

随机 Hough 变换提取空间碎片激光测距有效回波

刘 通^{1,3} 陈 浩² 沈 鸣¹ 高鹏骥¹ 赵 有¹

¹中国科学院国家天文台, 北京 100012

²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

³中国科学院大学, 北京 100049

摘要 为解决空间碎片漫反射激光测距回波数据信噪比低,难以快速高效地提取有效数据点的问题,提出一种基于随机 Hough 变换的有效回波提取方法。考虑 O-C 残差中相邻信号点之间的时间相关性,将有效回波数据的提取问题转化为图像空间中的曲线识别问题。采用随机 Hough 变换,将确定一条曲线的 n 个数据点映射为参数空间中的一个点,并在参数空间中运用分数累加的策略进行曲线辨识,提取信号点。采用该方法处理中国科学院云南天文台空间碎片漫反射激光测距实验得到的数据,结果表明,该方法可以快速地提取近似曲线型分布的有效回波,且占用内存少,漏检率低,为自动高效提取空间碎片漫反射激光测距有效回波提供了新思路。

关键词 测量;有效回波提取;随机 Hough 变换;空间碎片;激光测距;曲线辨识

中图分类号 P228.5

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0408002

Effective Echo Extraction for Space Debris Laser Ranging Using Randomized Hough Transform

Liu Tong^{1,3} Chen Hao² Shen Ming¹ Gao Pengqi¹ Zhao You¹

¹National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China

²Key Laboratory for Space Object Measurements, Beijing Institute of Tracking and Telecommunications Technology, Beijing 100094, China

³University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract The signal-to-noise ratio (SNR) of space debris laser ranging (DLR) data is too low to extract the effective echo with fast and effective methods. To solve this problem, a DLR echo extraction method based on randomized Hough transform (RHT) is proposed. Considering the time correlating property of O-C residuals' adjacent echo, the effective echo extraction problem is transformed to the curve recognition of the image space. N pixels that determine a curve are randomly picked and they are mapped into one point in the parameter space. The parameter score accumulation strategy is used for curve recognition in the parameter space, which extracts the effective echo. The processing of DLR data of Yunnan Observatory shows that this method can extract echo signal on the approximated curve effectively with high speed, small storage and low misdetection rate. And it provides a new thought for fast and automatic DLR echo extraction.

Key words measurement; effective echo extraction; randomized Hough transform; space debris; laser ranging; curve recognition

OCIS codes 120.6085; 100.3008; 350.6090

1 引 言

空间碎片的存在和不断增长严重威胁了卫星、在轨空间站等航天器的安全运行,也大大限制了人类对

收稿日期: 2015-11-11; 收到修改稿日期: 2015-12-05

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,主要从事空间碎片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碎片监测技术方面的研究。

E-mail: youzhao@bao.ac.cn

空间的进一步探索。目前,空间碎片的探测识别、跟踪监测、碰撞预警以及在轨捕捉受到了各国航天系统的广泛关注。尤其是空间碎片的测量精度高低在很大程度上决定了能否发布准确的碰撞预警以及是否可以实施有效的在轨捕捉^[1-2]。由于常规地基雷达的光学观测精度较低,在一些情况下,无法满足空间碎片测量精度的要求。近年来,空间碎片激光测距作为一种良好可行的高精度测量方法被广泛研究^[3-4]。空间碎片作为非合作目标,其漫反射激光测距回波数据信噪比极低。虽然激光测距系统在硬件上采用了距离门控制和滤光片来滤除大量回波噪声,但接收到的回波中有效信号仍被大量噪声点所淹没^[5-6]。

直接进行人机对话,人工剔除异常值后再进行数据处理和曲线拟合是最原始的去噪方法,这种方法效果良好,但过于依赖工作人员的工程经验并且自动化程度低。美国国家航空航天局(NASA)的SLR2000系统的相关距离接收机算法通过将O-C残差平面划分为等大小的网格,将网格内的点数与设定阈值相比较来判断其中的点是否为信号点^[7]。这种算法的网格大小和阈值大小受观测条件和空间碎片与测站之间的距离等因素影响较大。澳大利亚的Mt Stromlo站基于泊松滤波实现了全自动的观测数据处理,该方法认为O-C残差中的噪声点服从泊松分布,而有效信号则在短时间内近似呈线性分布,通过判断数据点是否服从泊松分布来滤波去噪,保留有效信号^[8-9]。奥地利Graz站的快速回波辨识算法提取空间碎片激光测距漫反射回波成功率较低^[10]。国内,刘雁雨等^[11]采用在反求工程和计算机视觉中应用的曲线重建方法,将激光测距观测值视为从简单光滑的曲线上采样得到的点,并进行曲线重建来提取信号点,这种方法提高了数据处理的自动化程度,但由于待拟合曲线特征的未知性,在信号点很少的情况下,可能无法正确地进行曲线重建以提取有效信号点。李熙等^[12]将激光测距信号O-C残差映射为二值图像,然后依据信号点短时间内的线性特征滤除噪声点^[13],以得到有效回波,该方法充分利用了信号点在短时间内的直线分布特征,但有些情况下,O-C残差距离偏差和时间偏差的变化较大,信号点分布呈非直线性,此时方法可能失效。赵鹏等^[14]基于有效回波相邻数据之间的关联性,采用遗传算法进行寻优搜索获得信号点,该方法可以在线提取有效信号点,但是漏检概率较高并且遗传算法计算量大,耗时较长。

为解决空间碎片漫反射激光测距回波数据中信噪比低,信号点为近似曲线分布的情况下,难以高效提取有效回波的问题,本文提出一种基于随机Hough变换的空间碎片激光测距有效回波提取算法。首先针对这一应用背景推导分析了算法中的参数更新策略以及多个参数的取值依据,然后给出了采用此算法提取有效回波的具体步骤,最后对中国科学院云南天文台空间碎片漫反射激光测距实验得到的数据进行处理,给出了有效回波提取结果。

2 随机 Hough 变换

Hough变换是在图像处理和计算机视觉领域常见的用于自动识别图像中曲线(包括直线、圆、椭圆等)的方法之一。Hough变换的基本思想是把图像平面上的点对应到参数空间中的曲线,通过统计特性来识别图像中的曲线,其具有良好的抗噪性和对部分遮挡的不敏感性等特点。但传统Hough变换计算量大、占用内存多,并且参数空间峰值点被次峰值点所包围,容易造成漏检或误检。针对传统Hough变换的一些缺点,文献[15]提出了随机Hough变换。

传统Hough变换核心是在图像空间中对像素点的穷尽枚举,在参数空间中的得分积累以及图像空间到参数空间一对多的发散映射。随机Hough变换采用了两种新的机制:用图像空间中对像素点的随机采样来代替穷尽枚举,在图像空间和参数空间之间采用多对一的会聚映射来代替发散映射^[15-16]。与传统Hough变换相比,随机Hough变换大大降低了计算量,同时减少了内存空间的占用。对于随机Hough变换提取一般图像空间中曲线的具体思路和详细步骤见参考文献[15],这里不再赘述。

3 基于随机 Hough 变换的有效回波提取算法

3.1 有效回波提取问题简化

由于在较长观测时间段内,O-C残差中包括的时间偏差和距离偏差的变化可能较大,有效回波可能不严格符合有些文献中提到的线性特点。所以这里仅考虑相邻信号点之间的相关性,认为大部分信号点分布在一条未知曲线上或者曲线周边,并将这条曲线称为“信号线”。这样,有效回波的提取问题就简化为“信号

线”的辨识问题。采用随机 Hough 变换来辨识“信号线”，提取近似曲线型分布的信号点。下面先对算法中的参数更新策略和参数取值依据进行讨论分析，然后给出整个提取算法的步骤与流程图。

3.2 参数更新策略改进

随机 Hough 变换中提到：若参数集中的元素 $p_c = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$ ，且新的参数向量 p 满足 $\|p_c - p\| \leq \delta$ ，其中 δ 为判断阈值，则将元素 p_c 的分数加 1，同时更新 p_c 中的参数值，更新策略为对新参数值和原参数值求平均^[15]。以 p_c 中参数 α_i 为例分析最后得到的参数的统计特性，假设 p_c 最后的分数为 S_c ，则随机 Hough 变换中的参数更新策略为

$$\begin{aligned} \hat{\alpha}_{i1} &= \alpha_{i1} \\ \hat{\alpha}_{i2} &= (\hat{\alpha}_{i1} + \alpha_{i2})/2 \\ \hat{\alpha}_{i3} &= (\hat{\alpha}_{i2} + \alpha_{i3})/2 = (\alpha_{i1} + \alpha_{i2})/4 + \alpha_{i3}/2 \\ &\vdots \\ \hat{\alpha}_{iS_c} &= (\hat{\alpha}_{iS_c-1} + \alpha_{iS_c})/2 = \alpha_{i1}/2^{S_c-1} + \sum_{n=1}^{S_c-1} \alpha_{i,n+1}/2^{S_c-n} \end{aligned} \quad (1)$$

式中 $\alpha_{i,n} (n=0,1,2,\dots,S_c)$ 为原参数， $\hat{\alpha}_{i,n} (n=0,1,2,\dots,S_c)$ 为更新后的参数。在这种更新策略下，参数的期望与方差分别为

$$E(\alpha_i) = E\left(\alpha_{i1}/2^{S_c-1} + \sum_{n=1}^{S_c-1} \alpha_{i,n+1}/2^{S_c-n}\right) = \left(1/2^{S_c-1} + \sum_{n=1}^{S_c-1} 1/2^{S_c-n}\right) \mu_{\alpha_i} = \mu_{\alpha_i}, \quad (2)$$

$$V(\alpha_i) = V\left(\alpha_{i1}/2^{S_c-1} + \sum_{n=1}^{S_c-1} \alpha_{i,n+1}/2^{S_c-n}\right) = \left(1/4^{S_c-1} + \sum_{n=1}^{S_c-1} 1/4^{S_c-n}\right) \sigma_{\alpha_i}^2 = \left(\frac{1}{3} + \frac{2}{3 \cdot 4^{S_c-1}}\right) \sigma_{\alpha_i}^2, \quad (3)$$

式中 μ_{α_i} 是总体的均值， $\sigma_{\alpha_i}^2$ 是总体的方差，可以看出虽然最后得到的参数为无偏估计，但是方差较大。因为计算过程中，随着 p_c 的分数从 0 增长到 S_c ， $\alpha_{i,n}$ 参数的权重是呈指数快速增长的，最后一个参数 α_{i,S_c} 权重最大。这种策略容易导致最后方差较大。这里提出一种新的参数更新策略，为

$$\hat{\alpha}_{iS_c} = \sum_{n=1}^{S_c} \rho_n \alpha_{i,n}, \quad (4)$$

式中 ρ_n 为对应参数 $\alpha_{i,n}$ 的权重，满足 $\sum_{n=1}^{S_c} \rho_n = 1$ 。则

$$E(\alpha_i) = \sum_{n=1}^{S_c} \rho_n \mu_{\alpha_i} = \mu_{\alpha_i}, \quad (5)$$

$$V(\alpha_i) = \sum_{n=1}^{S_c} \rho_n^2 \sigma_{\alpha_i}^2. \quad (6)$$

由 Cauchy-Schwarz 不等式可知

$$\sum_{n=1}^{S_c} \rho_n^2 \geq \left(\sum_{n=1}^{S_c} \rho_n\right)^2 / S_c, \quad (7)$$

当 $\rho_1 = \rho_2 = \dots = \rho_{S_c} = \frac{1}{S_c}$ 时，等式成立。因此，当 $\alpha_{i,n} (n=0,1,2,\dots,S_c)$ 参数权重相同时，得到的 $\hat{\alpha}_{i,S_c}$ 为方差最小的无偏估计，这时 p_c 也以最大的概率接近真实值。所以改变参数更新策略为

$$\begin{aligned} \hat{\alpha}_{i1} &= \alpha_{i1} \\ \hat{\alpha}_{i2} &= (\hat{\alpha}_{i1} + \alpha_{i2})/2 \\ \hat{\alpha}_{i3} &= \frac{2}{3} \hat{\alpha}_{i2} + \frac{1}{3} \alpha_{i3} = (\alpha_{i1} + \alpha_{i2} + \alpha_{i3})/3 \\ &\vdots \\ \hat{\alpha}_{iS_c} &= \frac{(S_c - 1) \hat{\alpha}_{iS_c-1} + \alpha_{iS_c}}{S_c} = \frac{\sum_{n=1}^{S_c} \alpha_{i,n}}{S_c} \end{aligned} \quad (8)$$

3.3 参数取值分析

在随机 Hough 变换中除了参数更新策略,还涉及到了判断阈值 δ 、最大采样次数 K_{\max} 和最小判定分数 S_{\min} 多个参数,下面对这些参数的取值分析进行讨论^[15]。

若空间碎片激光测距有效回波接近直线分布 $y_c = k_c x + b_c$,参数向量为 $p_c = (k_c, b_c)$,当 $p = (\tilde{k}, \tilde{b})$ 满足 $\|p - p_c\| \leq \delta$ 时,认为 p 对应的直线上的点都属于有效回波。下面分析阈值为 δ 时全部有效点迹所占区域 Q 的上下包络线。假设 $\|(\tilde{k}, \tilde{b}) - (k_c, b_c)\| = \delta$,则

$$\begin{cases} \tilde{k} = k_c + \delta \sin \theta \\ \tilde{b} = b_c + \delta \cos \theta \end{cases} \quad \theta \in [0, 2\pi], \quad (9)$$

式中 θ 为二维参数空间中 (\tilde{k}, \tilde{b}) 和 (k_c, b_c) 两点所确定直线与 b 轴夹角。则参数 (\tilde{k}, \tilde{b}) 在图像空间所对应的直线为

$$\begin{aligned} \tilde{y} = \tilde{k}x + \tilde{b} &= k_c x + b_c + \delta x \sin \theta + \delta \cos \theta = y_c + \delta x \sin \theta + \delta \cos \theta = \\ &= y_c + \delta \sqrt{1+x^2} \left(\frac{x}{\sqrt{1+x^2}} \sin \theta + \frac{1}{\sqrt{1+x^2}} \cos \theta \right) \quad \theta \in [0, 2\pi] = y_c + \delta \sqrt{1+x^2} \cos(\theta - \beta), \end{aligned} \quad (10)$$

式中 $\beta = \arcsin\left(\frac{x}{\sqrt{1+x^2}}\right)$ 。则区域 Q 的上下边界包络线分别为

$$\begin{aligned} y_1 &= y_c + \delta \sqrt{1+x^2} \\ y_2 &= y_c - \delta \sqrt{1+x^2} \end{aligned} \quad (11)$$

当 δ 取值较小时,区域 Q 上下包络线近似直线; δ 较大时, Q 为以直线 $y_c = k_c x + b_c$ 为中心的“喇叭状”区域,如图1所示,图中阴影部分为有效区域 Q 。

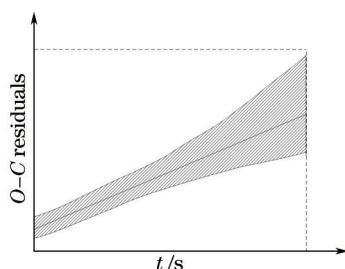


图1 有效区域 Q 示意图

Fig.1 Diagram of effective area Q

若空间碎片激光测距有效回波接近二次曲线分布 $y_c = a_c x^2 + b_c x + c_c$,参数向量为 $p_c = (a_c, b_c, c_c)$ 。下面求阈值为 δ 时,区域 Q 的包络线。由 $\|(\tilde{a}, \tilde{b}, \tilde{c}) - (a_c, b_c, c_c)\| = \delta$,得

$$\begin{cases} \tilde{a} = a_c + \delta \cos \gamma \cos \eta \\ \tilde{b} = b_c + \delta \cos \gamma \sin \eta \\ \tilde{c} = c_c + \delta \sin \gamma \end{cases} \quad \gamma \in [0, 2\pi], \eta \in [0, 2\pi], \quad (12)$$

式中 γ 和 η 为三维参数空间内的两个夹角。则参数 $(\tilde{a}, \tilde{b}, \tilde{c})$ 在图像空间中所对应的直线为

$$\tilde{y} = \tilde{a}x^2 + \tilde{b}x + \tilde{c} = y_c + \delta x^2 \cos \gamma \cos \eta + \delta x \cos \gamma \sin \eta + \delta \sin \gamma \quad \gamma \in [0, 2\pi], \eta \in [0, 2\pi], \quad (13)$$

则阈值为 δ 时点迹的上下边界包络线分别为

$$\begin{aligned} y_1 &= y_c + \delta \sqrt{1+x^2+x^4} \\ y_2 &= y_c - \delta \sqrt{1+x^2+x^4} \end{aligned} \quad (14)$$

若有效回波接近三次曲线分布,则经过类似推导,得到有效区域 Q 的包络线为

$$\begin{aligned} y_1 &= y_c + \delta \sqrt{1+x^2+x^4+x^6} \\ y_2 &= y_c - \delta \sqrt{1+x^2+x^4+x^6} \end{aligned} \quad (15)$$

若有效回波接近 m 次曲线分布,可以发现区域 Q 的包络线为

$$\begin{aligned} y_1 &= y_c + \delta \sqrt{1 + x^{2 \times 1} + x^{2 \times 2} + \dots + x^{2 \times m}} \\ y_2 &= y_c - \delta \sqrt{1 + x^{2 \times 1} + x^{2 \times 2} + \dots + x^{2 \times m}} \end{aligned} \quad (16)$$

通过以上分析推导,得到参数空间判断阈值为 δ 时,图像平面区域 Q 包络线的解析表达式,发现在 δ 足够小的情况下,对低次曲线,可以保证区域 Q 内的点基本都分布在“信号线”周边。但当曲线次数大于两次,选取的数据点在同样大的判定阈值 δ 限制下,会随着横坐标的增大,即观测时间的推移,上下包络线到“信号线”距离迅速增大,导致大量噪声点进入区域 Q 内,影响信号点的正确提取。而且空间碎片激光测距的有效回波在相当长的时间段内一般可以用二次曲线来拟合其分布,为了降低误检率,同时减小计算量,提高提取速度,采用二次曲线来拟合有效数据点。下面将在提取目标曲线为二次曲线的前提下,对判断阈值 δ 、最大采样次数 K_{\max} 和最小判定分数 S_{\min} 的取值依据进行讨论分析。

设所有回波数据点个数为 N ,信号点个数为 M ,假定信号点基本全落入区域 Q 内,且噪声点在图像平面内均匀分布,则噪声点落入区域 Q 内的概率 P_1 为

$$P_1 = \frac{1}{S} \int_A^B \int_{a_c x^2 + b_c x + c_c - \delta \sqrt{1 + x^2 + x^4}}^{a_c x^2 + b_c x + c_c + \delta \sqrt{1 + x^2 + x^4}} dy dx = \frac{2\delta}{S} \int_A^B \sqrt{1 + x^2 + x^4} dx, \quad (17)$$

式中 S 为全部待处理数据点所占图像平面面积,积分上下限 A 、 B 表示所有数据点的起始与结束时间。由(17)式得到落入区域 Q 的噪声点个数 M_1 为

$$M_1 = P_1(N - M), \quad (18)$$

落入区域 Q 的所有数据点的个数 M_2 为

$$M_2 = M + M_1, \quad (19)$$

这里将阈值 δ 的选取准则设为区域 Q 内有效点个数占总点数比例大于 80%,即

$$\frac{M}{M_2} = \frac{M}{M + M_1} \geq 0.8. \quad (20)$$

在算法验证中,采用了云南天文台 2010 年空间碎片漫反射激光测距实验得到的数据,分析 δ 取值时参考文献[17],由于该次实验得到的数据信噪比低,经过初步的预处理,有效信号所占比例低于 20%,即 $M/N < 1/5$,结合(20)式,可以得到判断阈值 δ 的取值范围。与 δ 取值范围相关的参数有总回波数据点数 N 、信噪比 M/N 、观测时间段长度,以及面积 S 。由于每次观测的目标不止一个且每个目标过境时间有限,所以单个目标的观测时间一般较短且变化不大。根据文献[17]的分析,对于同一测站的同一个观测系统,在一段时间内(温度、湿度及大气压力变化不大)对轨道高度相近的一类空间碎片进行观测时,总数据点数 N 、信噪比 M/N 以及 S 也变化不大。所以对这一批观测数据处理时, δ 基本在同一个取值范围内。

最大采样次数 K_{\max} 的选取根据参考文献^[18]中的经验公式:

$$K_{\max} = (10 \sim 100) \frac{N^n}{n_{\min}^n}, \quad (21)$$

式中 n_{\min} 为图像空间中目标曲线上的最少点数,其取值一般比曲线阶数略大。因为目的是提取有效回波对应的曲线,取 $N/n_{\min} \approx 10$ 。 n 为确定一条二次曲线所需的最少点数,取为 3。

结合上文分析最小判定分数 S_{\min} 的取值,从 N 个数据点中随机选的三个点在区域 Q 内的概率为

$$P_2 = \frac{C_{M_2}^3}{C_N^3} = \frac{M_2(M_2 - 1)(M_2 - 2)}{N(N - 1)(N - 2)}, \quad (22)$$

当随机采样次数 K_{\max} 足够大时,在参数集中累积得分最高的元素 p_{\max} 代表图像空间里的目标曲线,其分数应该接近 $K_{\max} P_2$ 。这里取

$$S_{\min} = \frac{K_{\max} P_2}{2}, \quad (23)$$

设置最小判定分数 S_{\min} 是为了避免误判,进一步保证 p_{\max} 所代表的曲线为“信号线”。通过推导分析,(20)式、(21)式、(23)式分别给出了判断阈值 δ 、最大采样次数 K_{\max} 和最小判定分数 S_{\min} 取值的依据。

3.4 基于随机 Hough 变换的有效回波提取算法

针对提取空间碎片漫反射激光测距有效回波这一问题,上文对算法中参数的更新策略以及参数的取值依据作了针对性的分析讨论。下面给出假定信号点为二次曲线分布时,采用随机 Hough 变换提取“信号线”的具体步骤。

- 1) 将所有待处理的数据点视为集合 D , 令参数集 P 为空集, 设循环次数 $K=0$ 。
- 2) 从集合 D 中每次等概率地随机取 3 个不同的数据点 $(x_i, y_i)(i=1,2,3)$, 联立方程

$$f(a,b,c,x_i,y_i)=0 \quad i=1,2,3, \quad (24)$$

求解得到图像空间中的一条二次曲线 $y=ax^2+bx+c$, 并将其映射为参数空间中的点 $p=(a,b,c)$ 。

- 3) 搜索总的参数集 P 中是否存在元素 p_s 满足

$$\|p-p_s\| \leq \delta, \quad (25)$$

如果存在转步骤 4, 否则转步骤 5。

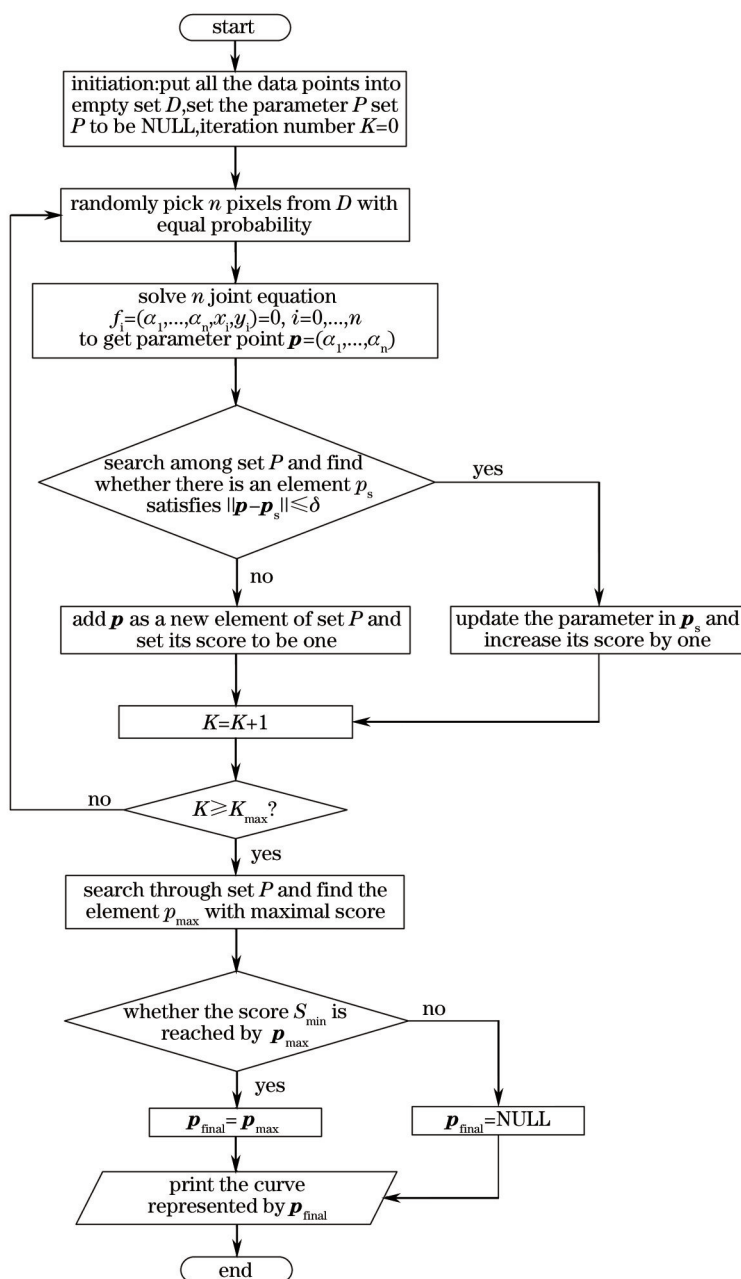


图2 随机 Hough 变换提取空间碎片回波信号点方法流程图

Fig.2 Flow diagram of space debris echoes extraction methods using randomized RHT

- 4) 给 p_s 分数加 1, 并采用(8)式给出的参数值更新策略更新 p_s 中参数值, 转步骤 6。
- 5) 给参数集 P 中添加新元素 p , 并将新元素分值设为 1, 转步骤 6。
- 6) $K=K+1$, 判断 K 是否大于等于最大采样次数 K_{max} , 如果小于 K_{max} 转步骤 2; 反之, 搜索参数集 P 中分值最大的元素 p_{max} 。
- 7) 判断 p_{max} 分值是否达到最低分数 S_{min} , 若达到令 $p_{final}=p_{max}$; 否则令 p_{final} 为空。
- 8) 将参数空间中的 p_{final} 点映射回图像空间, 输出其代表的二次曲线, 认为分布在曲线上及其周边一定范围的数据点为提取得到的有效回波数据。

随机 Hough 变换在图像处理中辨识曲线时, 由于一幅图像内可能存在多条需要辨识的同类型曲线, 所以在提取出一条曲线后, 需要从步骤 8 返回步骤 1, 循环多次辨识。但对于提取空间碎片激光测距有效回波, 由于观测站点每次得到的数据中一般只包含一个碎片的有效回波数据, 所以整个搜寻过程进行一次就终止。

上面给出的步骤针对激光测碎片回波数据为二次曲线分布这一情况, 当考虑数据分布为其他类型曲线分布时, 图 2 给出了采用此算法提取一般类型“信号线”的流程图。

从整个算法流程中可以看出, 在采用(21)式给出的取值范围内选择 δ 值时, δ 越小, 算法精准度越高, 但是阈值条件的过于严苛会造成 P 中元素的增多, 每次循环计算量增大, 且占用计算机内存增加; δ 过大, 显然会造成算法精准度太低, 提取的有效区域 Q 面积过大, 噪声点落入区域 Q 的概率也随之增高, 导致误检率较高。所以, δ 取值时要兼顾到其取值大小对算法占用的内存、计算速度和算法精准度这几方面造成的影响。

4 方法验证及结果分析

为检验随机 Hough 变换提取空间碎片激光测距有效回波的效果, 对云南台空间碎片激光测距实验得到的数据进行处理。计算环境为 win10 系统下的 Matlab, 计算机内存 4 GB, 处理器为 Intel Core i3-2120, 主频 3.3 GHz。所处理的空间碎片编号、观测时间、轨道的部分参数以及大小如表 1 所示。

表 1 云南天文台空间碎片激光测距实验结果

Table 1 Laser ranging results of Yunnan Observatory's space debris

Object	Date	Perigee /km	Apogee /km	Size /m	Ranging /km	Echo
17590	20110125	832.1	842.3	10.4×3.9	1146~1824	75
10517	20110124	477.4	1784.0	6.4×2.0	841~1489	73
25400	20110126	801.3	814.9	10.4×3.9	1171~1616	76
18403	20110127	934.9	1020.0	6.0×2.4	1162~1741	31

云南天文台空间碎片激光测距实验得到的 O-C 残差数据与采用随机 Hough 变换提取的数据点如图 3~图 6 所示。多次运行程序, 将实测数据处理平均计算结果列于表 2, 因为 K_{max} 取值较大, 所以算法结果很稳定, 每次运行所得结果与表中数据相差甚微。

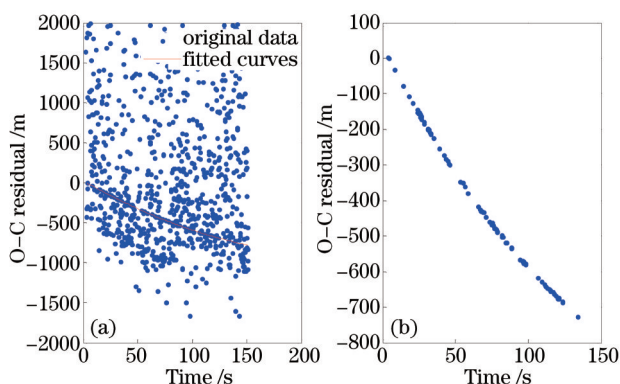


图 3 云南天文台空间碎片 17590 激光测距实验结果。(a) 初始数据; (b) RHT 处理后的数据

Fig.3 Laser ranging results of Yunnan Observatory's space debris when the quantity is 17590.

(a) Original data; (b) data processed by RHT

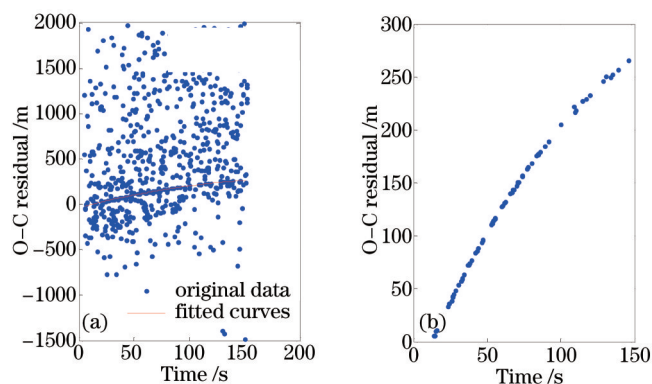


图4 云南台空间碎片 10517 激光测距实验结果。(a) 初始数据; (b) RHT 处理后的数据

Fig.4 Laser ranging results of Yunnan Observatory's space debris when the quantity is 10517. (a) Original data; (b) data processed by RHT

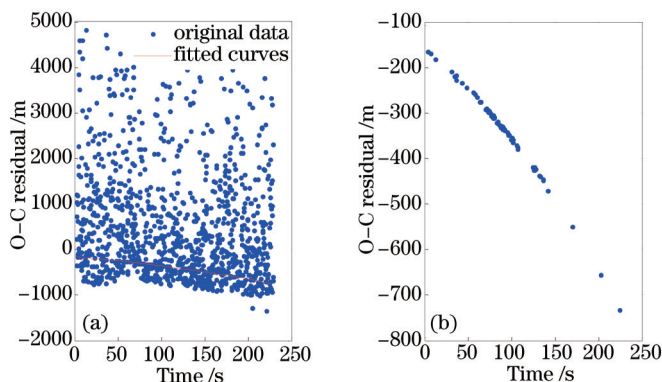


图5 云南台空间碎片 25400 激光测距实验结果。(a) 初始数据; (b) RHT 处理后的数据

Fig.5 Laser ranging results of Yunnan Observatory's space debris when the quantity is 25400. (a) Original data; (b) data processed by RHT

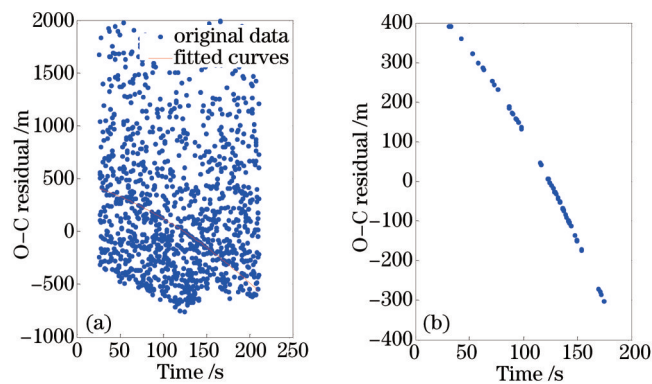


图6 云南台空间碎片 18403 激光测距实验结果。(a) 初始数据; (b) RHT 处理后的数据

Fig.6 Laser ranging results of Yunnan Observatory's space debris when the quantity is 18403. (a) Original data; (b) data processed by RHT

表2 实测数据处理结果

Table 2 Real data processing results

Objects	Extracted echoes	Effective echoes	Processing time /s	Miss detecting rate /%	False detecting rate /%
17590	84	75	2.36	0	10.71
10517	73	73	2.48	0	0
25400	79	72	2.32	5.2	8.9
18403	37	30	2.57	3.3	18.9

实测数据处理结果表明,采用随机 Hough 变换算法可以正确地提取较长时间段内的曲线型“信号线”,计算速度快,占用内存少。但上述算例所提供的实测数据的观测时间都较长,且信号的间断不严重。为进一步验证算法的有效性,在现有算例的基础上对观测时间较短、信号间断较大的情形进行研究。将碎片

17590、10517原始数据中删除了一部分数据点,视为碎片 17590*、10517*测量数据。这样处理后的数据具有了观测时间短并且信号间断较大的特点。然后采用上述所提算法提取有效回波,提取效果如图7、图8所示。

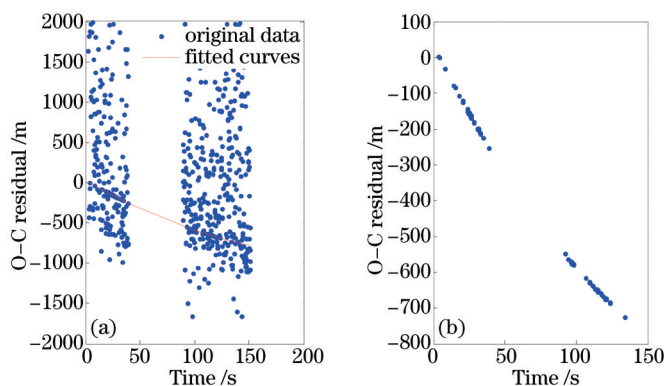


图7 云南台空间碎片 17590*激光测距实验结果。(a) 初始数据;(b) RHT处理后的数据

Fig.7 Laser ranging results of Yunnan Observatory's space debris when the quantity is 17590*. (a) Original data; (b) data processed by RHT

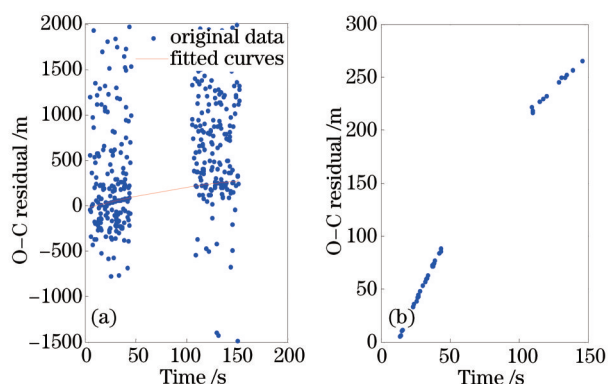


图8 云南台空间碎片 10517*激光测距实验结果。(a) 初始数据;(b) RHT处理后的数据

Fig.8 Laser ranging results of Yunnan Observatory's space debris when the quantity is 10517*. (a) Original data; (b) data processed by RHT

将图7、图8与图3、图4提取结果对比,发现提取的有效回波基本一致。结果表明,对观测时间短并且信号间断较大的算例,所提方法仍然可以有效地提取回波中的信号点。

结合图3~图8可以看出,采用随机 Hough 变换算法可以高效快速地提取空间碎片激光测距有效回波,但表2中数据显示,对碎片 17590、碎片 25400 和碎片 18403 碎片的实测数据进行有效回波提取,误检率较高。下面分析误检率较大的两个主要原因。

采用辨识“信号线”的方法提取有效信号,一般要设定距离阈值,将阈值区间内的数据点视为有效回波,这样就导致存在一定的误检率。因为不可能所有信号点严格分布在一条曲线上。一部分信号点会分布在曲线周围。距离阈值在保证大部分或者全部信号点被提取出来的情况下,也将在阈值范围内的噪声点误检为信号点提取出来。如碎片 17590 和碎片 25400,其信号点绝大部分均在辨识出的“信号线”上,或者距离信号线非常近,但极少量的信号点距“信号线”较远,信号点分散程度较高,为尽量提取出所有有效回波数据,距离阈值较大,这样就导致误检率较高。

另外,系统接收到的回波数据中可能在一段时间内没有有效回波,但是随机 Hough 变换检测出的“信号线”是一条连续的直线,在系统接收到的回波数据中,如果有效信号点中断,就会导致较高的误检率,如碎片 18403。针对这一问题,可以对提取出的数据点进一步进行相关性检测,从而剔除其中的噪声点,来降低误检率。

5 结 论

提出了一种基于随机 Hough 变换的空间碎片激光测距有效回波提取算法,算法将 O-C 残差数据点视为图像中的像素点,将提取有效回波的问题转化为辨识图像中目标曲线的问题来解决。采用随机 Hough 变换,将图像平面上的曲线映射为参数空间中的点,通过分数累加的策略来寻找信号点所在的目标曲线。对云南

天文台空间碎片激光测距实验得到的回波数据处理结果表明,该算法能正确地提取曲线型分布的信号点、漏检率低,且计算速度快、占用内存少、自动化程度高,对于信噪比较低的空间碎片激光测距回波具有良好的有效回波提取效果。该算法同样适用于信噪比较大的卫星激光测距回波中有效数据点的提取。但是在采用该算法处理信号点分散程度较高或者有效信号点长时中断的数据时,误检率较高。下一步考虑对提取的回波数据进行相关性检测,降低误检率,并且研究当观测时间很长导致“信号线”解析表达式复杂,不能用单一类型曲线表示的情况下,如何提取有效回波的问题。

致谢 作者感谢中科院云南天文台李语强副研究员提供的空间碎片激光测距实测数据。

参 考 文 献

- 1 Sang Jizhang, Bennett J C, Smith C. Experimental results of debris orbit predictions using sparse tracking data from Mt.Stromlo[J]. Acta Astronautica, 2014, 102(Complete): 258-268.
- 2 Sang Jizhang, Bennett J C. Achievable debris orbit prediction accuracy using laser ranging data from a single station[J]. Advance in Space Research, 2014, 54(1): 119-124.
- 3 Huang Minshuang, Long Tengyu, Liu Huihui, *et al.*. A high-precision pulsed laser ranging time interval measurement technology based on sine curves method[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(8): 0808002.
黄民双, 龙腾宇, 刘慧慧, 等. 基于正弦曲线的高精度脉冲激光测距时间间隔测量技术[J]. 中国激光, 2014, 41(8): 0808002.
- 4 Wang Guochao, Yan Shuhua, Yang Jun, *et al.*. Theoretical modeling analysis for precise space ranging based on cross-correlation of femtosecond optical frequency comb[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(4): 0412002.
王国超, 颜树华, 杨 俊, 等. 基于飞秒光梳互相关的空间精密测距理论模型分析[J]. 光学学报, 2015, 35(4): 0412002.
- 5 Dong X. Research on high repetition space debris laser ranging system[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, 2014.
董 雪. 高重复频率空间碎片激光测距系统研究[D]. 长春: 长春光学精密机械与物理研究所, 2014.
- 6 Zhai Dongsheng, Tang Rufeng, Huang Kai, *et al.*. Analysis on detection performance of satellite laser ranging based on Geiger mode APD arrays[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(6): 0608007.
翟东升, 汤儒峰, 黄 凯, 等. 基于G-APD阵列的卫星激光测距系统探测性能分析[J]. 中国激光, 2015, 42(6): 0608007.
- 7 Degnan J J. Optimization of the correlation range receiver parameters in SLR2000[C]. 13 th International Workshop on Laser Ranging. Maryland: NASA Conference Publication, 2002: 3-7.
- 8 Luck J, Moore C, Greene B. Autonomous laser ranging results from mount stromlo[C]. 12 th International Workshop on Laser Ranging, Matera: ASL, 2000: 2-12.
- 9 Ricklefs R L, Shelus P J. Poisson filtering of laser ranging data[C]. 8 th International Workshop on Laser Ranging Instrumentation, 1992: 15544.
- 10 Kirchner G, Koidl F, Friederich F, *et al.*. Laser measurements to space debris from Graz SLR station[J]. Advance in Space Research, 2013, 51(1): 21-24.
- 11 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.
- 12 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.
- 13 Feng Chugang, Zhu Yuanlan. An 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.
- 14 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.
- 15 Xu Lei, Oja E, Kultanan P. A new curve detection method: randomized Hough transform (RHT)[J]. Pattern Recognition Letters, 1990,

- 11(5): 331-338.
- 16 Xu Lei, Oja E, Kultanen P. Randomized Hough transform[J]. Encyclopedia of Artificial Intelligence, 2009, 3: 1354-1361.
- 17 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.
- 18 Xu Lei, Oja E. Randomized Hough transform (RHT): basic mechanisms, algorithms, and computational complexities[J]. CVGIP: Image Understanding, 1993, 57(2): 131-154.

栏目编辑: 张浩佳