

基于二值图像的卫星激光测距数据处理

李 熙^{1,2} 汤儒峰^{1,2} 李祝莲¹ 李语强¹ 伏红林¹

(¹ 中国科学院云南天文台, 云南 昆明 650011)
² 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要 为了改善激光测距数据处理中信号提取困难以及自动化程度还不高的现状,考虑激光测距数据的特征,结合二值图像处理和分析的技术提出一种新的提取测距信号的方法。先将原始数据映射为一幅二值图像,根据激光测距数据密度分布特点作第一次粗略的去噪,再根据信号形状特征作一次细去噪,将去噪后的图像矩阵逆映射回来。实验结果显示用于各种激光测距中的自动数据处理有很好的效果,可替代人工选点的激光测距数据提取方式。

关键词 测量; 光信号处理; 卫星激光测距; 信号提取; 图像处理; 连通域标记

中图分类号 P129; P111.3 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.1208005

Laser Ranging Data Processing Based on the Analysis of the Binary Image

Li Xi^{1,2} Tang Rufeng^{1,2} Li Zhulian¹ Li Yuqiang¹ Fu Honglin¹

(¹ Yunnan Observatories, Chinese Academy of Sciences, Kunming, Yunnan 650011, China)
² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract In order to improve the situation of laser ranging signal extraction problem and degree of automation, the feature of laser ranging data are listed, considering these feature and combination of binary image analysis a new method extracting the signal from the laser ranging data that contain a lot of noise is proposed. Before removing the noise the original data should be mapped into a binary image matrix in the method. According to the density of signal is higher than noise, the first step is done to remove the noise in the image matrix. The second step is done to remove the noise based on the feature that the signal is similar to a line in the image. The result of the image which has been processed should be inversely mapped back. The experimental results show that it is a potential method which can extract signal automatically and replace artificial methods.

Key words measurement; optical signal processing; satellite laser ranging; signal extraction; image process; connected component labeling

OCIS codes 070.2056; 100.2000

1 引 言

近年来,激光测距作为一种良好的测量技术被人们广泛地研究。文献[1—3]分别从测距方式、测距控制系统等方面来研究激光测距过程中所遇到的问题。总的来说,激光测距技术的发展大致在两个方向:一是应用各种方法和手段提高测距精度和观测数据量;二是提高系统的自动化程度,减少人力和

物力的消耗^[4]。

激光测距数据处理的研究对于提高系统的自动化程度,减少人力物力消耗有重要的作用。数据处理对于激光测距来说是非常重要的。

目前激光测距信号提取的方法没有对测距信号作更全面的分析而是侧重考虑测距信号残差的某一方面特征。这些方法往往是直接对测得的数据本身

收稿日期: 2014-05-12; 收到修改稿日期: 2014-07-03

基金项目: 国家自然科学基金(10803019)

作者简介: 李 熙(1989—),男,硕士研究生,主要从事卫星激光测距方面的研究。E-mail: xili@ynao.ac.cn

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)

进行分析和处理。屏幕处理技术是基于人机交互的操作,中国科学院上海天文台等一些台站都曾使用过这种技术^[5-6]。这种方法对常规测距有良好的效果,但自动化程度低。文献[7]指出目前大部分激光测距数据处理方法(信号提取不包括数据拟合)都类似柱状图法。这些算法一般要划分网格,统计网格内的数据点数,点数超出设定阈值的保留。阈值的设定、网格的划分对于不同的测距数据效果不一样,导致通用性不好。类似的还有泊松滤波算法^[8],该算法考虑信号的统计特征,同样也需要划分网格,并计数。GRAZ 测站用的算法是每个数据点与这个点前面的 1000 数据点作比较,差值在某个带内(100 ps)的次数多于某个整数(例如:5)被认为是测距信号^[9]。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)^[10]。SLR2000 系统采用相关检测算法^[11],该算法利用信号的时间相关性来提取信号。但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^[10]。文献[12]提出一种基于点云曲线辨识的卫星激光数据预处理算法。该算法先划分网格,在同一个时间跨度之内找到点数最多的小网格作为有效区域,同样在同一个时间跨度之内调节有效区域的大小和中心,直到有效区域不再改变为止。该算法对于常规测距数据有一定效果,但是,基本上只考虑距离方向上信号的统计特征,而且在回波光子很小的情况下效果不好。

总的来说,目前的这些算法主要针对测距信号的统计特征,对于激光测距信号整体的形状特征没有太多的涉及。针对这个问题,本文提出一种新的激光测距信号提取方法,充分考虑了测距信号的统计特征和整个信号序列的形状特征,对于那些数据

点作统一的标识。为此不直接对测得数据进行处理而是将数据先映射到二值图像矩阵中,利用数字图像处理和分析的方法去除噪声。

不同测距信号提取信号难度不一样。常规测距数据回波光子数量大,信号强,可直接通过屏幕处理的到大致信号点;但是漫反射测距中能够返回到地面观测站的激光光子比例远比常规测距的小^[13]回波数量很低,激光测月的数据有相似的特征。这里大致分为回波数量比较多的强信号数据和回波数量很少的弱信号数据。强信号数据较弱信号数据好处理一些,本文以弱信号数据作为示例说明了本方法的步骤并给出该弱信号数据的处理结果,并给出了一些常规测距数据处理结果。

2 基本原理

这里讨论的数据处理指的是对观测值与理论值残差的数据处理。根据文献[14]的论述,观测值与理论值之差(O-C)包括两项:时间偏差和距离偏差,并且可以表示为

$$\Delta\rho_i(t) = b + \rho'_i(t) \cdot \tau, \quad (1)$$

式中 $\Delta\rho_i$ 是残差, b 是距离偏差, τ 是时间偏差, $\rho'_i(t)$ 是速度矢量在斜距方向上的投影。由此可见理想情况所得残差信号序列为一曲线,实际上斜率略有变化。

激光测距数据有两个比较明显的特点: 1) 同一次测距所得数据中信号所在位置的数据密度相对较大; 2) 在适当的数据段内测距信号可视近似为一条线。这里不直接对数据进行处理,而是先将测距数据映射到一个图像矩阵中,图像矩阵反映了在合适尺度下每个点与点的距离关系。去除图像的噪声后再根据去噪后的二值图像还原测距信号。信号提取流程如图 1 所示。

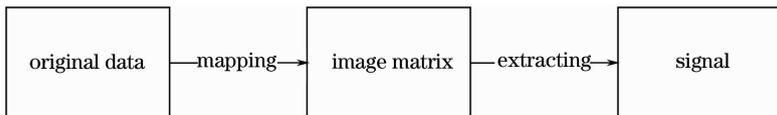


图 1 信号提取过程

Fig. 1 Procedure of signal extraction

3 方法与步骤

3.1 原始数据的映射

利用取整的方法将数据转化为二值图像。原始数据可精确到皮秒。为了图像处理方便,先将 O-C 放大一定的倍数,然后进行取整操作,取整方法可选四

舍五入法。一般情况下 O-C 必需经过放大操作再取整,而主波时刻数据视情况而定。例如:(478.64358053542, 0.00000007986)表示主波时刻为 478.64358053542 时的 O-C 为 0.00000007986。在主波时刻不放大时, O-C 放大 10^7 倍时取整为(479, 1)。若假设结果矩阵为 A , 则映射结果是使矩阵 A 的第

479 行第 1 列的元素的值为 1。映射所得的二值图像反映了点与点之间的距离和疏密程度。所得的二值图像方便后续的计算和处理,例如可以对图像区域做标记,可以去除和加上任意标记的点和区域,还可以分析区域间的线状分析。

映射生成新的二值图像矩阵的同时原数据保持不变。映射后的图像点和原始数据点是对应的。将映射后的图像点在原始数据里的序号保存下来,以便恢复信号时用。

故映射会得到两个结果:一是二值图像矩阵,这个矩阵用于去噪和信号提取;二是存着每一个数据序号的序号矩阵,这个矩阵用于恢复信号。

只要放大倍数足够大数据就可以映射到不同的像素,但是为了图像处理方便放大倍数需要选取一个合适的值。这个值虽然会导致两个数据点映射到同一个图像像素上,但是出现这种情况出现的概率很低。可以对映射到同一个像素的数据分配不同的序号以便区分,这样就不影响信号的恢复了。例如,对于漫反射测距信号, 10^7 是比较合理的一个放大倍数,此时重复映射的概率很低,同时映射生成的二值图像尺寸大小适宜,方便屏幕显示。

图像以像素为单位,理想情况下,每一个数据点映射到一个像素。经过处理,图像中的噪声会变为 0,而信号为 1,通过查找序号矩阵里对应的序号即可得到的到原始的值。图 2、3 分别是映射前的散点图(为了显示和操作方便进行了坐标的平移变换,不影响信号的提取)和映射后的二值图像。两幅图的方向不同,因为散点图的原点在左下角,而数字图像的原点设在左上角。

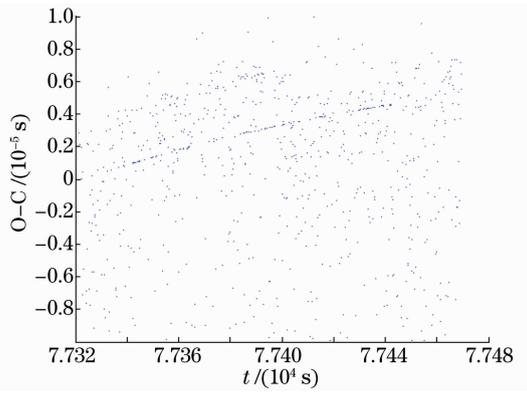


图 2 漫反射信号数据散点图
Fig.2 Scatter of week signal data

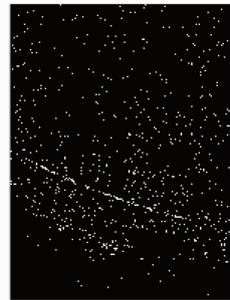


图 3 映射后的二值图像
Fig.3 Mapped binary image of data of Fig. 2

3.2 区域处理

3.2.1 区域的标记

一个像素 p 有三种邻域:4 邻域 $[N_4(p)]$ 、8 邻域 $[N_8(p)]$ 和对角邻域 $[N_D(p)]$ 。图像处理和分析中常用 4 邻域、8 邻域。对应于这 4 邻域分别衍生出 4 邻接、4 连通,8 邻接、8 连通等像素间的关系^[15]。三种邻域如图 4 所示。

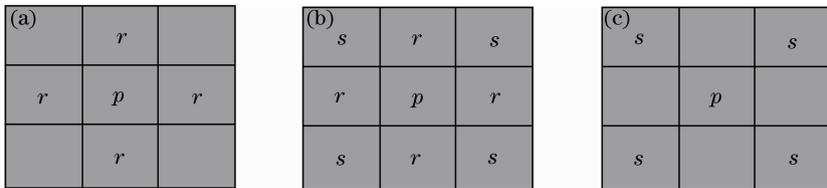


图 4 常用的像素邻域。(a) 4 邻域;(b) 8 邻域;(c) 对角邻域

Fig. 4 Common neighborhood of a pixel. (a) Four neighborhood; (b) eight neighborhood; (c) diagonal neighborhood

令 R 代表一幅图像中像素的子集。如果 R 是连通集,则 R 称为区域^[15]。一幅图像有若干个区域。为了区分不同区域,需要通过标记把他们分别提取出来,标记的简单方法就是检查各像素的连通性^[16]。所以标记根据所用的连通性(4 连通、8 连通等)不同也会有不同,标记后每个区域的所有像素分配同一个值。图 5 是一个区域标记的例子。

对标记过的图像可以求出每一个区域的各种性质,如连通域的面积(像素的总个数)、连通域的重心、连通域的围盒、连通域的外接多边形等。本文只涉及区域的面积和重心两个性质。图 5 所示例子中共有 4 个连通区域。

	1		2						
			2						
					3				
				3	3				
				3					
						4	4	4	
						4	4	4	
						4			

图 5 区域标记示例

Fig. 5 Example of regional mark

3.2.2 区域分离

区域面积的计算方式一般是对区域像素的记数^[16]。所以那些面积为 1 的区域是一个孤立的像素点，面积为 2 的区域内的点邻域内有 1 个像素点像素值为 1。卫星激光测距信号的第一个特点是测距数据中信号的密度大于噪声的密度。故连通域的面积越大则域内点是信号而不是噪声的可能性越大。所以需要将面积大的区域找出来，故区域面积小的暂时不考虑。但是面积小的区域也有可能是信号，把他们称为待定区域。最后根据面积大的区域找到待定区域中属于信号的区域。

设定一个合适阈值，将区域面积小的区域另存，从而实现将这两部分分离。阈值的大小由测距类型和经验所定。例如常规测距的信号强阈值设置大，而漫反射测距、月球激光测距的回波少阈值设置小。对图 3 中漫反射信号进行阈值分离后的结果如图 6。从图中可见，区域面积大的并非都是信号。需要考虑激光测距信号的第二个特征来去除不是信号且面积大的区域。



图 6 阈值分离后的图像

Fig. 6 Result of threshold processing of data of Fig. 3

3.3 线性性分析

3.3.1 线性性去噪

所谓线性性即指：在适当的数据段内测距有用信号可视近似为一条直线。通过阈值分离后的图像(图

6)可知，数据点并没有完全集中于一条直线附近。需要根据激光测距信号的线性性来去除噪声点。

如图 6 所示，的确信号轨迹看起来是线状的。现在的目的是要去掉没有在线上的区域。识别直线有多种方法：例如霍夫变换，最小二乘拟合等。但是由于信号不是完全的直线，且有些数据得到的图像噪声区域较多使得上述算法效果不好。需要另外的方法来确定属于信号的区域。

同一条直线上的点之间所确定的斜率是相同的。考虑到这里的“信号线”并不是标准的直线而是稍有歪曲，故“信号线”上各点之间所确定的斜率值应该是相差很小的。没有在线上的点同线上的点所确定的斜率差别是很大的。通过标记后图像可以到每个区域中心，记为 (X_n, Y_n) 。计算第 n 个区域中心点到其他区域中心点的斜率

$$K_{mn} = \left| \frac{Y_n - Y_m}{X_n - X_m} \right|, \quad (m \neq n). \quad (2)$$

根据这个数组可以找到线上的区域以及线斜率的大致范围。一个比较直接的方法是循环求出 K_{mn} 中的每一个元素和其他元素的差；检测小于某个阈值的差值个数 n ，若 n 大于总区域数的 $1/3$ (也是人为设定的阈值)则循环结束，认为此区域以及那些斜率差值小的区域是信号区域。其余的区域同样放入待定区域。这样做使得计算过程过多依赖阈值选取。如果求出每一个区域对于其他所有区域的斜率值，并综合比较则可以减少对阈值的依赖。

直方图统计的方法也可以用于此来找到最合适一个斜率范围以及区域。

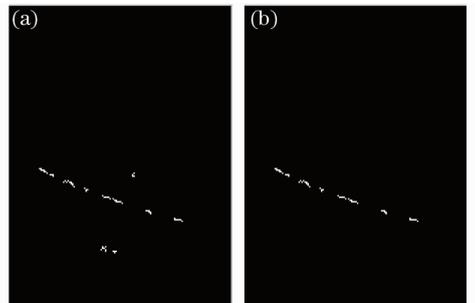


图 7 去噪结果。(a) 原图像前；(b) 去噪后图像

Fig. 7 Noising result. (a) Original image; (b) result

3.3.2 基于线性性的信号区域恢复

图 8 表示了信号的可能分布图，其中黑色为已确定的信号区域，灰色为待定的信号区域。

图 8 所示两种情况中即待定区域与最近的两个已确定是信号的区域的夹角接近 0 或者 π ，则认为灰色的待定区域属于信号。

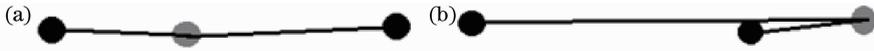


图 8 待定区域属于信号。(a) 待定区域在信号中间；(b) 待定区域在信号同侧

Fig. 8 Undetermined area belongs to signal. (a) Undetermined area is between the signal; (b) undetermined area is on the same side of the signal



图 9 待定区域不属于信号时的可能分布

Fig. 9 Undetermined area does not belong to signal

在图 9 所示情况下,灰色待定区域与最近的信号区域夹角不接近 0 或者 π ,故判定他们不属于信号。设 A_{n-1}, A_{n+1} 为已确定的信号区域的重心, A_n 为待定区域的重心,线性性准则如(3)式:

$$C < | \cos \angle A_{n-1} A_n A_{n+1} | < 1, \quad (3)$$

式中 $0.9 < C < 1$ 才能使效果较好,因为 C 取值较小时会有很多噪声点会被当作信号添加进来。

运用上述原理把待定区域中属于信号的区域提取出来的步骤如下:

1) 计算每一个区域的重心; 2) 求出每个待定区域的重心与所有信号区域重心之间的距离; 3) 用排序法找到离该待定区域最近的两个信号区域,这里用的是快速排序法^[17]; 4) 计算待定区域中心与 3 中求得的最近的区域中心之间的夹角; 5) 根据夹角大小判定: 满足(1)式的区域认为是信号,其余视为噪声并滤除。

图 10 是通过以上步骤处理的结果与未作处理的图像的对比,分离出去的并且满足线性性的区域被提取出来了,不满足的被剔除了。

3.4 原始信号的恢复

经过上述步骤所得的二值图像矩阵并不是真正的信号,而是信号的映射。所以最后需要把信号逆

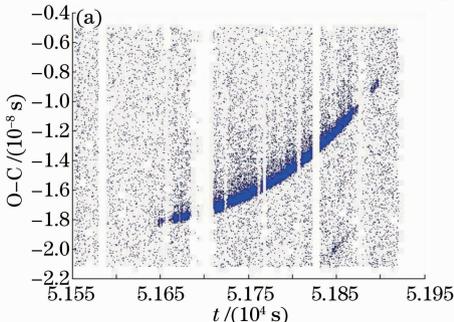


图 12 数据及其处理结果 1。(a) 原始数据; (b) 处理结果

Fig. 12 Data and it's processed result 1. (a) Original data; (b) processed result

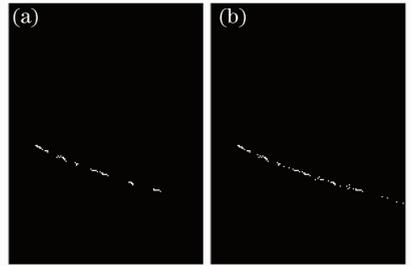


图 10 待定区域恢复前后对比。(a) 恢复前; (b) 恢复后
Fig. 10 Comparison between processed and not. (a) Image before restoration; (b) image after restoration

映射回去。逆映射过程如下: 1) 找到图像矩阵中的非零像素在序号矩阵中对应的序号,原始数据中该序号位置处的数据是信号; 2) 将序号对应位置处的数据取出来存到新的数组中作为信号。

前面信号数据去噪结果如图 11 所示。

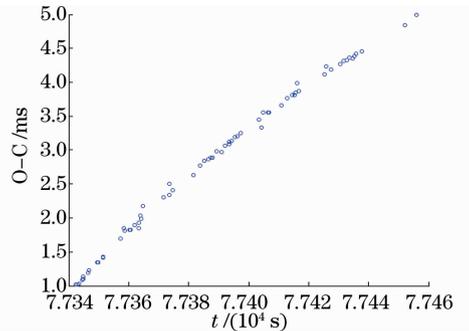


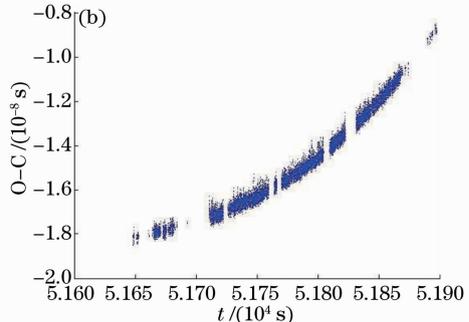
图 11 图 1 所示信号提取的结果

Fig. 11 Result of extraction of Fig. 1

4 结果和分析

4.1 处理结果

利用前面所述的方法对多颗卫星激光测距数据



及漫反射测距数据进行了处理。列出结果见图 12~15。由于图片较占篇幅中间结果未给出,只

给出了原始数据图和处理后的图像。

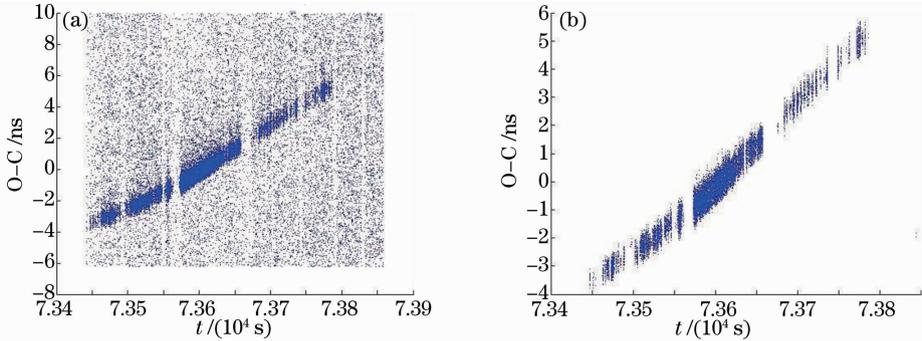


图 13 数据及其处理结果 2。(a)原始数据;(b)处理结果

Fig. 13 Data and it's processed result 2. (a) Original data; (b) processed result

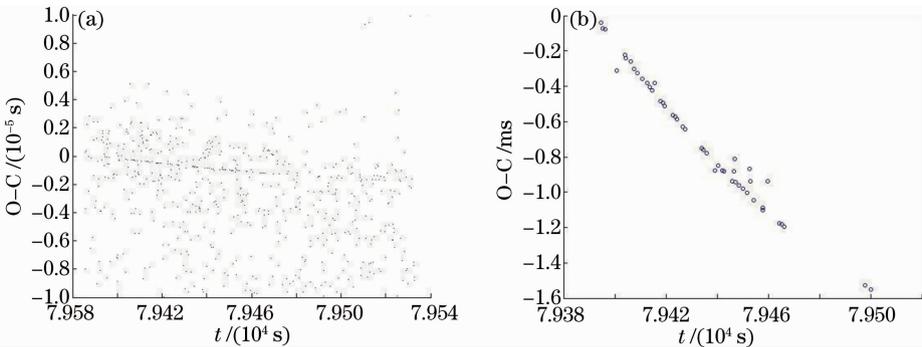


图 14 数据及其处理结果 3。(a)原始数据;(b)处理结果

Fig. 14 Data and it's processed result 3. (a) Original data; (b) processed result

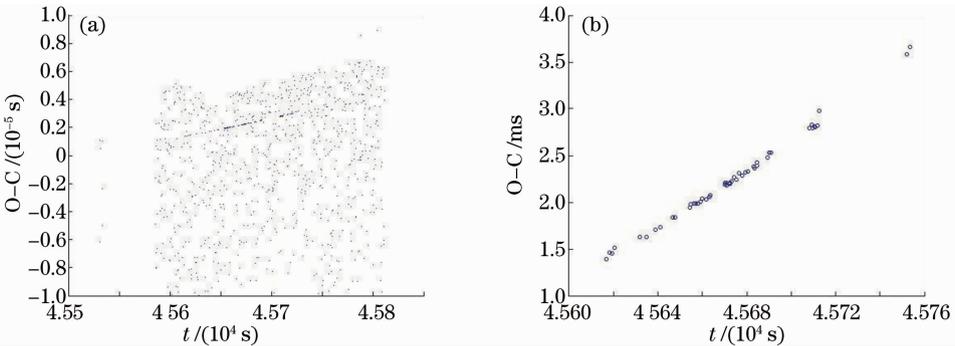


图 15 数据及其处理结果 4。(a)原始数据;(b)处理结果

Fig. 15 Data and it's processed result 4. (a) Original data; (b) processed result

4.2 回波率对参数的影响

回波率影响着参数设置,高回波率的千赫兹卫星激光测距和低回波率的漫反射测距参数设置有很大的不同。影响结果的重要参数有映射放大倍数其他参数有面积阈值、连通方式。

放大倍数有 O-C 的放大倍数和主播时刻放大倍数。不同的放大倍数意味着在不同的尺度下查看数据;尺度小则放大倍数大,尺度大则放大倍数小。对于回波率高数据点密度大的情况为了能分辨得更清楚,需要在更小的尺度下考察数据,故需要将放大

倍数调高;反之,低回波率数据点密度小的情况需要在更小的尺度下考察数据,放大倍数需要更小一些。当确定了 O-C 之后,主播时刻放大倍数便成为了影响结果的重要参数。因为实际上数据的密集程度很大程度上依赖与主播时刻的密集程度,如果将主播时刻放大 10 倍,等同于时间上的拉伸而结果是数据变得更稀疏。在主播时刻上的拉伸大大可以减少多个数据映射到同一个图像像素点的概率,但是增大了矩阵的尺寸使得计算量变大。

面积阈值的设置在一定程度上和放大倍数的大

小有关。因为放大倍数大则映射后数据点在图像里的距离拉大,此时需要更小的面积阈值;相反,放大倍数小则更大的面积阈值更合适一些。同理连通方式也是回波率高数据密度大则放大倍数大,适合选择四连通,回波率低适合选八连通。

以上的情况分析反映了测距信号的第一个特征即有信号点的地方数据密度大。而数据线型性的特征可以帮助减小对于参数设置的依赖,对于不同回

表1 卫星激光测距和漫反射测距数据的放大倍数设置

Table 1 Magnification settings for conventional satellite ranging data and diffuse ranging data

Ranging type	Magnification of T	Magnification of O-C
Conventional satellite ranging	10	10^{10}
Diffuse ranging	1	10^7

5 结 论

文中所述方法不直接处理激光测距数据而是先将数据映射为一幅二值图像,然后对二值图像进行分析和处理以达到去除噪声目的;而对图像的处理分析则借鉴了图像工程技术。另外,文中提出了激光测距信号线型性的概念,以信号线型性特征为依据一方面可以剔除噪声点,同时可以找回信号点。

线型性是信号序列的整体特征。本方法不但考虑数据的统计特征,还考虑了信号整体的形状特征。采用二值数字图像去噪时,充分考虑信号点间关系,把相邻的点联系起来;在分析序列整体形状特征时又把彼此相邻的“一群点”作为一个整体,考虑这“一群点”与整个信号序列的关系。相对于以往的只考虑统计特征的方法,本方法从更多的侧面来研究激光测距信号。可单独运用,也可以作为数据预处理和其他方法混合使用。实验结果表明,本方法可代替常规测距中的屏幕处理方法,提高数据处理的自动化程度。同时对大多数弱信号数据,如漫反射数据,有不错的效果,但是,在目前阶段,同样会遇到参数选取问题,即对于不同数据效果不一样。现阶段,只采取了一个尺度下的信号提取,有潜力实现多尺度的噪声滤除以及对数据的普适性。

参 考 文 献

- Zhang Haifeng, Meng Wendong, Wu Zhibo, *et al.*. One way laser ranging and its measuring experiment[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(3): 0308005.
张海峰, 孟文东, 吴志波, 等. 单向激光测距及其测量试验[J]. 中国激光, 2013, 40(3): 0308005.
- Li Zhulian, He Shaohui, Fu Hongli, *et al.*. Position control system design of return laser pulse detector for lunar laser ranging [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(5): 051201.
李祝莲, 何少辉, 伏红林, 等. 激光测月回波探测器位置控制系

波率设置一个合理的放大倍数和较低的阈值即可。表1给出了百赫兹激光测距和漫反射测距时的参数值。其中只给出了对结果影响较大的参数,其他参数尽量调到不把信号除掉即可。对于漫反射等低回波率测距由于噪声大,所以需要谨慎调节;而对于常规卫星激光测距参数值的变化对结果影响不大。处理数据来自中国科学院云南天文台常规测距和漫反射测距实验。

- 统设计[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(5): 051201.
- Li Zhulian, Zhang Haitao, Huang Tao. Research of rotation shutter control for high repetition frequency co-optical path satellite laser ranging system[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(s1): s112006.
李祝莲, 张海涛, 黄涛. 高重复共光路卫星测距中旋转快门的控制研究[J]. 光学学报, 2012, 32(s1): s112006.
- Ye Shuhua, Huang Cheng. Astrogeodynamics [M]. Jinan: Shandong Science and Technology Publishing House, 2000.
叶叔华, 黄城. 天文地球动力学[M]. 济南: 山东科学技术出版社, 2000.
- Zhang Zhongping, Zhang Haifeng, Gao Hao, *et al.*. Realization of the method of data post-processing for high repetition rate SLR [J]. Science of Surveying and Mapping, 2011, 36(3): 172-173.
张忠萍, 张海峰, 高皓, 等. 高重复率 SLR 数据预处理方法的实现[J]. 测绘科学, 2011, 36(3): 172-173.
- Sun Baosan, Zhang Zhongping, Yang Fumin. Screen processing for satellite laser ranging at high repetition rate[J]. Annals of Shanghai Observatory Academia Sinica, 2006, (27): 129-135.
孙宝三, 张忠萍, 杨福民. 高重复激光测距数据处理方法[J]. 中国科学院上海天文台年刊, 2006, (27): 129-135.
- Hiener M, Brandl N, Schreiber U. Recursive Filter Algorithm for Noise Reduction in SLR[OL]. <http://cddis.gsfc.nasa.gov/lw15/docs/papers/Recursive%20Filter%20Algorithm%20for%20Noise%20Reduction%20in%20SLR.pdf>. [2014-09-03].
- Ricklefs R L, Shelus P J. Poisson filtering of laser ranging data [C]. 8th International Workshop on Laser Ranging Instrumentation, 1993.
- Kirchnerg, Koidl F. Graz kHz SLR system: design, experiences and results [C]. Proceedings of the 14th International Laser Ranging Workshop, 2004. 2-5.
- Fang Qinghai, Zhao Yongli. The research progress in data processing algorithm of satellite laser ranging [J]. Laser Technology, 2008, 32(4): 417-419.
房庆海, 赵永丽. 卫星激光测距数据处理算法的研究进展[J]. 激光技术, 2008, 32(4): 417-419.
- Degnan J J. Optimization of the correlation range receiver parameters in SLR2000[C]. Proceedings of the 13th International Laser Ranging Workshop, 2002. 3-7.
- 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): 105-112.
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-

- 112.
- 13 Li Yuqiang, Li Zhulian, Fu Honglin, *et al.*. Experimentation of diffuse reflection laser ranging of space debris [J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(9): 0908001
李语强, 李祝莲, 伏红林, 等. 空间碎片漫反射激光测距试验 [J]. *中国激光*, 2011, 38(9): 0908001.
- 14 Feng Chugang, Zhu Yuanlan. Analysis for LAGEOS SLR global normal point data of 1992 [J]. *Annual of Shanghai Observatory Academia of Sinica*, 1995, (16): 107–112.
冯初刚, 朱元兰. 1992年 LAGEOS 卫星全球 SLR 标准点资料的分析 [J]. *中国科学院上海天文台年刊*, 1995, (16): 107–112.
- 15 Rafael C Gonzalez, Richard E Woods. *Digital Image Processing (Second Edition)* [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2007.
- Rafael C Gonzalez, Richard E Woods. *数字图像处理 (第二版)* [M]. 北京: 电子工业出版社, 2007.
- 16 Zhang Yujin. *Image Engineering (II) Image Analysis (Second Edition)* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005.
章毓晋. *图像工程 (中册) 图像分析 (第二版)* [M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- 17 Thomas H Cormen, Charles W Leiserson, Ronald L Rivest, *et al.*. *Introduction to Algorithms (Second Edition)* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2002.
Thomas H Cormen, Charles W Leiserson, Ronald L Rivest, 等. *算法导论 (第二版)* [M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.

栏目编辑: 何卓铭