光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2021.03.024

基于 Hough 变换的天基激光测距轨迹提取算法

董书舟[1,2]，强　佳[1]，舒　嵘[1,2]*

（1. 中国科学院上海技术物理研究所 空间主动光电技术重点实验室，上海 200083；2. 中国科学院大学，北京 100049）

摘　要： 天基目标测量具有全天时、不受大气干扰等优点。但与地面人卫测距相比，天基待测目标运动速度快且缺乏距离预报等先验信息，导致传统测距方法无法有效提取目标距离轨迹。为此，文章提出了一种基于 Hough 变换的激光测距距离轨迹提取算法，利用目标回波点之间的线性相关性将直线检测算法引入回波轨迹的提取，具有适应天基探测特性、抗噪声能力强等特点。实验结果表明，使用该方法提取的目标距离轨迹均方根误差优于 2.72 m。上述方法可以准确地提取高速移动目标的距离轨迹，为后续空间非合作目标的距离轨迹提取提供了新的途径。

关键词： 激光测距；Hough 变换；改进距离门；参数空间划分

中图分类号： TP228.5　**文章编号：** 1001－5868(2021)03－0430－07

Space-based Laser Ranging Trajectory Extraction Algorithm Based on Hough Transform

DONG Shuzhou[1,2], QIANG Jia[1], SHU Rong[1,2]

（1. Key Lab. of Space Active Opto-Electronic Technology, Shanghai Institute of Technical Physics of the Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, CHN; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, CHN）

Abstract: Space-based target measurement has the advantages of being all-day and free from atmospheric interference, but compared with ground-based human-guarded ranging, the space-based target moves fast and the priori information such as distance prediction is not enough, which makes the traditional ranging methods fail to extract the target distance trajectory effectively. To address this problem, in this paper, a laser ranging distance trajectory extraction algorithm based on Hough transform is proposed, which uses the linear correlation between target echo points to introduce the linear detection algorithm into the extraction of echo trajectories, and has the characteristics of adapting to the characteristics of space-based detection and strong anti-noise capability. The experimental results show that the root mean square error of the distance trajectory extracted by this method is better than 2.72 m. The above method can accurately extract the distance trajectories of high-speed moving targets, providing a new way to extract the distance trajectories of subsequent spatial non-cooperative targets.

Key words: laser ranging; Hough transform; improved distance gate; parameter space division

0　引言

利用激光测距原理获取运动目标的距离信息，实现目标的跟踪测量，已成为激光测距系统的重要应用[1-4]。但地基测距中采用的传统距离提取算法主要应用于相对静止或有轨道预报的合作目标，经过预处理得到的激光点云数据图，可以将噪声和目标回波信号控制到较小的距离范围内，且有效抑制噪声[5]。但是在天基非合作目标测距的过程中，由于缺乏目标的距离、速度以及噪声等先验信息，在强背景噪声的情况下，目标高速大范围的运动导致传

收稿日期：2021－03－12.

基金项目：中国科学院重点部署项目(ZDRW-KT-2019-3).

* **通信作者：**舒　嵘

统测距方法无法有效提取运动距离轨迹。因此，有必要克服传统算法过于依赖目标准确预测的不足，研究适合高速移动目标的测距算法。

澳大利亚 Mt Stromlo 站[6]采用基于泊松滤波的算法去除噪声，保留有效信号，但是该方法受泊松统计滤波影响较大，对数据处理的自适应性不强。赵鹏等[7]提出一种基于时间相关性的快速提取方法，采用遗传算法将信号提取问题简化为 n 点搜索问题，并行寻优搜索信号点，该方法对于微弱回波信号具有快速提取能力，但是漏检概率较高且并行搜索运行速度较慢。李熙等[8]先将空间碎片的回波 O-C 残差图映射为二值图像，借鉴图像处理技术提取有效回波，但噪声强度较大的情况下效果较差。Jonsson 等[9]对单光子点云数据距离剖面的重建问题展开了研究，信号的重建不需要原始范围轮廓的先验信息，但简单的多项式模型对于非匀速运动目标的重建适应性较差。

本文针对目标空间位置变化快、距离远、没有准确距离轨道预报[10-12]的问题，提出一种基于 Hough 变换的天基运动目标激光测距轨迹提取算法。为有效降低距离门内噪声，提出了改进实时距离门的选取方法及阈值取值依据，讨论了 Hough 变换中参数空间的范围和分辨率，利用仿真数据进行验证，成功获取了不同场景下目标的距离轨迹并分析了算法测距误差和运算时间的影响因素。

1　Hough 变换原理

Hough 变换(HT)是 Paul Hough 于 1962 年提出的直线匹配技术[13]，是一种使用表决方式的参数估计方法，其思想是利用图像空间和 Hough 参数空间的点-线对偶性，将图像空间的直线检测转换为参数空间的峰值点检测。

Hough 变换的原理如下：在 (x,y) 平面中，直线 L 可用式(1)表示：

$$\rho = x\cos\theta + y\sin\theta = \sqrt{x^2+y^2}\sin\left(\theta + \arctan\frac{x}{y}\right) \tag{1}$$

其中，ρ 为原点到直线的距离，θ 为垂线和 x 轴的正向夹角，图像域中同一直线上的点在极坐标方程下变换为多条相交于一点的正弦曲线，此交点坐标对应直线 L 参数。在实际应用中，通常将参数空间离散化成一个二维网格，根据极坐标方程对参数空间进行投票。如果图像空间中存在一条直线，则二维网格对应的累加器出现局部峰值。通过检测这个局部峰值参数 (θ,ρ) 即可确定与该峰值对应直线的参数，从而检测出直线。

2　基于 Hough 变换的天基激光测距距离轨迹提取算法

2.1　改进实时距离门选取方式

在天基激光测距过程中，日光背景、激光后向散射等会产生大量噪声，无法区分目标信号和噪声信号。为降低此噪声的影响，需要采用距离门(Range Gate)技术，即选取特定距离内的回波光子参与算法运算。根据时间门长度和目标运动速度，设定不同宽度的距离门，以提高检测概率和数据信噪比。由于目标在短时间内做匀速直线运动，因此采用一次直线来模拟信号数据点，距离随时间变化方程为

$$S(t) = S_0 - v_0 t \tag{2}$$

其中，S_0 为目标与激光雷达系统的初始距离，v_0 为运动速度，t 为时间，$S(t)$ 为 t 时刻的目标距离。传统距离门的选取方式一般为选取时间门内目标运动的最大距离范围，距离门上下限 D_{g1}，D_{g2} 及传统距离门范围 D_g 分别为

$$\begin{cases} D_{g1} = S_0 - v_0 t_0 \\ D_{g2} = S_0 - v_0 t_1 \end{cases} \tag{3}$$

$$D_g = D_{g1} - D_{g2} = v_0(t_1 - t_0) = v_0 t_g \tag{4}$$

其中，测量初始时刻与终止时刻时间分别为 t_0，t_1，测量时间门范围为 t_g，可以看出，传统距离门的范围随着目标运动速度和时间门线性增大。在此选取方式下，距离门内的信号总个数 N_{sg} 和噪声总个数 N_{ng} 分别为

$$\begin{cases} N_{sg} = P_s \times t_g \\ N_{ng} = P_n \times v_0 t_g \times t_g \end{cases} \tag{5}$$

其中，P_s 为单个距离单元内的目标光子探测概率，P_n 为单个距离单元内的噪声光子探测概率，且噪声点在图像平面内均匀分布。实际应用中，为了保证算法解算的成功率，至少需要一定数量线性相关的信号光子，即时间门不能太短。在时间门的限制下，随着运动目标速度的提高，距离门范围迅速增大，大量噪声进入距离门内，信噪比降低，影响信号点的正确提取。为此提出一种改进的实时距离门选取方式，选取方式如图 1 所示。

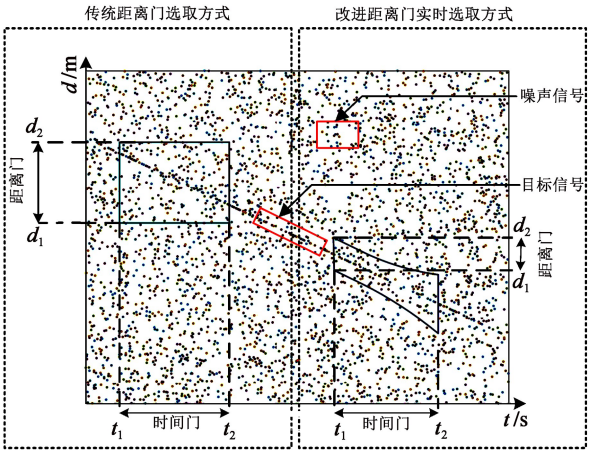


图 1 传统距离门与改进距离门选取方式示意图

式(2)中，$\boldsymbol{p}_0=(v_0,S_0)$ 为距离随时间变化方程的参数向量。当 $\boldsymbol{p}=(v,S)$ 满足 $\|\boldsymbol{p}-\boldsymbol{p}_0\|\leqslant\delta$ 时，选取 $\boldsymbol{p}$ 对应直线上的点都在距离门范围内。阈值为 δ 时，实时距离门上下限为所占区域 Q 的上下包络线。文献[14]推导出在 t 时刻，区域 Q 的上下边界包络线 D_1，D_2，即改进距离门上下限分别为

$$\begin{cases}D_1=S(t)+\delta\sqrt{1+t^2}\\D_2=S(t)-\delta\sqrt{1+t^2}\end{cases}\tag{6}$$

在改进的实时距离门选取方式下，区域 Q 内信号总个数 N_{sg} 和噪声总个数 N_{ng} 分别为

$$\begin{cases}N_{sg}=P_s\times(t_1-t_0)=P_s\times t_g\\N_{ng}=P_n\times\int_{t_0}^{t_1}\int_{S_0+v_0t-\delta\sqrt{1+t^2}}^{S_0+v_0t+\delta\sqrt{1+t^2}}\mathrm{d}s\,\mathrm{d}t=\\\qquad P_n\times2\delta\int_0^{t_1}\sqrt{1+t^2}\,\mathrm{d}t\end{cases}\tag{7}$$

落入区域 Q 内的所有数据点个数 $N=N_{sg}+N_{ng}$，阈值 δ 的选取对于距离门范围有着重要影响。一方面，如果 δ 设置过小，运动目标状态的不稳定性，容易将目标信号排除在距离门之外，造成漏检。另一方面，如果 δ 设置过大，大量噪声会进入距离门内，信噪比降低。这里综合考虑运动状态和 Hough 变换的鲁棒性等因素，阈值 δ 的选取准则设为距离内回波信号个数占总个数比例大于 50%，从而确定 δ 的取值，即

$$\frac{N_{sg}}{N}=\frac{N_{sg}}{N_{sg}+N_{ng}}\geqslant0.5\tag{8}$$

比较两种不同选取方式下的噪声大小，N_t，N_i 分别为传统距离门与改进实时距离门在时间门 t_g 内的噪声，两者噪声比值 R 为

$$R=\frac{N_t}{N_i}=\frac{P_n\times v_0t_g\times t_g}{P_n\times2\delta\int_0^{t_g}\sqrt{1+t^2}\,\mathrm{d}t}=\frac{v_0t_g\times t_g}{2\delta\int_0^{t_g}\sqrt{1+t^2}\,\mathrm{d}t}\tag{9}$$

2.2 参数空间范围选取及误差分析

在激光测距实际应用场景中，目标回波信号会受到抖动误差和背景噪声干扰的影响，运动轨迹不是一条严格的直线，参数空间的映射曲线也不一定在某一点相交，而是分布在理论点周围的一个区域，区域网格的划分由角度分辨率和极半径分辨率决定，并且影响着目标的定位精度和算法的计算速度[15-16]。当网格划分较大时，参数空间的聚集效果较差，目标定位不准确，距离误差较大；反之，网格划分较小，会增加计算量和存储空间，并且大网格下的投票数会被分散到小网格中，造成峰值点峰值不明显，影响正确峰值搜索[17]。因此需要根据系统精度要求和实时性要求，合理划分参数空间，提高运算效率和减小定位误差，以高效准确地提取出目标距离方向的运动轨迹。

上节已经分析距离门随时间的变化关系，在确保回波信号在距离门范围内的情况下，根据距离门范围和直线极坐标方程确定参数空间角度与极半径搜索范围。极半径上限 ρ_1 选择起始时刻 t_0 时距离门上限，下限 ρ_2 选择结束时刻 t_1 距离门下限，通常认为起始时刻 $t_0=0$，结束时刻 $t_1=t_g$。则极半径上限和下限 ρ_1，ρ_2 分别为

$$\begin{cases}\rho_1=S_{g1}(t_1)=S(t_1)+\delta\sqrt{1+t_1^2}=\\\qquad S_0+v_0t_g+\delta\sqrt{1+t_g^2}\\\rho_2=S_{g2}(t_0)=S(t_0)-\delta\sqrt{1+t_0^2}=S_0\end{cases}\tag{10}$$

极半径高度 ρ_h 与搜索范围分别为

$$\rho_h=\rho_1-\rho_2=v_0t_g+\delta\sqrt{1+t_g^2}\tag{11}$$

$$\rho\in[0,v_0t_g+\delta\sqrt{1+t_g^2}]\tag{12}$$

角度宽度 θ_h 与搜索范围分别为

$$\theta_h=\theta_2-\theta_1=\arctan\left(\frac{\Delta d}{\Delta t\cdot v_{min}}\right)-\arctan\left(\frac{\Delta d}{\Delta t\cdot v_{max}}\right)\tag{13}$$

$$\theta\in\left[\arctan\left(\frac{\Delta d}{\Delta t\cdot v_{max}}\right),\arctan\left(\frac{\Delta d}{\Delta t\cdot v_{min}}\right)\right]\tag{14}$$

式中，θ_1，θ_2 分别为角度搜索的起始和终止角度，v_{max}，v_{min} 分别为目标预估的最大和最小速度。

Hough 变换的参数空间横纵坐标范围分别为角度宽度 θ_h 和极半径高度 ρ_h，两者分辨率分别为

$\Delta\theta$ 和 $\Delta\rho$，则离散参数空间横纵坐标划分数量 M，N 分别为

$$M=\frac{\theta_{\mathrm{h}}}{\Delta\theta} \tag{15}$$

$$N=\frac{\rho_1-\rho_2}{\Delta\rho}=\frac{\rho_{\mathrm{h}}}{\Delta\rho} \tag{16}$$

此时参数空间共需要存储单元 S 为

$$S=\frac{\rho_{\mathrm{h}}}{\Delta\rho}\cdot\frac{\theta_{\mathrm{h}}}{\Delta\theta}=M\cdot N \tag{17}$$

计算过程是对每个数据点遍历所有的离散值 $\Delta\theta$，则复杂度 C 为

$$C=N\cdot\frac{\theta_{\mathrm{h}}}{\Delta\theta} \tag{18}$$

假设搜索到的参数空间峰值坐标为(θ,ρ)，通过极坐标方程还原到图像空间，得到直线目标距离 $s(t)$和速度 $v(t)$的计算公式：

$$s(t)=\frac{\rho}{\sin\theta}+d_1 \tag{19}$$

$$v(t)=\frac{\Delta d}{\Delta t}\cdot\tan\theta \tag{20}$$

其中，d_1 为 t_0 时刻距离门下限。在角度分辨率一定的情况下，参数空间一个网格内的极半径误差为 $\Delta\rho$，则距离误差 $\Delta s(t)$为

$$\Delta s(t)=\frac{\Delta\rho}{\sin\theta}=\frac{v_0t_{\mathrm{g}}+\delta\sqrt{1+t_{\mathrm{g}}^2}}{N\cdot\sin\theta} \tag{21}$$

通过对式(17)，(18)，(21)分析可知，参数空间极半径分辨率越高，距离误差 $\Delta s(t)$越小，可以得到更精确的目标位置，但是需要更大的存储空间和计算量，对测距实时性造成挑战，所以需要设置合理的极半径分辨率，使其能够既准确又高效地提取出目标距离轨迹。

测距误差可以通过实测距离与理论距离的均方根误差(RMSE)表示，该 RMSE 由下式计算：

$$RMSE=\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(s'(t_i)-s(t_i))^2} \tag{22}$$

其中，n 为测量周期的次数，$s'(t_i)$是计算出的目标距离，$s(t_i)$是实际或模拟的目标距离。

2.3　激光测距回波提取算法过程

针对基于 Hough 变换的运动目标激光测距回波轨迹提取算法，上文对算法执行过程中距离门的选取方式、参数空间范围以及间隔划分对算法测距误差和计算量的影响进行了详细的分析讨论。在算法处理过程中，为满足天基测距中边采集边处理的实时性，整个测距过程分为两个阶段：初始阶段和跟踪阶段。初始阶段目标的运动距离、速度均未知，此时采用传统距离门选取方式，选取大范围的点云数据参与运算，得到目标的距离和速度信息后，为后续跟踪阶段距离门参数选择提供参考。跟踪阶段已经获得了较为准确的距离和速度信息，采用改进实时距离门选取方式，减小距离门内噪声，通过沿时间轴执行迭代过程，实时更新目标的距离和速度信息。图 2 所示为其算法流程示意图。

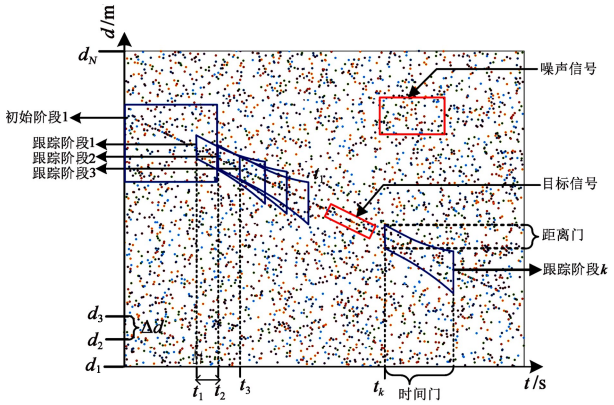


图 2　激光测距算法执行过程示意图

具体执行步骤如下：

(1)选取初始阶段范围内的点云数据。采用传统距离门方式，选取较大范围内点云数据。

(2)利用 Hough 变换原理将选取数据变换到参数空间，并确定角度和极半径的搜索范围和分辨率。

(3)搜索参数空间中的峰值坐标(ρ_1,θ_1)，通过式(19)、(20)获取目标距离 $s(t_1)$和速度$v(t_1)$信息。

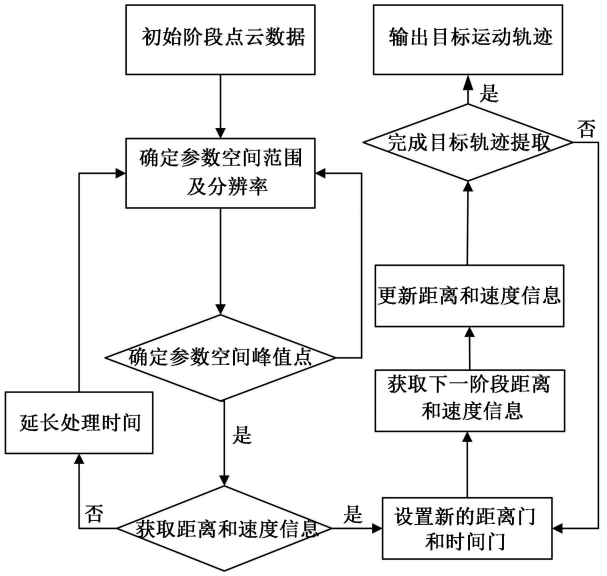


图 3　Hough 变换提取目标运动轨迹方法流程图

(4)采用改进实时距离门选取方式,预估下一阶段运动距离范围,确定跟踪阶段距离门。

(5)时间门沿时间轴向后迭代处理,重复执行步骤(2)～(4),计算出后续距离 $s(t_n)$ 和速度 $v(t_n)$,以实时更新距离和速度信息,完成目标跟踪测距工作并获取距离轨迹。距离轨迹提取算法流程图如图3所示。

3 方法验证及结果分析

为了验证算法的可行性,首先生成了符合运动特性的回波信号数据和噪声数据,使用此模拟数据分析了不同参数空间分辨率、不同信噪比和不同运动速度对算法精度与运算时间的影响。计算机CPU为intel Core i7-9700,内存32 GB。

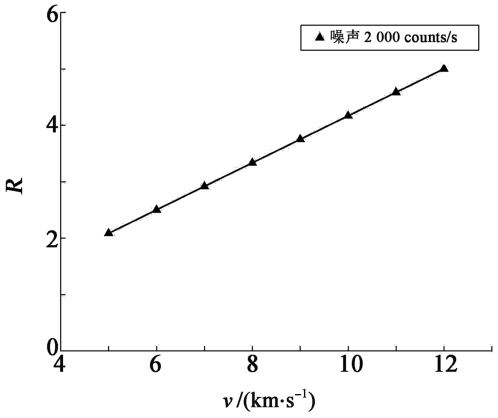
激光雷达系统的实际参数和目标的运动特性、参数如表1所示。

表1 系统和目标仿真参数

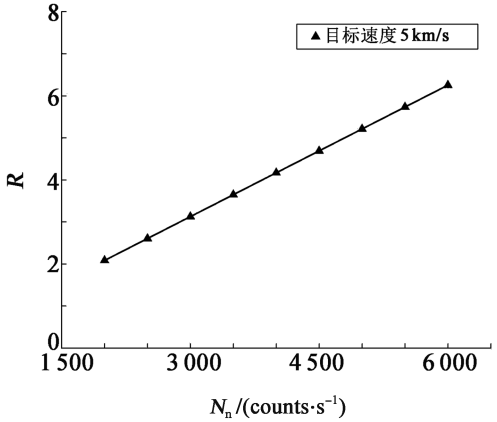
仿真参数	值
雷达重复率/Hz	100
测距分辨率/m	1.5
目标探测概率	0.1
目标初始距离/km	900
目标速度/(km·s^{-1})	10
总仿真时间/s	15
角度划分数	50～400
极半径分辨率	0.05～0.70
加速度/(m·s^{-2})	0～50
噪声强度/(counts·s^{-1})	2 000～6 000

为验证上文提出的改进距离门的合理性,定量分析了初始阶段两种距离门选取方式的噪声比值 R 与运动目标速度 v 的关系,如图4所示。

改进距离门选取方式能够有效减少距离门内噪声,两种选取方式的噪声比值随着目标运动速度和



(a) 目标速度对噪声比值的影响



(b) 噪声强度对噪声比值的影响

图4 两种距离门选取方式的噪声比值

背景噪声强度 N_n 的增大呈线性增大,速度每提升1 km/s,噪声比值 R 提高0.42;噪声强度每提高500 counts/s,噪声比值 R 提高1.04。

在目标速度 $v_0=10$ km/s,角度划分数 $M=250$,极半径分辨率 $\Delta\rho=0.25$,噪声强度 $N_n=4\,000$ counts/s 的条件下,其他参数同表1,激光雷达点云数据仿真图和使用上述算法得到的目标轨迹如图5所示。

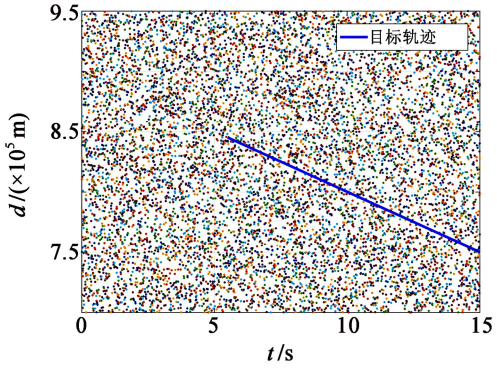


图5 原始点云数据图

图6给出了不同角度划分和不同极半径分辨率对仿真结果的影响。其中,图6(a)对应 $N_n=2\,000$ counts/s,$\Delta\rho=0.25$;图6(b)对应 $N_n=2\,000$ counts/s,$M=250$。图7～8为 $M=250$,$\Delta\rho=0.25$,$N_n=2\,000$ counts/s 时,距离RMSE和算法运行时间 t_r 随 M,$\Delta\rho$,N_n 及 v_0 的变化趋势图。其中RMSE由式(22)计算得出,算法运行时间为一个周期所需的处理时间。

由图6～7可见,参数空间划分、数据噪声和目标运动状态对于测距精度与运算时间有着重要影响,具体表现为:

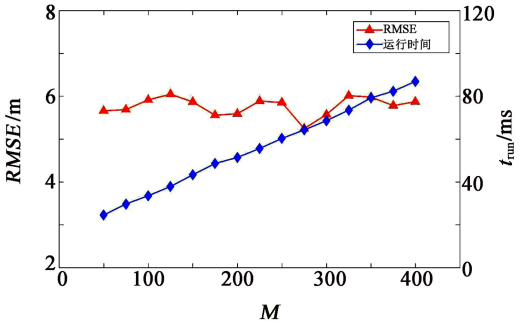
(1)参数空间划分对于算法测距精度和运算时

间有着明显影响，角度划分数量对于测距精度没有明显影响，但数量的增加会导致算法处理时间的增加，间隔数量每增 50，运算时间 t_{run} 平均增加 8.85 ms。空间极半径分辨率越高即划分越精细，算法误差越小，分辨率每提高 0.1，RMSE 平均减少 2.21 m，运算时间增加 5.97 ms。但是分辨率不能无限提高，目标速度为 10 km/s，当分辨率提高到 0.04 时，RMSE 误差达到 21.28 m，说明正确峰值被周围伪峰值包围，搜索到错误峰值对应的错误距离值；

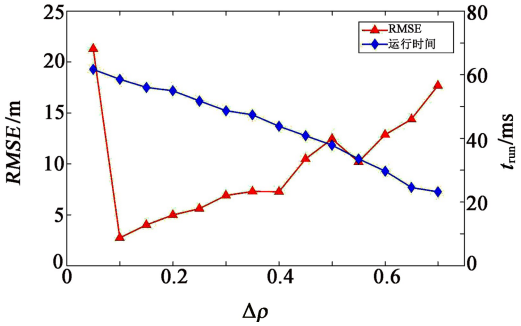
(2)目标运动状态对于距离均方根误差有明显影响，运动速度每降低 1 km/s，RMSE 平均减少 0.53 m，且目标的非匀速运动会对算法误差造成较大影响，加速度越大，RMSE 越大；

(3)在探测概率满足算法最低解算要求下，噪声强度的减小和探测概率的提升对于算法精度没有明显提高，较大的噪声强度会导致运算量增加、运行时间延长，证明了改进实时距离门选取方式的合理性。

综上所述，在基于 Hough 变换的激光测距回波信号提取过程中，根据目标运动特性和信号噪声强度选择合理的算法参数，既能降低目标的测距误差，又能提高算法的运算效率，达到精确高效提取目标距离轨迹的目的。

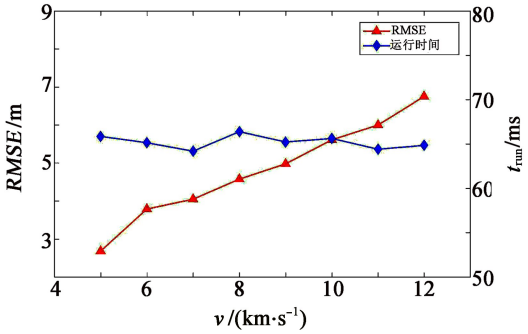


(a)　不同角度划分

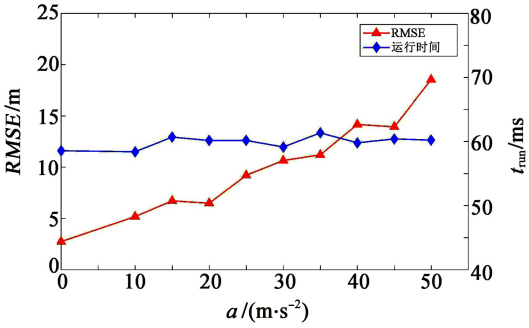


(b)　不同极半径分辨率

图 6　参数空间划分对结果的影响

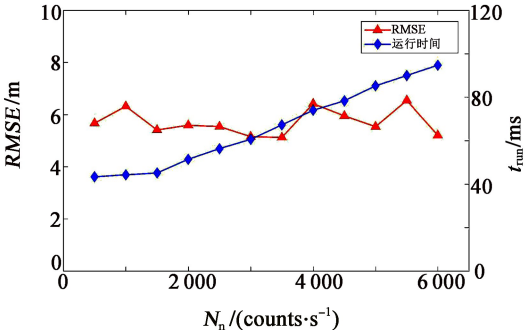


(a)　不同运动速度

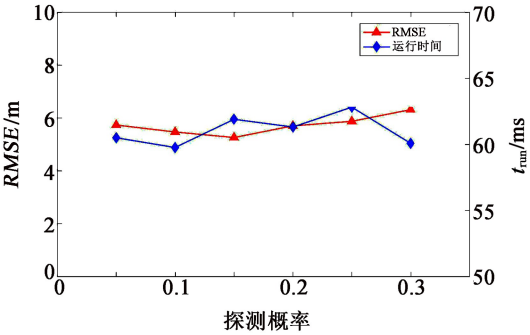


(b)　不同运动加速度

图 7　目标运动状态对结果的影响



(a)　不同噪声强度



(b)　不同信号强度

图 8　噪声和探测概率对结果的影响

4　结　论

本文提出了一种基于 Hough 变换的激光测距回波轨迹提取算法。改进的实时距离门选取方式能

够明显降低距离门内噪声,在噪声大和速度快的场景下效果尤为明显。分析了 Hough 变换中参数空间范围和分辨率对存储空间、计算复杂度和测距精度的影响。使用运动目标的模拟仿真数据进行验证,实验结果表明,在 1 000 km 级探测范围,目标运动速度为 10 km/s,探测概率为 0.1,噪声强度为 2 000 counts/s 的条件下,使用该方法并选择合适参数提取的目标距离轨迹均方根误差优于 2.72 m。因此,本算法对于不同场景运动速度快、没有准确轨道预报的目标信号具有良好的提取效果,能够正确地获取目标距离轨迹,算法流程和参数选择具有可行性和合理性。

但是当使用该算法处理分散程度较高或长时间中断的目标信号时,算法得出的距离误差较大。下一步应当对提取出轨迹线附近的回波信号光子进行再处理,研究如何提高定位精度的问题。

参考文献:

[1] Appleby G M, Bianco G, Noll C E, et al. Current trends and challenges in satellite laser ranging[C]// Proc. of Inter. Vibi Service for Geodesy & Astrometry General Meeting, 2016: 15-24.

[2] McGarry J, Hoffman E, Degnan J, et al. NASA's satellite laser ranging systems for the twenty-first century[J]. J. of Geodesy, 2019, 93(11): 2249-2262.

[3] Steindorfer M A, Kirchner G, Koidl F, et al. Daylight space debris laser ranging[J]. Nature Communications, 2020, 11(1): 1-6.

[4] Kim W, Jang J, Han S, et al. Absolute laser ranging by time-of-flight measurement of ultrashort light pulses[J]. JOSA A, 2020, 37(9): B27-B35.

[5] Samwel S, Metwally Z, Mikhail J, et al. Analyzing the range residuals of the SLR data using two different methods[J]. NRIAG J. Astron Astrophys, 2005, 4(1): 1-14.

[6] Luck J, Moore C, Greene B. Autonomous laser ranging results from mount stromlo [C]// Proc. of 12th Inter. Workshop on Laser Ranging, 2000: 2-12.

[7] 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): 288-296.
Zhao Peng, Zhang Yan, Zhang Xiaoya, et al. Echo online extraction for diffuse reflection laser ranging[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(10): 288-296.

[8] 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): 188-195.
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): 188-195.

[9] Jonsson P, Hedborg J, Henriksson M, et al. Reconstruction of time-correlated single-photon counting range profiles of moving objects[C]// Inter. Society for Optics and Photonics, 2015, 9649: 964905.

[10] Bao Z, Li Z, Shi Y, et al. Coincidence photon-counting laser ranging for moving targets with high signal-to-noise ratio[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2014, 26(15): 1495-1498.

[11] 王 楠, 邓华荣, 张海峰, 等. 1 064 nm 波段白天背景噪声分析及应用研究[J]. 激光与红外, 2019, 49(10): 1190-1194.
Wang Nan, Deng Huarong, Zhang Haifeng, et al. Daytime background noise analysis and application research in 1 064 nm band[J]. Laser & Infrared, 2019, 49(10): 1190-1194.

[12] 周 辉, 李 松, 王良训, 等. 噪声对星载激光测高仪测距误差的影响[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(8): 2256-2261.
Zhou Hui, Li Song, Wang Liangxun, et al. The influence of noise on range error for satellite laser altimeter[J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(8): 2256-2261.

[13] Hough P V. Method and means for recognizing complex patterns: US, US3069654A[P]. 1962.

[14] 刘 通, 陈 浩, 沈 鸣, 等. 随机 Hough 变换提取空间碎片激光测距有效回波[J]. 中国激光, 2016, 43(4): 175-185.
Liu Tong, Chen Hao, Shen Ming, et al. Effective echo extraction for space debris laser ranging using randomized Hough transform[J]. Chinese J. of Lasers, 2016, 43(4): 175-185.

[15] 王竞雪, 朱 庆, 王伟玺, 等. 结合边缘编组的 Hough 变换直线提取[J]. 遥感学报, 2014, 18(2): 378-389.
Wang Jingxue, Zhu Qing, Wang Weixi, et al. Straight line extraction algorithm by Hough transform combining edge grouping[J]. J. of Remote Sensing, 2014, 18(2): 378-389.

[16] Immerkaer J. Some remarks on the straight line Hough transform[J]. Pattern Recognition Letters, 1998, 19(12): 1133-1135.

[17] 张振杰, 郝向阳, 刘松林, 等. 基于 Hough 一维变换的直线检测算法[J]. 光学学报, 2016, 36(4): 166-173.
Zhang Zhenjie, Hao Xiangyang, Liu Songlin, et al. Line detection based on Hough one-dimensional transform[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(4): 166-173.

作者简介:

董书舟(1995—),男,湖北随州人,硕士研究生,主要从事激光雷达点云数据处理研究;

舒 嵘(1971—),男,上海人,博士,研究员,主要从事空间主动光电载荷研制及光量子雷达技术方面的研究。