检测算法

弱信号与噪声的区别主要是统计特征方面的,而不是他们强度的差别。利用信号有良好的时间相关性和噪声的时间不相关性(或仅在短时间内部分相关),能够把深埋于噪声中的信号提取出来,这种相关接收提取方法是弱信号检测的基础<sup>[6]</sup>。

在白天测距中,SLR2000系统采用了相关检测算法<sup>[7]</sup>,从大量日光背景噪声中提取卫星单光子回波,利用的就是回波信号的时间相关性。这种算法如图 1所示,由于单光子卫星激光回波和背景噪声的累积效应,在每一个单元中的光子个数,都与一个框门限值相比较;如果光子个数超过了这个门限值,则这个距离窗被认为包含信号,否则就认为包含噪声;距离窗的

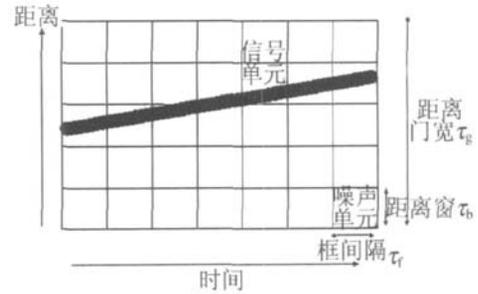


图 1 相关检测原理和测量值与计算值的差值

大小  $\tau_0$ 、框间隔  $\tau_f$  和门限阈值的优化选择,不但依靠激光器和接收机的瞬时性能,而且还与当地天气状况有关,天气条件影响光子信号的平均接收效率和日光背景噪声的量级。因此,相关检测接收机的设计必须足够灵活,能够适应操作、天气条件和卫星目标的改变;它还要能够处理由于天空云层影响、望远镜指向误差等引起的异常数据。对于更低的信号强度或者更高的噪声量级,相关检测技术也会失效, $N/M$  ( $M > N$ ) 技术<sup>[8]</sup>能有效地处理这种状况下的数据。尽管这种技术需要花费更长的时间去探测信号,但它能够更好的滤除噪声。关于这种技术的研究还在继续。

## 4 泊松统计滤波算法<sup>[9]</sup>

高噪声、低信号强度环境的数据滤波是月球激光测距 (lunar laser ranging, LLR) 和卫星激光测距在常规测距中经常遇到的情况。对于卫星激光测距,特别是在月球激光测距的低信号强度的环境中,大部分操作是在单光子的量级上进行的。即使没有回波信号,来自任何噪声源的无用的光子也可能触发单光子探测器电子。所以对于混有大量噪声的数据,辨识有效回波将是非常困难的事情。从长期的经验来看,除了物理滤波以外,一直考虑采用统计滤波方法。

泊松分布给出了在给定的时间间隔  $x$  中,在总体样本  $n$  中有  $k$  个随机事件发生的概率 ( $k$  为整数)。概率方程为:

$$P(k) = \frac{x^{[k]} e^{-x}}{[k]!} \quad (1)$$

式中,  $[k]$  是小于  $k$  的最大整数。

假设在短的时间间隔内,各种误差影响使卫星激光光子回波的残差落在未知斜率的一小段直线上,背景噪声在距离门内仍然是随机分布,可以近似假定背景噪声遵循均匀分布特征,通过找出背离均匀分布规律的一簇信号就可以辨识出回波信号。方法就是用倾斜的矩形窗在短时间间隔内对数据进行扫描,辨识出局部信号趋势,根据泊松密度函数准则滤除噪声。

McDonald站的工作人员已经将泊松统计滤波技术应用到 LLR 和 SLR 观测数据处理中,取得了良好的效果。澳大利亚 Stromlo SLR 站也在其数据处理软件

中应用了泊松统计滤波算法,并且实现了无人职守的全自动观测<sup>[10]</sup>。

## 5 其它数据处理算法

数据平滑是数据处理的关键一步,一般最常用的方式就是多项式拟合,然而高阶多项式容易产生振荡,在处理大量的卫星激光测距的残差数据时,这个缺点非常明显。SAMWEL 等人<sup>[11]</sup>提出一种平滑近似方法——样条技术。

样条技术是基于细分的方法,即将整个数据分成小的子间隔,然后分别在这些小间隔内应用切贝雪夫多项式对数据进行拟合,最后在这些小间隔的边界点进行多项式匹配。这项技术可以对数据进行低阶多项式拟合,能够提供更好的标准偏差。

对于激光测月来说,如果总的回波个数非常小,或者噪声量极大,在这种情况下,就不能仅仅依靠计算期望回波的最大个数来确定探测到的光子是否来自角反射器反射回的光子。JEFFERYS 等人<sup>[12]</sup>提到一种不同的方法——贝叶斯统计分析方法。恶劣的天气条件可能会进一步恶化回波信号,有些信号用当前的分析方法不能被提取出来,贝叶斯分析方法能帮助恢复这些信号,有助于提高标准点的误差估计。

这个方法已经通过了激光测月仿真数据的测试。如果这种方法能得到实际应用,卫星激光测距数据处理也可以借鉴,会大大加强回波信号的辨识能力。

## 6 标准点算法

目前,普遍应用的标准点算法是 Herstmonceux 标准点算法。标准点算法处理过程大致包括两个阶段:一是利用  $n \times \infty$  准则剔除噪声及可疑值,对残差进行平滑拟合;二是对有效信号进行标准点生成。

NASA 标准点算法 (NASA generic normal point algorithm, GNP-1) 是在 Herstmonceux 标准点算法的基础上发展起来的<sup>[13]</sup>。Herstmonceux 标准点算法是基于高精度的预报值来处理的,预报值经过先验的时间偏差修正和星地钟差修正等,预报值经过修正可以降低残差值,就可以选择合适的距离窗尽可能地剔除异常值。但是如果没有现存的理论支持这些修正,预报不太精确时,这种算法处理过程就会出现异常。而 GNP-1 算法基于一圈数据估计本身的偏差函数,但异常值的存在可能恶化偏差函数的估计。SEAGO 等人<sup>[13]</sup>针对 GNP-1 算法的不足,提出了改进措施。新的算法应用了最小二乘标准方程的数字化解法,明确了拟合函数最优化的测量准则,在最初的异常值剔除时应用了鲁棒估计策略,应用简单的中值滤波结合其它的鲁棒

估计,有助于辨识大量噪声数据中的信号趋势。

## 7 卫星激光测距系统及其数据处理方法的发展与展望

随着卫星激光测距技术的飞速发展,相应的数据处理算法也取得了很大的进展。卫星激光测距有很大的发展潜力,目前主要有以下 3 个发展方向。

(1) 千赫兹激光测距技术是现有激光测距技术的创新发展,具有相当的优势,是未来激光测距的发展方向。该技术的测距频率达上千赫兹,大大增加了回波点数据量,提高了标准点精度。必须发展相应的算法、软件,它能够完成从大量的噪声信号中提取微弱的回波信号。目前仅美国的 NASA 和奥地利的 Graz 站研究较为成功。作为千赫兹激光测距系统,有可能根据获得的大量返回数据跟踪卫星上可见的单个反射器。通过对每个角反射器的跟踪及分析,可获得关于卫星形状、姿态、运动等多方面的信息。这些信息可用于识别卫星类型、了解卫星姿态、诊断卫星故障等。

(2) 大气修正已成为限制 SLR 进一步提高测距精度的主要因素之一<sup>[14]</sup>。双波长激光测距系统进行卫星激光测距,可以不再通过模型进行大气修正,测量结果本身即可修正大气延迟,从而满足毫米级 SLR 系统的要求。该技术难度很大,需要研究可靠、有效的数据处理算法,实现毫米级精度的大气延迟测量。

(3) 固定于地面的卫星激光测距系统使用灵活性及适用范围相对较差,有必要考虑发展可移动的卫星激光测距系统。它可以改善测站分布不均的现实,还可以根据需要灵活地选取站位,跟踪我国自主研发或国外的低轨卫星,提供精密定轨服务。由于流动站常要运输移动,每到一个新站,软件系统都要进行转台精度校正、检测仪器状态、仪器中心定位点的确定等,在数据处理的过程中,必须考虑到这些因素。

### 参 考 文 献

- [1] HU J F. Study on two-wavelength satellite laser ranging [D]. Shanghai: Shanghai Observatory Academia Sinica, 2003: 1-3 (in Chinese).
- [2] ZHANG Zh P. Screen preprocess method for SLR data [J]. Annals of Shanghai Observatory Academia Sinica, 1993, 16 (14): 118-125 (in Chinese).
- [3] GURTNER W, POP E, UTZINGER J. Improvements in the automation of the Zimmerwald SLR station [C] // Proceedings of the 13th International Workshop on Laser Ranging Maryland: NASA Conference Publication, 2002: 1-9.
- [4] KRCHNER G, KO DL F. Graz kHz SLR system: design, experiences and results [C] // Proceedings of the 14th International Laser Ranging Workshop. San Fernando, Spain: NASA Conference Publication, 2004: 2-5.

(下转第 423 页)

功率增大而线性增大,并且从另一个侧面说明了耦合系统和光纤激光器实验的稳定性。

采用 II 号、III 号、IV 号、V 号腔镜时,激光输出光谱见图 7。可见,V 号腔镜输出光谱形状优于其它腔镜,

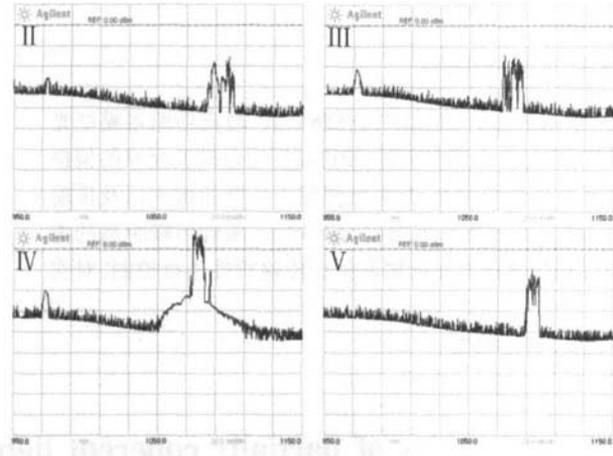


Fig 7 Spectra of output signal and pump laser

为稳定的多纵模输出,既无残余抽运光,也无放大自发辐射荧光输出,这是因为其后腔镜具有良好的选模作用(见图 6)。而其它后腔镜对各波长反射率几乎相同,不能有效消除残余抽运光,导致测得功率值不准确,并且模式竞争更加激烈。

从而可知,小功率抽运时若是采用光纤磨抛端面作后腔镜,则难以得到窄线宽和稳定的激光输出;若要消除输出中含有的荧光和残余抽运光,提高系统效能,获得特定的稳定的纵模输出,需要对后腔镜进行优化设计,使其具有良好的选模机制。

## 4 结 论

从速率方程出发,理论分析了不同情况下激光器

的输出特性,得出光纤最佳长度与后腔镜、抽运功率都有很大关系;通过选取最佳  $R_2$  可获得最大激光功率输出。采用国产大芯径掺镱光纤搭建了双包层光纤激光器,研究了后腔镜对激光输出的影响。实验中发现,增大  $R_3$  和  $R_2$  可降低激光阈值;采用选模作用好的后腔镜,可得到需要的激光波长,降低腔内的模式竞争,获得稳定的激光输出。故通过优化设计后腔镜,能够提高激光器的效率,获得稳定的纵模输出,优化系统的性能。

## 参 考 文 献

- [1] PASCHOTTA R, N LSSON J, TROPPER A C, *et al* Ytterbium-doped fiber amplifiers [J]. IEEE J Q E, 1997, 33 (7): 1049-1056.
- [2] MEIL, WANG Y, WANG Zh J, *et al* Numerical analysis of the transient-state behavior of  $\text{Yb}^{3+}$ -doped double-clad fiber laser [J]. Laser Technology, 2006, 30 (3): 225-231 (in Chinese).
- [3] JEONG Y, SAHU J K, PAYNE D N, *et al* Ytterbium-doped large-core fiber laser with 1kW continuous-wave output power [J]. Electron Lett, 2004, 40 (8): 470-472.
- [4] JEONG Y, SAHU J K, PAYNE D N, *et al* Ytterbium-doped large-core fiber laser with 1.36kW continuous-wave output power [J]. Optics Express, 2004, 12 (25): 6088-6092.
- [5] LIU C H, EHLERS B, DOERFEL F, *et al* 810W continuous-wave and single-transverse-mode fiber laser using 20 $\mu\text{m}$  core Yb-doped double-clad fibre [J]. Electron Lett, 2004, 40 (23): 1049-1050.
- [6] REN G G, HUANG J J. Major progress of U. S 2005' high-energy laser technology [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2006 (6): 3-9 (in Chinese).
- [7] KELSON I, HARDY A. Strongly pumped fiber lasers [J]. IEEE J Q E, 1998, 34 (9): 1570-1577.
- [8] WEI W L, YAN P, OU P. Numerical analysis and experimental results of output characteristics for strongly pumped  $\text{Yb}^{3+}$ -doped double-clad fiber laser [J]. Optical Technique, 2004, 30 (1): 13-16 (in Chinese).
- [9] CHEN B, CHEN L R, LIN Z Q, *et al* Selecting lasing wavelength by varying fiber length [J]. Chinese Journal of Laser, 1999, 26 (12): 1061-1065 (in Chinese).

(上接第 419 页)

- [5] ZHANG Zh P, YANG FM. Automated operational software at Shanghai SLR station [C]//Proceedings of the 13th International Laser Ranging Workshop. Maryland: NASA Conference Publication, 2002: 1-3.
- [6] ZHANG Zh Y, SUIX L. Faint signal digital correlation detection of laser ranging study and simulation [J]. Chinese Journal of Lasers, 2002, 29 (7): 661-665 (in Chinese).
- [7] DEGNAN J J. Optimization of the correlation range receiver parameters in SLR2000 [C]//Proceedings of the 13th International Laser Ranging Workshop. Maryland: NASA Conference Publication, 2002: 3-7.
- [8] MCGARRY J, CHEEK J, CONKLIN B, *et al* SLR 2000 automated system control software [C]//Proceedings of the 11th International Workshop on Laser Ranging. Frankfurt: Verlag Des Bundesamtes fur Kartographie und Geodasie, 1998: 5-8.
- [9] RICKLEFS R L, SHELUS P J. Poisson filtering of laser ranging data [C]//Proceedings of the 8th International Workshop on Laser Ran-

ging Maryland: NASA Conference Publication, 1992: 26-29.

- [10] LUCK J, MOORE C, GREENE B. Autonomous laser ranging results from mount stromlo [C]//Proceedings of the 12th International Workshop on Laser Ranging Matera: A.S.L., 2000: 2-12.
- [11] SAMWEL S W, METWALLY Z, MUKHAL J S, *et al* Analyzing the range residuals of the SLR data using two different methods [J]. NR IAG Journal of Astronomy and Astrophysics, 2005, 4 (1): 1-14.
- [12] JEFFERYS W H, RIES J G. Bayesian analysis of lunar laser ranging data [C]//Proceedings of the Conference at Pennsylvania State University. Berlin: Springer Verlag, 1997: 2-10.
- [13] SEAGO J H. Enhancements toward robust normal point generation [C]//Proceedings of 11th International Workshop on Laser Ranging. Frankfurt: Verlag Des Bundesamtes fur Kartographie und Geodasie, 1998: 1-8.
- [14] WANG H, LIS, ZHOU H. Correction of atmosphere delay for geoscience laser altimeter system [J]. Laser Technology, 2007, 31 (2): 169-171 (in Chinese).