

激光漫反射测距回波信号在线提取方法

赵 鹏^{1,2} 张 艳^{1,2} 张小亚³ 钱卫平²

¹北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094

²空间目标测量重点实验室, 北京 100094

³国防科学技术大学理学院, 湖南 长沙 410073

摘要 为解决激光漫反射测距实测数据噪点多, 真实回波信号难以可靠在线提取问题, 提出一种基于时间相关性的激光漫反射测距回波信号的快速提取方法。基于实测数据特性分析将回波信号提取问题简化为 n 点搜索问题, 并理论验证了基于时间相关性提取方法的正确性, 通过权衡搜索代价与提取精度, 给出 n 点选取规则。给出短时数据线性度和相邻数据关联度作为时间相关性的具体评价指标, 设计遗传算法对缓存数据与在线数据并行寻优, 降低搜索时间并提高测距提取精度。中国科学院云南天文台实测数据提取结果表明, 该方法对强噪声背景下的微弱回波信号有较强的快速提取能力, 为激光漫反射测距回波信号在线提取提供可行思路。

关键词 测量; 激光漫反射测距; 回波信号提取; 时间相关性; 遗传算法; 并行寻优

中图分类号 P228.5

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.1028002

Echo Online Extraction for Diffuse Reflection Laser Ranging

Zhao Peng^{1,2} Zhang Yan^{1,2} Zhang Xiaoya³ Qian Weiping²

¹Beijing Institute of Tracking and Telecommunications Technology, Beijing 100094, China

²Key Laboratory of Space Object Measurement, Beijing 100094, China

³College of Science, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China

Abstract In order to realize the echo online extraction for diffuse reflection laser ranging when echo photons are blocked by a large amount of noise photons, an echo online extraction method based on time correlation is proposed for diffuse reflection laser ranging system. Based on the characteristics of time correlation for diffuse reflection laser ranging data, the extraction problem is simplified into n points searching problem. Next, the correctness of the extraction based on time correlation is verified. And the rules to select a proper n are given further through the trade-off between search cost and extraction accuracy. Then, the evaluation criteria for short-time linearity and adjacent similarity are given in detail. Finally, Genetic algorithm is adopted to realize parallel search for buffer data and online data, decreasing the search time as well as increasing the extraction accuracy of ranging data. The echo extraction for Yunnan Station's experimental data show that the extraction method proposed has strong ability to extract echo signal from high noise background quickly, which provides a feasible way to realize the signal online extraction for diffuse reflection laser ranging.

Key words measurement; diffuse reflection laser ranging; echo extraction; data correlation; genetic algorithm; parallel search

OCIS codes 120.6085; 280.3400; 350.6090

1 引 言

空间碎片的高精度测量是当前亟待解决、困扰整个世界航天界的难题^[1-2]。相比与常规的雷达测距, 脉冲

收稿日期: 2015-05-14; 收到修改稿日期: 2015-06-26

基金项目: 总装预研项目

作者简介: 赵 鹏(1991—), 男, 硕士研究生, 主要从事激光漫反射测量方面的研究。E-mail: roczhao1991@163.com

导师简介: 钱卫平(1963—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事空间目标探测与识别方面的研究。

E-mail: qianweiping@bittt.cn

激光漫反射测距具有更优的测距精度,是实现空间碎片高精度测量的可行途径之一^[3-4]。随着脉冲激光测距在甄别与测量方法等方面的深入研究,脉冲激光测量精度在不断提高^[5-7]。然而,漫反射脉冲测距存在回波光光子数少,在系统接收处回波信号强度弱(仅为单光子水平)的问题^[8],严重限制了空间碎片测量精度的进一步提高。工作在盖革模式下的雪崩二极管(GM-APD)具有高灵敏度和高增益的特点,能够实现单光子水平的信号检测,被广泛应用于激光漫反射测距系统。但GM-APD暗噪声较大且存在死时间问题。除此之外,现有激光漫反射测距系统在一个门控内检测到一次信号后便会关闭探测器,如果噪声光子在门控内先触发,则真实的回波光光子无法在门控时间内被检测到,会减少真实光子的检测概率与有效信号的检测数目^[9]。回波信号弱,探测器噪声大,有效信号检测概率低等因素共同造成了现有漫反射测距系统测距数据中回波信号被大量噪声淹埋的问题,实测实验表明有效信号的真实占比一般小于1/10^[10]。

人工屏幕预处理是最原始的回波信号提取方式^[11],利用人机对话剔除异常值,并通过后续精细处理与拟合获得回波信号数据。此方法对弱信号的适应性好,能有效处理低信噪比的观测数据,但依赖于判读人员经验且易受主观判断的影响,检测效率和自动化程度低,提取速度慢。采用基于点云曲线辨识的激光数据处理预算法^[12],能够提高处理的自动化程度且精度与实际使用的屏幕处理法相当,但是难以应用于回波信号非常微弱的情况。在月球激光测距的高噪声、低信号强度的环境中多采用泊松统计滤波算法处理^[13],该算法认为噪声点服从泊松分布,而光子回波残差在短时间间隔内落在未知斜率的一段直线上,用倾斜的矩形窗在短时间间隔内对数据进行扫描,辨识出局部信号统计特征,提取出不满足泊松分布的窗口范围,即判定为有效数据。基于泊松统计滤波算法,Mt Stromlo SLR站实现了无人值守的全自动观测^[14],但该方法检测结果受泊松统计滤波影响较大,对数据处理的自适应性不强。因此,要实现激光漫反射测距回波信号快速高精度的提取,需针对目标特点对传统激光卫星测距处理算法进行升级^[8]。

激光漫反射测距微弱回波信号的在线提取问题,既要保证提取速度,又要保证提取精度,利用回波信号的时间相关性与噪声信号时间不相关性实现回波信号提取,是解决低信噪比情况下信噪可靠分离与在线提取的可行思路之一。Degnan^[15]针对SLR2000系统白天测距噪声强,信号弱的问题提出了相关检测算法,对距离窗内光子个数是否大于设定阈值进行判定,若大于设定阈值则认为窗口包含信号。该算法处理速度快,但自动化程度不高,对低信噪比数据的处理能力有限,且距离窗大小及门限阈值对探测效果影响较大。李熙等^[16]基于相关回波信号表现出的线性,借鉴图像工程技术提出基于二值图像的卫星激光测距数据处理算法,该算法提高了漫反射数据处理的自动化程度,但只能事后处理,无法实现在线提取。

为解决激光漫反射测距实测数据噪点多,真实回波信号难以可靠在线提取问题,本文提出一种基于时间相关性的激光漫反射测距回波信号的快速提取方法。基于实测数据特性分析将回波信号提取问题简化为 n 点搜索问题,并理论验证了基于时间相关性提取方法的正确性,通过权衡搜索代价与提取精度,给出 n 点选取规则。给出短时数据线性度和相邻数据关联度作为时间相关性的具体评价指标,设计遗传算法对缓存数据与在线数据并行寻优,降低搜索时间并提高测距提取精度。

2 在线提取方法分析

2.1 漫反射测距回波测量

激光漫反射测距系统进行一次测距需同时记录激光发射的主波时刻与回波时刻,现有系统一般采用双事件计时器对主回波时刻进行记录,再通过匹配记主回波时刻,获取一组测距数据。

在回波时刻的探测中,激光漫反射系统首先根据目标的预报轨道数据和主波时刻,给出漫反射回波的预报到达时刻,根据目标跟踪情况与测距精度给出一定宽度的波门,以滤除波门外的噪声,提高检测信号的信噪比,门控控制信号通过门控模块给出。当激光回波入射光子在距离波门内照射在GM-APD探测器时,有一定概率产生一次可检测脉冲的触发信号,触发信号经过低噪声前置放大器和脉冲幅度甄别器转换为TTL电平,最终由计时器记录时间。激光漫反射测距接收系统示意图如图1所示。

2.2 回波提取问题简化

若将记录的回波时刻与回波时刻相对应的预估时刻作差,则得到时间的残差,时间残差乘以光速得到

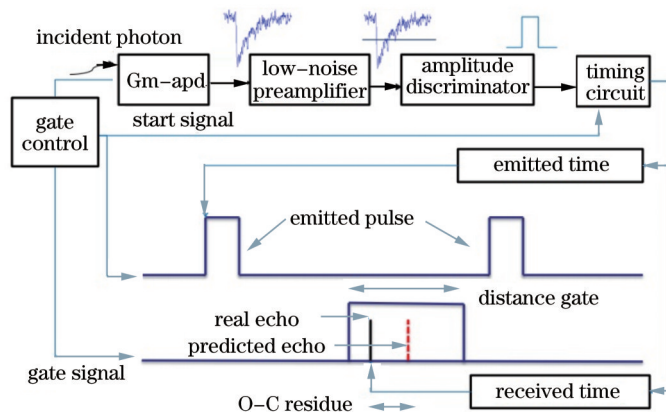


图1 激光漫反射测距探测系统示意图

Fig.1 Framework of receiving system

距离的残差,即为 O-C 残差。以 O-C 残差值作为纵坐标,以主波时刻作为横坐标,绘制可得 O-C 残差分布图,为了观察直观,需使初始主波时刻归零。中国科学院云南天文台于 2010 选取了一些体积较大的火箭残骸进行了激光漫反射测距试验,并已经测到数十圈火箭残骸的漫反射测距回波^[17]。从中选取两次实验所得 O-C 残差分布图如图 2 所示。

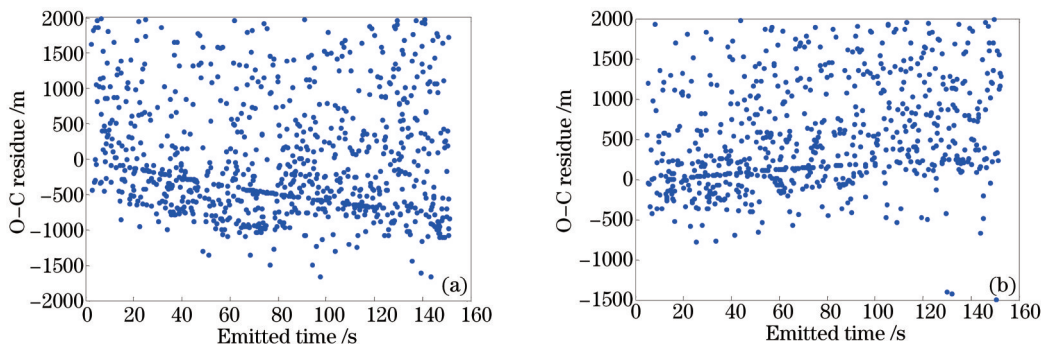


图 2 O-C 残差分布图。(a) 17590 目标; (b) 10517 目标

Fig.2 O-C residual distribution. (a) 17590 targets; (b) 10517 targets

通过图 2 可以看出,回波信号 O-C 误差曲线随时间有缓变的趋势性,具有一定的时间相关性,主要表现为短时间内数据符合线性特性和相邻数据点具有关联的变化趋势。而噪声则是在时间轴与残差轴上随机分布,主要特点是分布较为分散和均匀。回波信号与噪声在时间相关特性上存在显著差别,利用两者时间相关特性的差异提取有效信号,是解决低信噪比情况下信噪可靠分离,回波信号在线提取的可行思路。定义一定范围短时间的长度为 T_{bin} ,定义 M 为 T_{bin} 内探测到的激光脉冲总数,定义 N 为 T_{bin} 内回波信号的总目,假设回波信号全部具有相关性,定义 n 为最终提取出的回波信号数目,若噪点组成时间相关 n 点点集的概率为零,则回波信号的提取即可简化为:基于时间相关性原则从 M 点中提取出最符合时间相关性特征的 n 点点集,并使 n 尽可能接近 N 。

2.3 时间相关性提取验证

定义无回波信号时,噪点组成时间相关 n 点点集的概率为 P_{noise} ,下面验证 P_{noise} 可近似为零。首先,定义量化间隔 Δ ,量化 O-C 残差为 Y 个离散值,则可将 O-C 残差分布图抽象为 $M \times Y$ 的均匀点阵(不妨设 $Y > M$)。若个数为 n 的数据点集在点阵中可以连成一条直线,则定义该 n 个数据点集具有相关性($n \geq 3$),设噪点在每一脉冲时刻均匀分布,而同一脉冲时刻只能有一个数据点,所以点阵中的直线只可能是横线和斜线,则 P_{noise} 概率求解问题简化为从点阵 $M \times Y$ 中提取 n 点横线和斜线的概率。定义可能提取的直线总数,横线数和斜线数分别为 N_{total} , N_{tran} 和 N_{slan} ,则 P_{noise} 可表示为

$$P_{noise} = \frac{N_{tran} + N_{slan}}{N_{total}}, \quad (1)$$

式中 N_{total} , N_{tran} 的表达式为

$$\begin{aligned} N_{\text{total}} &= C_M^n (C_Y^1)^n, \\ N_{\text{tran}} &= C_M^n \cdot Y, \end{aligned} \quad (2)$$

N_{slan} 需要根据斜线内点的间隔进行分类求解, 定义斜线内点的间隔为 g (相邻点连成的直线点的间隔为 1), 定义点阵中点的间隔为 g 的斜线可能取得的最大点数为 M_g , 在不同点的间隔 g 下, 对所有不小于 n 点和不大于 M_g 的直线进行讨论, 定义 g 间隔下点数为 i 点的直线个数为 L_g^i , 由归纳法易得 M_g 和 L_g^i 的表达式如下:

$$\begin{aligned} M_g &= \min\left\{\left\lfloor \frac{Y-1}{g} \right\rfloor + 1, M\right\}, \\ L_g^i &= \begin{cases} 2[Y - (M_g - 1)g](M - M_g + 1), & i = M_g \\ 4g, & n \leq i < M_g \end{cases} \end{aligned} \quad (3)$$

式中 $\lfloor \cdot \rfloor$ 表示向下取整。由此, 可得 N_{slan} 表达式为

$$N_{\text{slan}} = \sum_{g=1}^{\lfloor \frac{M}{n} \rfloor} \sum_{i=n}^{M_g} C_i^n L_g^i, \quad (4)$$

所以, 将(2)、(4)式代入(1)式即可求解得 P_{noise} , 取 $M=100, \Delta=2$, 计算 P_{noise} 随 n 点变化如图 3 所示。

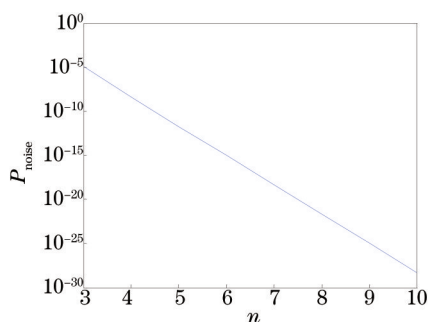


图 3 P_{noise} 随 n 点变化关系图

Fig.3 P_{noise} depending on n

由图 3 可得, n 点取 3 时, P_{noise} 的最大值为 10^{-5} 的量级, 并且, 随着 n 的增大 P_{noise} 呈指数规律快速递减, 因此, 从噪声中提取出时间相关的 n 点点集的概率近似于零, 基于时间相关性原则提取信号的方法在理论上可行。

2.4 回波提取搜索代价分析

由于已验证基于时间相关性提取回波信号理论可行, 因此, 只要搜索算法能力足够强, 则一定能够提取出具有时间相关性的 n 点点集, 且通过对不同 n 情况的多次搜索, 可使 n 尽可能地接近于 N , n 与 N 相同时测距提取误差最小。然而, 如果考虑到搜索代价的要求, 必须限制搜索的处理时间在一个合理的范围内, 以同时保证同时具有较小的提取误差与较好的提取速度。

同样假设回波信号在 T_{bin} 内全部具有时间相关性且分布在一条直线上, 则符合时间相关性的 n 点回波信号数据点集数目为 $C_N^n (3 \leq n \leq N)$, 而所有可能 n 点点集的总数为 C_M^n , 假设搜索算法采用穷举搜索, 则搜索算法从所有点集中找出符合时间相关性点集的平均搜索次数为 C_M^n / C_N^n , 取 $M=100, N=10, \Delta=2$, 则平均搜索次数随 n 点变化如图 4 所示。

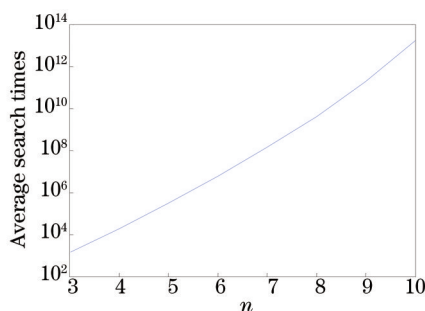


图 4 平均搜索次数随 n 点变化图

Fig.4 Average search times depending on n

由图可知,随着 n 递增并接近于 N , 平均搜索次数呈指数增加, 为权衡测距提取精度与提取速度, 需对 n 进行合理选取。首先对 T_{bin} 的大小进行合理选取, 以确保 N 足够大而能够进行 n 点点集的相关特性搜索 ($3 \leq n \leq N$)。然后, 对每脉冲回波信号的数目进行估计^[18], 并将估计得到的每脉冲回波数目与总脉冲数目 M 相乘获得 N 的估计值 N' , 定义衰减因子 α (一般取 0.7), 最终, n 的选取规则如下式:

$$n = \alpha \cdot N', \quad (5)$$

在实际激光漫反射测距实验中, 可以通过真实的测距结果对每脉冲回波信号的数目进行反馈修正, 以使 N' 更为精确。

3 在线提取方法实现

3.1 寻优评价指标

实现 M 点中的 n 点搜索问题首先需给出合理的评价指标, 基于短时数据线性度和相邻数据关联度给出具体评价指标, 首先, 短时下符合直线特征的点集首要标准应满足线性拟合的均方根最小且点集的分布应集中在拟合直线附近。假定某一主波时刻 t_i 的碎片测量距离和预估距离分别为 $O(t_i)$ 、 $C(t_i)$, 可得 O-C 残差为

$$\Delta(t_i) = O(t_i) - C(t_i). \quad (6)$$

对自变量为主波时刻的 n 个 O-C 残差值进行线性拟合, 得到拟合后主波时刻对应的残差值为 $\Delta'(t_i)$ 。定义拟合后的均方根值为 σ , σ 的计算如下:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [\Delta'(t_i) - \Delta(t_i)]^2}{n-1}}. \quad (7)$$

为量化点集的分布特征, 利用 3σ 原则, 对 n 点进行筛选, 记录满足 $|\Delta'(t_i) - \Delta(t_i)| < 3\sigma$ 点的个数, 定义为 $N_{3\sigma}^{\text{line}}$ 。此外, 对于相邻几段短时数据, 虽未必符合线性特性, 但仍具有相近的数据走向。从已提取出的有效数据中选取最新的部分数据, 定义该部分数据为趋势指示数据, 对该部分数据进行线性拟合, 根据 (7) 式求取当前 n 点点集与拟合直线的均方根值 σ' , 采用类似于 3σ 原则的思想量化数据关联度, 对当前 n 点进行筛选, 记录 $|\Delta'(t_i) - \Delta(t_i)| < 3\sigma'$ 点的个数, 定义为 $N_{3\sigma'}^{\text{trend}}$, $N_{3\sigma'}^{\text{trend}}$ 越大, 说明当前待处理数据中与原数据趋势一致的数据点越多。

根据以上讨论, 定义算法适应度 F , 其表达式如下:

$$F = N_{3\sigma'}^{\text{trend}} \cdot N_{3\sigma}^{\text{line}} / \sigma, \quad (8)$$

式中 σ 越小, $N_{3\sigma}^{\text{line}}$ 越大, $N_{3\sigma'}^{\text{trend}}$ 越大则 F 就越大, F 越大, 则表明点集越符合短时数据线性度和相邻数据关联度, 即点集的时间相关性强。

3.2 并行寻优搜索

遗传算法^[19]是一类借鉴生物界的进化规律演化而来的随机化搜索方法。其不受函数连续性的限定, 具有优异的自适应寻优和全局寻优能力。因此, 采用遗传算法对在线处理中每一组待处理数据进行寻优搜索。定义激光漫反射系统观测步长为 T_{step} , 在 T_{step} 内探测到的所有数据点为在线数据, 表示激光漫反射系统最新探测的数据。为增加时间相关信息利用率, 遗传算法保留最近一次遗传算法寻优得到的最优结果, 定义为缓存数据, 其在时间轴上与在线数据相邻, 与在线数据中的回波信号具有很强时间相关性。

根据最近一次寻优更新后的缓存数据, 初始化初始种群, 个体中在线数据部分采用随机方法初始化, 若为第一次遗传算法, 则对缓存数据与在线数据部分皆采用随机方法初始化。因 n 点点集选自 M 点点集中, 因此, 定义点集中每个点都对应 $0-M$ 范围中唯一编号, 则可以用 n 个整数的序列对 n 点点集进行编码。

接着, 基于初始化种群产生新种群, 采用经典遗传算中的轮盘赌法作为适者生存的选择机制对初始种群遗传进化, 该机制中适应度大的个体会更多的繁殖机会, 采用中间重组方法对每一个体进行交叉互换, 采用实值变异因子进行变异操作。为保证算法提取速度, 遗传算法对在线数据和缓存数据共同进化, 对两部分数据的交叉互换和突变区分对待, 对缓存数据部分采用低交叉互换概率和突变概率, 而对新数据部分采用高的交叉互换概率与突变概率, 因此, 缓存部分数据稳定的缓慢收敛, 而新数据则震荡的快速收敛。这

使得缓存数据中适应度高的缓存数据会更多地被保留,而新加入的数据会被快速筛选以获得正确的回波信号。采用遗传算法并行寻优,使得最优个体中的在线数据与缓存数据两部分可以相互矫正:基于缓存数据提高在线数据搜索正确率,基于时效性强的在线数据优化缓存数据的精度,最终充分利用有效信号的时间相关性快速获得较高精度的回波信号。

因每一点与独有编号一一对应,在新种群的产生中,其新个体内可能存在有相同点,需对新种群的新个体进行合法性检验,若发现存在相同点,则用时序上相近的点进行代替。最后,对种群中的每一个体计算适应度,记录当代种群中适应度最大的个体,算法进入下一代,重新初始化遗传算法基本参数,并重复以上操作,直到达到设定的最大代数要求,此时记录中适应度最大的点集个体即为遗传算法所得的最优解,并将其视为有效信号提取结果。设定最低适应度标准以筛选所得结果,保证最优解的正确性,若到达最大代数时仍没有满足最低适应度要求,则遗传算法不返回任何结果,遗传算法寻优搜索的流程图如图4(b)所示。

3.3 在线提取方法流程

为实现对激光测距数据在线的动态处理,首先对O-C残差数据进行分块划分,主要分为三个部分:1)已提取有效数据;2)待处理数据;3)待观测数据。已提取数据表示经在线提取方法处理,已被固定下来的有效数据点,待处理数据表示当前在线提取方法正在处理的数据,待观测数据表示激光漫反射测距系统正在在线观测所得数据,在线提取方法数据关系图如图5所示。

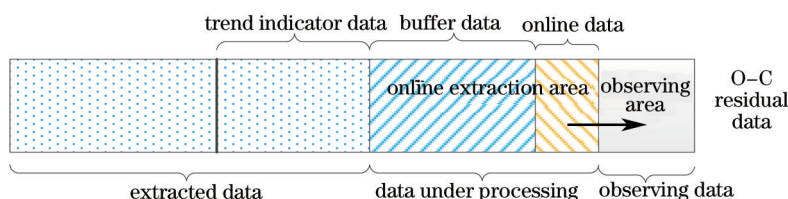


图5 在线提取方法数据划分图

Fig.5 Online extraction data partition diagram

根据观测步长 T_{step} 的设定,每当待观测数据累计达到一定数量,将该部分数据作为在线数据与缓存数据合并为待处理数据进行遗传算法处理。为避免选取观测步长内信号波动引起数据缺失或不足,导致回波信号时间相关性差而无法正确提取,初始化时取较长观测步长 T_{step} 内的在线数据进行寻优搜索。寻优搜索结束后首先判定是否有寻优结果,并记录无寻优结果的次数,定义为 i , i 初始值为0。若得到寻优结果,则筛选寻优结果中符合要求的数据,将其加入已提取有效数据中,将寻优结果剩余部分作为下一次操作的缓存数据保存,并更新趋势指示数据;若没有寻优结果,且 i 超过一定阈值,则重启在线提取方法,重启机制增加了在线提取算法的稳健性。在在线提取方法处理的同时,激光漫反射探测系统进行并行观测,将新观测到的数据存入待观测数据缓存,当新观测到的数据再次达到观测步长 T_{step} 对应的阈值时,重复以上步骤,在线提取方法流程图如图4(a)所示。

4 方法验证

为检验在线提取方法对实测数据的提取效果,本文采用中国科学院云南天文台的实验观测数据进行提取。实验观测数据有效信号占比低,且有效信号多出现长时中断,为保证信号的正确提取,设定观测步长 T_{step} 为4 s,待处理数据时长 T_{bin} 为20 s,初始化观测时长设为45 s,选取20110124-10517和20110125-17590两次观测数据进行处理,O-C残差数据如图2所示,采用在线提取方法处理后提取效果如图7所示,提取结果如表1。图7(a)、(c)将在线提取计算过程中全部的缓存数据显示出来,图7(b)、(d)为最终提取出的有效数据。计算环境为win7系统下的Matlab,采用主频3.6GHz的Intel Core i7-4790处理器,计算机缓存8GB。

目标17590是尺寸为10.4 m×3.9 m的残骸,在150 s的观测时段内,共观测到1141个测量数据,73个有效点。图7(a)与图7(b)中,除末尾处数据外,回波信号提取效果较为理想,回波信号在全部测距数据中的信号占比从0.0657提高到0.78,回波信号提取基本正确,初始化寻优时间72.20 s,一次观测平均处理时间3.42 s,基本满足在线提取要求。末尾处因出现错误数据导致整体测距提取误差较大,其根本原因是图2(a)中末端回

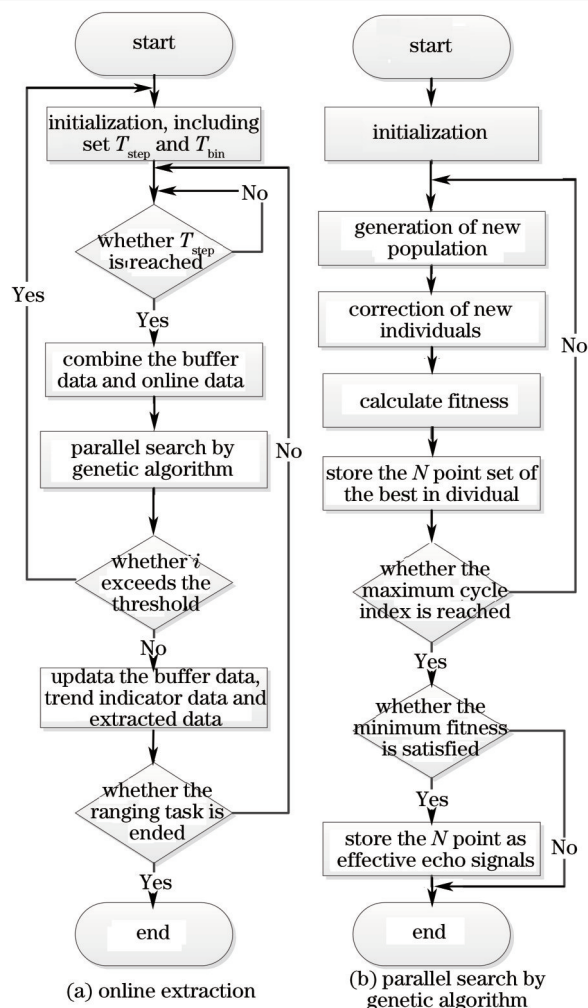


图 6 在线提取方法流程图

Fig.6 Online extraction flow diagram

波信号缺失,提取结果在有回波信号的时间段内测距精度并未有明显恶化。但为保证回波信号在线提取,在数据缺失的条件下本方法仍搜索并给出与原有数据时间相关性一致的结果,这样一旦回波信号重新出现,则仍可以沿着原有数据时间相关性强的方向继续搜索。

目标 10517 是尺寸为 $6.4\text{ m}\times 2.0\text{ m}$ 的残骸,在 150 s 的观测时段内,共观测到 1004 个测量数据,73 个有效点。回波信号在全部测距数据中的信号占比从 0.0727 提高到 0.91,测距提取误差为 0.96 m ,回波信号提取正确,初始化寻优时间 67.48 s ,一次观测平均处理时间 3.11 s ,基本满足在线提取要求。在线提取方法具有从极低的噪声中提取信号的能力,但在局部数据缺失或数据关联度低的位置,本算法会出现极少数坏点。由图 7(c)可观察到其存在一处偏差明显的坏点,但通过缓存数据与在线数据的双向矫正,最终有效数据将该点剔除。

然而,由表 1 可知,本方法存在较高的漏检率,一方面为保证处理速度,(5)式对 n 进行选取时做了一定衰减,另一方面是为保证可靠性,由于回波信号不均匀,难以在线给出真实的总回波信号数 N ,因此需做一定衰减以留出冗余。虽然存在一定漏检率,但对真实数据的提取实验表明,本文在线提取方法具有从极低的噪声中快速提取信号的能力,而且通过缓存数据与在线数据的并行优化,双向矫正,可以提高最终有效信号的测距精度。

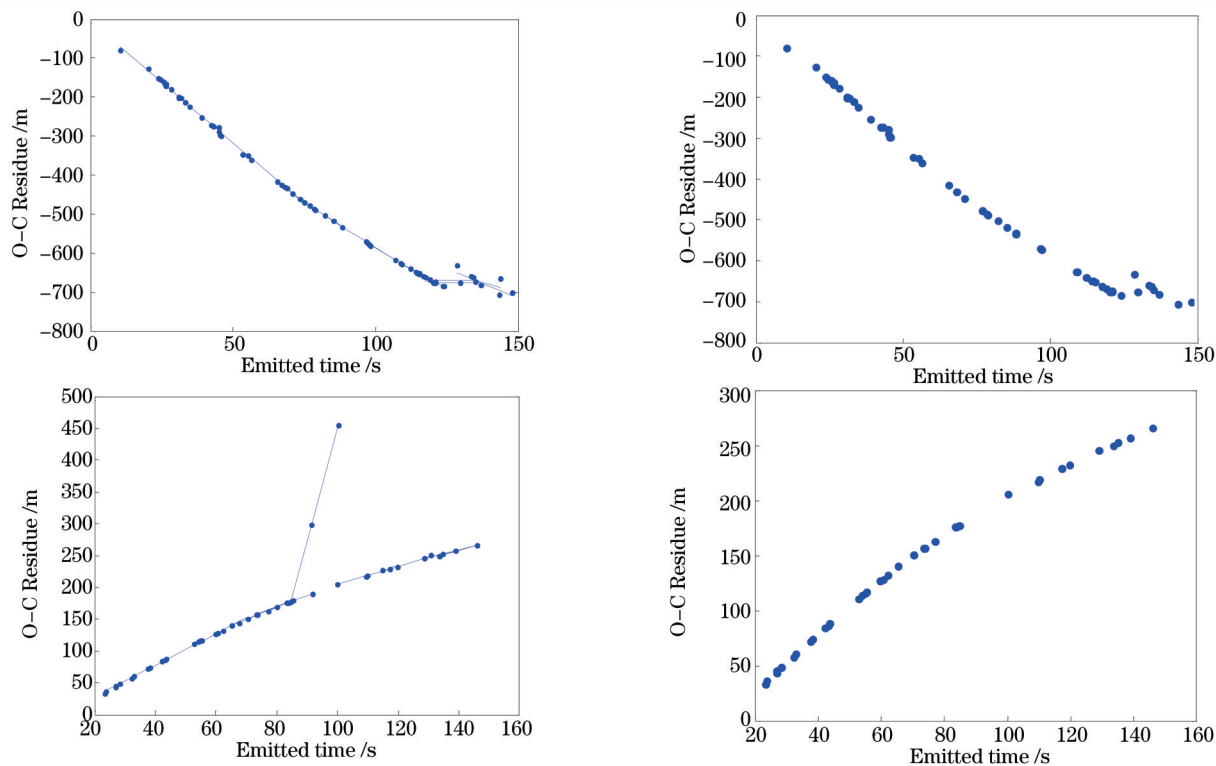


图 7 在线提取方法实测数据处理结果

Fig.7 Online extraction result for experimental results

表 1 在线提取方法实测数据处理结果

Table 1 Online extraction result for experimental results

Objects	Date	Experiment				Online extraction			
		Total /echo	Echo ratio	Total /echo	Echo ratio	Loss ratio	Error /m	Initial search time /s	Average processing time in one observation /s
17590	2011/01/25	1141/75	0.0657	55/43	0.78	0.43	17.17	72.20	3.42
10517	2011/01/24	1004/73	0.0727	43/39	0.91	0.47	0.96	67.48	3.11

5 结 论

本文提出了一种基于时间相关性的激光漫反射测距在线提取方法,将激光漫反射数据提取简化为短时内基于时间相关性从 M 点中搜索 n 点问题,并理论验证基于时间相关性提取方法的正确性,通过权衡提取速度与提取精度,给出 n 点选取法则。接着,定义均方根 σ 与 $N_{3\sigma}^{line}$ 量化短时数据线性度,定义 $N_{3\sigma'}^{trend}$ 量化相邻数据关联度,给出算法适应度 F 评价回波信号数据的时间相关性高低。采用遗传算法对 n 点点集进行搜索,视 n 点点集编码为种群中的个体,并将待处理的 n 点点集分为缓存数据与新数据两部分,为增强搜索速度,缓存数据部分采用低交叉互换概率和突变概率,而新数据部分采用高的交叉互换概率与突变概率,使得缓存部分数据稳定的缓慢收敛,而新数据则震荡的快速收敛。为增加有效信号时间相关性的利用率,对缓存数据与在线数据进行并行优化,相互矫正,实现对缓存数据测距精度的优化与在线数据提取正确率的提高,最终获得同时具有较好速度和较高精度的回波信号数据。通过仿真与实验验证,本方法在低信噪比情况下,有很好的噪声抑制能力,特别是对时间相关性强的数据能获得更可靠提取效果。

然而,本方法漏检概率较高,下一步将对 n 的最优取值自适应选取开展研究,以降低有效信号的漏检概率,并进一步降低测距提取误差。

参 考 文 献

1 Rykhlova L V, Attia G F, Ghoneim R, et al.. Analytical studies for photometric and positional observations of space debris[J]. International Journal, 2014, 2(11): 713-722.

- 2 NASA Orbital Debris Program Office. NASA-NOAA Suomi NPP Satellite Team Ward off Recent Space Debris Threat[EB/OL].<http://www.nasa.gov/content/goddard/nasa-noaa-suomi-npp-satellite-team-ward-off-recent-space-debris-threat/>. [2014-10-22].
- 3 Sun H, Zhang H F, Zhang Z P, *et al.*. Experiment of diffuse reflection laser ranging to space debris and data analysis[J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2015, 15(6): 909.
- 4 Bennett J C, Sang J, Smith C H, *et al.*. Accurate orbit predictions for debris orbit manoeuvre using ground-based lasers[J]. *Advances in Space Research*, 2013, 52(11): 1876-1887.
- 5 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.
- 6 Chen Ruiqiang, Jiang Yuesong. Method of measurement on time-interval in pulsed laser ranging[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(2): 0212004.
陈瑞强, 江月松. 脉冲激光测距的时间间隔测量方法[J]. *光学学报*, 2013, 33(2): 0212004.
- 7 Chen Ruiqiang, Jiang Yuesong, Pei Chao. High Frequency and high accuracy laser ranging system based on double thresholds leading-edge timing discrimination[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(2): 0912002.
陈瑞强, 江月松, 裴朝. 基于双阈值前沿时刻鉴别法的高频脉冲激光测距系统[J]. *光学学报*, 2013(9): 0912002.
- 8 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.
- 9 Zhao P, Zhang Y, Qian W P, *et al.*. Investigation of Geiger-mode detector in multi-hit model for laser ranging[J]. *Science China Technological Sciences*, 2015, 58(5): 943-950.
- 10 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.
- 11 Gurtner W, Pop E, Utzinger J. Improvements in the automation of the Zimmerwald SLR station[C]. *Proceedings of the 13 th International Work Shop on Laser Ranging*, 2002: 129.
- 12 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.
- 13 Zhang Zhongping, Kirchner G, Xia Xiaohai. Satellite return identification and real-time improvement of orbit prediction[J]. *Shanghai Astronomical Observatory Yearbook*, 2001, 22: 80-83.
张忠萍, G Kirchner, 夏小海. 卫星激光测距中回波实时识别和预报轨道的实时修正[J]. *中国科学院上海天文台年刊*, 2001, 22: 80-83.
- 14 Luck J, Moore C, Greene B. Autonomous laser ranging results from mount stromlo[C]. *Proceedings of the 12 th International Workshop on Laser Ranging*, 2000: 2212.
- 15 Degnan J J. Optimization of the correlation range receiver parameters in SLR2000[C]. *Proceedings of the 13 th International Laser Ranging Workshop*, 2002: 327.
- 16 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.
- 17 Li Zhulian, Li Yuqiang, Fu Honglin, *et al.*. Design and realization of a 10 Hz diffuse-reflection laser ranging control system[J]. *Astronomical Research and Technology*, 2012, 9(3): 302-307.
李祝莲, 李语强, 伏红林, 等. 10 赫兹漫反射激光测距控制系统的设计与实现[J]. *天文研究与技术: 国家天文台台刊*, 2012, 9(3): 302-307.
- 18 Ye Shuhua, Huang Cheng. *Astrogeodynamics*[M]. Jinan: Shandong Science and Technology Publishing House, 2000.
叶淑华, 黄城. *天文地球动力学*[M]. 济南: 山东科学技术出版社, 2000.
- 19 Zou Xiaobo, Zhao Jiewen. Methods of characteristic wavelength region and wavelength selection based on genetic algorithm[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(7): 1316-1321.
邹小波, 赵杰文. 用遗传算法快速提取近红外光谱特征区域和特征波长[J]. *光学学报*, 2007, 27(7): 1316-1321.