

文章编号: 1672-8785(2016)06-0024-06

运动条件下光子计数激光测距系统 点云数据的处理

郑向阳 丁宇星 王海伟 黄庚华

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

摘 要: 研究了运动条件下光子计数激光测距系统的探测机制, 分析了该系统在数据处理中涉及到的回波光子信号的统计特性、探测概率等理论问题。针对运动条件下的测距背景, 根据该系统的回波信号特点, 基于 Matlab 产生了符合统计分布规律的包含目标回波和噪声回波的仿真信号。在对泊松滤波算法等传统数据处理算法进行研究的基础上, 提出了一种改进的基于栅格滤波的算法, 并利用该算法对仿真回波数据进行了处理, 最终有效滤除了随机分布于整个探测空间的噪声信号, 获得了目标的运动轨迹。与传统的数据处理算法相比, 该算法对运动条件下的光子计数激光测距数据具有良好的处理效果。

关键词: 光子计数; 运动条件; 激光测距; 数据处理算法; 仿真

中图分类号: V556.7 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2016.06.005

Processing of Point Cloud Data for Photon Counting Laser Range Finder System under Movement Condition

ZHENG Xiang-yang, DING Yu-xing, WANG Hai-wei, HUANG Geng-hua

(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: The detection theory of a photon counting laser range finder system under movement condition is studied. The theoretical issues such as statistic distribution features and detection probability involved with the data processing of the system are analyzed. According to the ranging background under movement condition and the characteristics of echo signals of the system, the simulation signals containing target echo signals and noise echo signals which correspond to the statistic distribution features are generated by Matlab. On the basis of the research on the traditional data processing algorithms such as Poisson filtering algorithm, an improved algorithm based on raster filtering is proposed. The algorithm is used to process the simulated echo wave data. Finally, the noise signals distributing randomly throughout the detection space are filtered out effectively and the motion trajectory of the target is obtained. Compared with the traditional data processing algorithms, this algorithm is more effective in the processing of photon counting laser ranging data under movement condition.

Key words: photon counting; movement condition; laser ranging; data processing algorithm; simulation

收稿日期: 2016-04-10

基金项目: 中国科学院国防预研基金项目 (CXJJ-14-S133)

作者简介: 郑向阳 (1990-), 男, 山东淄博人, 硕士, 主要从事光子计数激光测距技术方面的研究工作。

E-mail: zhengxy@mail.ustc.edu.cn

0 引言

获取地面目标的距离信息是激光测距系统的重要功能。随着激光测距技术发展和应用的深入,利用激光测距原理实现地形地貌的三维信息测量,为陆地观测和城市建模提供高精度的表面信息,已成为激光测距系统的重要应用。机载激光测距方法等运动条件下的目标距离信息测量方法受到人们越来越多的重视^[1-4]。

光子计数激光测距技术是通过分析目标返回的离散回波光子信号的统计特性得到目标的距离信息的。该技术尤其适合于微弱光子信号的探测,可以对远距离、低回波能量目标实现高速、低能耗和高精度的距离信息获取。传统的光子计数激光测距系统在测距过程中需要累积一定时间的计数以进行统计分析。对于空间位置变化较快的目标,该技术存在累计次数不足的问题,无法有效提取出运动目标的位置^[5]。大量实验表明,在光子计数激光测距系统中,对实验数据进行统计学滤波、利用软件算法和数据后处理弥补各种物理滤波方法的不足,是一种有效可行的点云数据处理方案^[6]。

作为一种先进的主动光电探测技术,光子计数激光测距技术的发展历程相对较短。光子计数激光测距的基本原理与人卫测距相同,都需要实现信噪比低且包含大量噪声的信号提取。人卫测距的径向位移速度相对较低,运动轨道相对确定,国内外在该方面的研究工作比较成熟。人卫测距中信噪比低且包含大量噪声的回波数据提取已经形成了较完备的理论和算法^[7]。目前,国际上针对光子计数激光测距系统的数据处理技术部分借鉴了人卫测距中的数据处理经验。

韩国 KAIST 研究团队提出了一种较简捷的信号阈值提取算法。该算法将空间距离门内的探测空间划分为多个距离栅格,利用目标信号在距离栅格内的相关性,通过单个栅格内的光子事件密度统计实现信号提取^[8]。英国 Heriot-Watt 大学利用光子计数模式下目标距离的相关性,采用高重频的激光脉冲对发射脉冲进行编码,对

探测器接收到的回波信号与发射脉冲进行相关运算,最终得到目标的距离信息^[9]。美国 sigma Space Corp 和佛罗里达大学较系统地研究了将人卫测距中的泊松滤波算法和距离相关算法应用于光子计数激光测距系统中数据处理的可行性^[10]。

运动条件下目标距离信息的获取是机载光子计数激光测距系统的应用难点之一。由于地形地貌起伏、飞机的飞行高度变化等因素会造成激光测距系统与目标之间存在相对运动。传统光子计数激光测距技术中的噪声滤除和数据提取算法,如泊松滤波算法、距离相关检测算法和残差比较法等,都主要针对静止目标进行测距,较依赖于目标距离信息的精确预报,难以通过距离累积得到有效的距离数据信息^[11]。因此,研究运动条件下光子计数激光测距系统的数据处理技术,有利于实现运动条件下该系统对目标信号距离信息的准确提取,可提高该系统的性能。

1 光子计数激光测距系统数据处理算法研究

1.1 传统光子计数激光测距数据处理算法研究

传统的线性体制激光测距仪的每一次激光脉冲发射都可以获得对应的明确的回波信号,而且回波信号的信噪比较高。目标回波和噪声回波具有不同的幅值,因此,可以通过在回波探测电路中设置阈值电平将目标信号和噪声信号区分开。

作为一种基于微弱光子信号累积探测的测距技术,光子计数激光测距技术可以将激光测距系统的探测灵敏度提高到极限值^[12]。然而,探测灵敏度的提高同时也会使回波信号中的噪声信号大量增加,回波信号和噪声信号的幅值相同,因此无法通过经典的阈值比较方法来进行信号识别。

泊松滤波算法是一种基于概率探测的数据处理算法,它在人卫测距以及光子计数激光测距系统数据处理领域中已经得到较广泛的应用。实践证明,该算法可以实现含大量噪声的低信噪比有效信号的提取。泊松滤波算法的基本设计

思路为：将原始点云信号在时间轴（对应距离信息）上划分为多个时间段，寻找背离噪声分布规律均匀的时间段，即可识别目标信号。文献 [11] 介绍了一种泊松滤波算法在人卫测距中的典型应用，通过多个时间栅格在整个距离门内扫描统计，利用目标信号与噪声信号分布概率的不同可以将有效信号提取出来。因此，研究泊松滤波算法有助于对光子计数激光测距系统中数据处理技术的研究。

在泊松滤波算法中，距离栅格的选取和鉴别阈值的设定会对算法的性能产生较大影响。若距离栅格或鉴别阈值设定不当，目标信号会被淹没在背景噪声中，特别是在背景光强烈等信噪比极低的情况下。因此，滤波算法的设计需要结合回波数据的特点，系统设计参数和工作环境等因素，合理设计提取算法的各项参数，达到预期的数据提取能力。文献 [10] 研究得到，泊松滤波算法中的最优化鉴别阈值可以确定为

$$n_{bins} = \frac{t_{gate}}{\tau_{bin}} \quad (1)$$

$$C = \frac{N_s + N_n}{N_n} \quad (2)$$

$$K_{opt} = \frac{N_s + \ln(n_{bins})}{\ln(C)} \quad (3)$$

式中， t_{gate} 表示门控时间宽度， τ_{bin} 表示单个距离栅格所对应的时间值， n_{bins} 为数据提取过程

中所划分的距离栅格数量，常量 C 为单个距离栅格内回波信号和噪声信号的比值， K_{opt} 为最优化鉴别阈值。

1.2 运动条件下光子计数激光测距数据处理算法设计

传统的光子计数激光测距数据处理算法如泊松滤波算法主要针对静止目标测距等激光测距系统与目标相对位置变化较小的情况，没有涉及运动条件下光子计数激光雷达点云数据的处理，且较依赖目标距离信息的精确预测。

基于上述泊松滤波算法存在的不足，本文根据运动条件下光子计数激光测距系统回波数据的分布特性，结合泊松滤波算法，针对运动条件下光子计数激光测距提出了一种大栅格初步滤波和小栅格精细化滤波的数据处理算法，具体实现流程如图 1 所示。

算法的具体处理步骤如下：

(1) 将模拟产生的回波初始点云数据以大栅格划分为子单元，计算各单元内的回波事件数。

在划分大栅格时，为了将累积时间内的目标回波事件都包含在大栅格内，不丢失目标回波数据的有效信息，结合运动条件下光子计数激光测距系统与目标相对运动速度的先验信息，

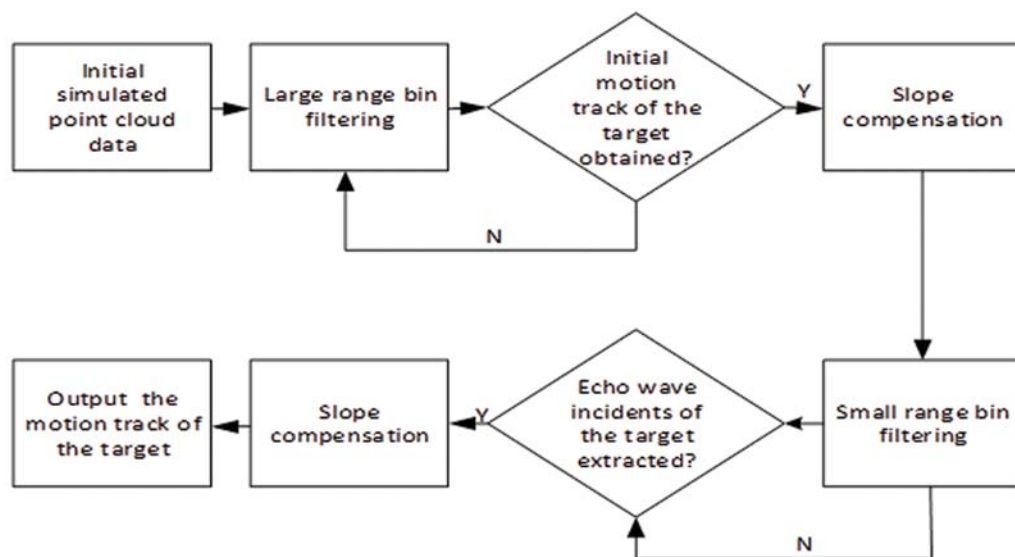


图 1 运动条件下光子计数激光测距数据处理算法的流程图

大栅格的划分需满足以下条件:

$$L \geq v\Delta t \quad (4)$$

式中, L 表示大栅格的尺度大小, v 表示光子计数激光测距系统与目标相对运动速度的先验信息, Δt 表示一个大栅格内的光子事件累积时间。

(2) 根据目标回波事件的相关性, 出现目标回波的距离栅格内的回波事件数会明显多于其他单元。大栅格划分后, 以回波点云事件数出现概率最大的大栅格内的回波事件数为依据, 结合测距背景下的系统参数, 设定阈值 K_b :

$$K_b = K_{opt} \cdot \alpha\left(\frac{1}{v}\right) \cdot \beta(t_{bin}) \quad (5)$$

式中, α 、 β 分别为与相对速度预估值和大栅格时间长度相关的系数, 以此提取出若干栅格单元, 然后根据这些栅格单元提取目标的初步运动趋势 v (速度估计), 并筛选其他单元, 后续计算不再考虑。

(3) 传统小栅格滤波算法主要针对静止目标。在运动条件下进行小栅格划分时, 由于目标在小栅格光子事件累积时间内会产生较大位移, 无法将目标的有效信号完整包含在小栅格内。经大栅格初始滤波后, 将筛选后的距离栅格回波事件利用初步运动趋势 v 进行斜率补偿, 即将一定累积时间 Δt 内目标由运动产生的相对位移 $v\Delta t$ 从后续划分小栅格中各个光子事件对应的距离信息中去除, 等效为将运动目标转变为静止目标。

(4) 将利用初步运动趋势进行斜率补偿后的回波点云数据用小栅格划分, 设定阈值, 精细地筛选出相关的目标回波事件, 并再次进行斜率补偿, 恢复两次筛选出的回波事件的原始信息, 得到目标信号的运动轨迹。由于测距背景为匀速运动情况, 两次斜率补偿都采用了大栅格划分后得到的同一个运动趋势 v , 斜率补偿所采用的速度信息并未产生变化, 大栅格以及小栅格划分时都采用了固定步长, 所以经两次斜率补偿后目标的原始运动信息不会产生任何变化。

泊松滤波算法等传统的光子计数激光测距系统数据处理技术也涉及到了栅格滤波算法,

但主要应用于相对静止条件下的目标测距。本文提出的算法利用大栅格初步滤波后得到运动条件测距背景下的运动趋势, 然后采用运动趋势进行斜率补偿, 以将数据点等效为静止条件下的点云数据。从而采用栅格滤波算法进行目标数据的提取, 最后经过再次斜率补偿还原原始信号, 从而得到目标信号的运动轨迹。此外, 结合后续硬件算法的实现, 大栅格初始划分滤除无效信息在理论上有助于减少目标运动信息提取过程中需处理的数据量。

2 运动条件下光子计数激光测距系统回波光子信号的模拟

2.1 回波光子信号的特性分析

光子计数激光测距系统每个距离栅格的探测概率是信号光电子和噪声光电子共同作用的结果。若每个栅格对应的光子信号强度为 $N_{sn}(i)$, 对应的探测概率为 $P_{sn}(k, i)$, 当该栅格内存在目标信号时, 则有

$$N_{sn}(i) = N_s(i) + N_n(i) \quad (6)$$

式中, i 为栅格序号, k 为栅格内出现的光子个数。

$N_s(i)$ 为栅格内的目标信号强度^[6]:

$$N_s = \frac{\rho \cdot \eta_t \cdot \eta_r \cdot r^2 \cdot E_t \cdot A_r \cdot A_t}{\pi \cdot \alpha^2 \cdot R^4} \cdot \frac{\eta_q}{E_\lambda} \quad (7)$$

式中, ρ 为目标反射率, η_t 为发射系统效率, η_r 为接收系统效率, τ 为大气透过率, E_t 为激光发射能量, A_r 为接收口径, A_t 为空间目标雷达截面积, η_q 为探测效率, α 为激光发散角, R 为激光雷达到目标的距离, E_λ 为单光子能量。 $N_n(i)$ 为栅格内的背景光等噪声强度^[13]:

$$N_n = \frac{\rho \cdot E \cdot \Delta\lambda \cdot \theta_{fov}^2 \cdot A_r \cdot \eta_r \cdot \eta_q}{4h\nu} + n_{dark} \quad (8)$$

式中, $E_\lambda = h\nu = 3.736 \times 10^{-19} J$, 为单光子能量, E 为辐射照度, $\Delta\lambda$ 为窄带滤波片的带宽, n_{dark} 为探测器本身的暗计数。栅格内没有任何光子事件 ($k=0$) 时, 被探测到的概率为^[14]

$$P_{sn}(k=0, i) = \exp[-N_{sn}(i)] \quad (9)$$

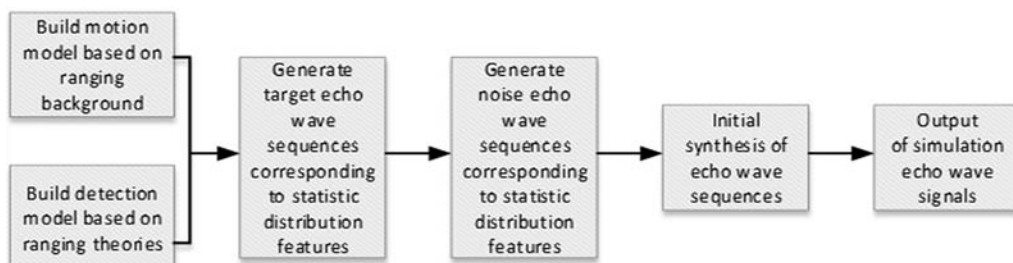


图 2 回波光子信号模拟流程图

因此, 单个距离栅格的信号探测概率为

$$P_{sn}(i) = 1 - \exp[-N_{sn}(i)] \quad (10)$$

考虑到死时间效应^[15], 信号的探测概率可以表述为

$$P_{sn}(i) = \exp(-k_d N_n) \{1 - \exp[-N_{sn}(i)]\} \quad (11)$$

式中, k_d 为探测器死时间占用的距离栅格数量。光子计数激光测距系统的实际探测概率定义为系统接收端探测到的回波次数与发射端发射的脉冲次数之比:

$$P = \frac{N_r}{N_t} \times 100\% \quad (12)$$

式中, P 为光子计数激光测距系统的实际探测概率, N_r 为接收端探测到的回波次数, N_t 为发射端发射的回波次数。

2.2 测距模型的建立与回波光子信号的模拟

结合上述理论分析中光子计数激光测距系统回波信号中目标信号和噪声信号的分布特点以及理论公式, 针对运动条件下的目标测距背景, 建立了光子计数激光测距模型, 基于 Matlab 生成了符合统计分布规律的模拟回波光子信号, 具体实现流程如图 2 所示。

运动模型中, 假设目标由远及近, 逐渐接近, 目标的运动方式为匀速运动。探测模型中, 假设光子计数激光测距系统发射后会在下一次发射前接收到在时间轴上离散的回波事件。在某个时间点上回波事件用有无表示, 无回波表示为 0, 有回波表示为 1。回波可能是有效目标回波, 也可能是噪声。

在模拟回波初始点云数据生成时, 死时间设定为 40 ns, 每个时间栅格为 100 ps, 探测空间内的信号光电子强度设为 7×10^9 counts/s。考虑背景光等噪声信号较少的理想探测情况, 探测空间内的噪声光电子强度设为 7×10^3 counts/s。由式 (9) 可知, 模拟回波点云数据中的理论信号探测概率为 50.3%。

截取的两段光子计数激光测距系统的回波原始点云数据如图 3 和图 4 所示。

图 3 和图 4 中, 横轴表示激光发射次数, 纵轴表示对应的距离值, 模拟的光子计数激光测距系统的激光发射重频为 1 KHz, 目标分别以 50 m/s 和 100 m/s 的速度由远及近运动。

从光子计数激光测距系统的模拟原始点云数据可以看到, 其回波信号的特性主要有以下几点:

(1) 信号特性: 在目标回波信号出现的距离栅格处, 信号探测概率较高。由于目标距离信息具有一定的连续性和相关性, 目标信号出现处回波数据具有一定的相关性。

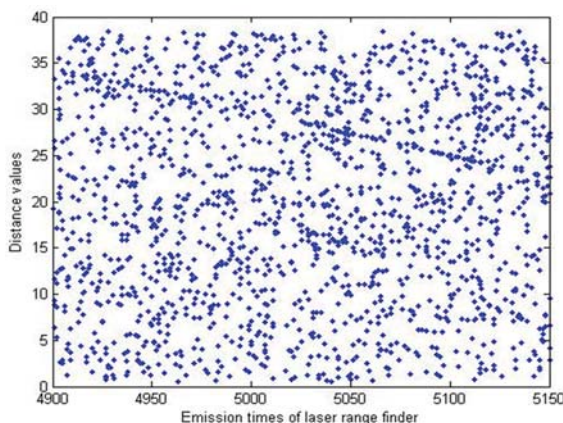


图 3 模拟 50 m/s 运动条件下的原始点云数据

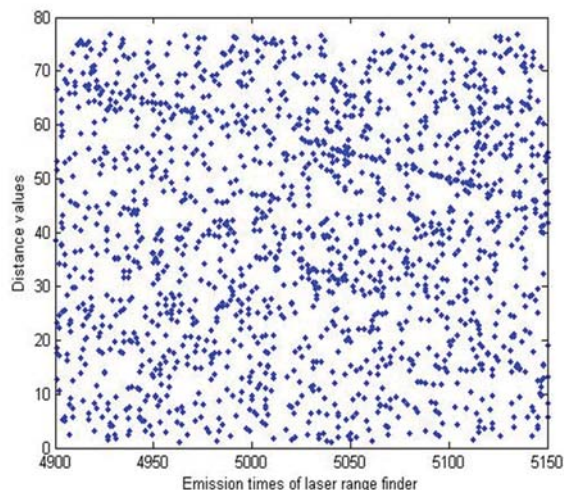


图 4 模拟 100 m/s 运动条件下的原始点云数据

(2) 噪声特性: 可认为噪声信号随机地分布于整个空间, 其分布特性可依照噪声信号的理论模型分析。

通过分析模拟回波数据可知, 生成的模拟回波数据中目标回波和噪声回波具有不同的分布概率。在目标信号出现的位置上, 回波信号具有一定的相关性, 其统计特性符合前文对光子计数激光测距系统回波信号的理论分析。

3 运动条件下光子计数激光测距系统回波数据算法处理及结果分析

3.1 算法实现结果

为了验证算法对运动条件下光子计数激光测距系统回波数据的处理性能, 文章利用所提出的算法对生成的模拟 50 m/s 和 100 m/s 运动条件下的原始回波点云数据进行处理, 最终成功将随机分布的噪声信号滤除, 得到了目标的运动轨迹。

经过大栅格滤波结合小栅格滤波处理后, 最终得到的回波点云数据处理结果如图 5 和图 6 所示。

3.2 算法处理结果分析

从处理结果可以看出, 经过大栅格初步滤波结合小栅格提取算法处理后, 原始点云数据中的噪声被有效滤除, 得到清晰的目标信号的运动轨迹。在截取的回波点云数据中, 激光发射

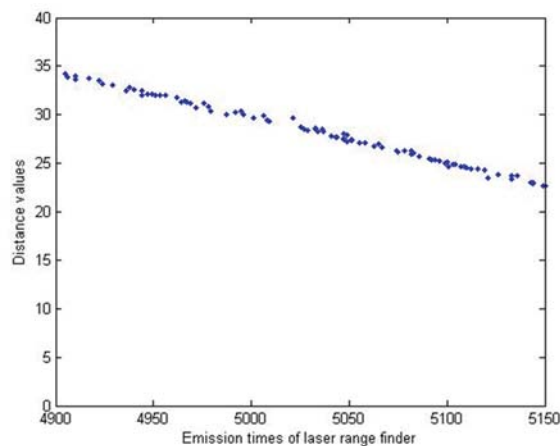


图 5 50 m/s 运动条件下点云数据处理结果

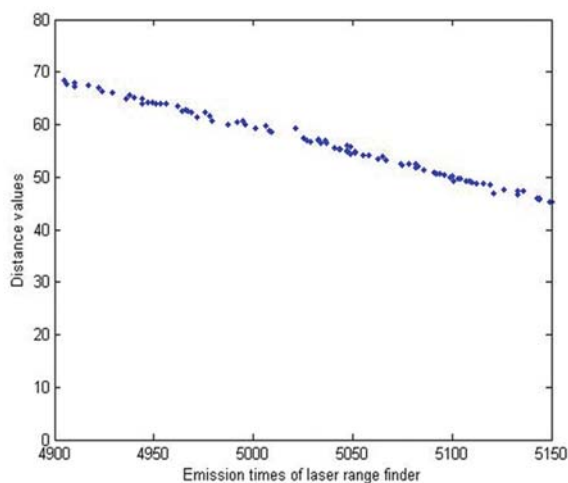


图 6 100 m/s 运动条件下点云数据处理结果

次数为 250, 探测到 114 次目标回波脉冲。由式 (10) 可知, 基于该算法处理的运动条件下光子计数激光测距系统的实际探测概率为 45.6%, 与理论探测概率值接近, 可以实现对运动条件下光子计数激光测距回波点云数据中目标信号的有效提取。

4 结束语

针对运动条件下的光子计数激光测距问题, 提出了一种基于栅格滤波的改进的数据处理算法。利用该算法可以有效滤除模拟回波原始点云数据中存在的大量随机噪声信号, 成功提取出回波数据中的有效信号, 得到目标的运动轨迹。下一步工作重点将集中在基于该算法的硬件实现以及算法在不同运动模式背景下的适应性研究方面。

(下转第 46 页)