光电智能识别与感知

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.20260427001

GM-APD激光雷达动态小目标超分辨率测距方法

冯 谦[1]，雍诗祺[2]，金长江[1*]，裴 杰[1]，黄旭恒[2]

（1. 中国电子科技集团公司第二十七研究所，郑州 450047；2. 哈尔滨工业大学 航天学院，哈尔滨 150001）

摘 要： 针对GM-APD单光子激光雷达在远距离、强噪声环境下对动态小目标测距易受噪声干扰、精度不足的问题，文章提出一种动态小目标超分辨率测距方法。该方法通过连续帧分块重构、密度筛选噪声过滤、最小距离值特征点群质心提取、十字邻域滤波，结合强度像与距离像优化加权平均，实现超分辨率时间间隔测距。在半仿真数据的实验测试中，针对静态小目标的测距精度提升1.896 bin，置信度为64%；针对动态小目标的测距精度改进量为1.554 2 bin，置信度为75%。该统计模型模拟了飞行器进近时与单光子激光雷达运动耦合导致的复杂随机回波光子事件，这对后续算法的深入研究以及进一步验证系统性能边界具有参考价值。

关键词： GM-APD激光雷达；超分辨率测距；连续帧重构；动态测距

中图分类号： TN958.98 **文章编号：** 1001－5868(2026)05－0820－07

Super-Resolution GM-APD LiDAR Method for Dynamic Small Targets

FENG Qian[1], YONG Shiqi[2], JIN Changjiang[1], PEI Jie[1], HUANG Xuheng[2]

(1. The 27th Research Institute of CETC, Zhengzhou 450047, CHN; 2. School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, CHN)

Abstract: GM-APD Single-photon LiDAR is susceptible to noise interference and offers insufficient accuracy when ranging dynamic small targets at long distances and in high-noise environments. This paper proposes a super-resolution ranging method to overcome these issues. This method achieves super-resolution time-interval ranging by combining continuous frame block reconstruction, density screening and noise filtering, centroid extraction of feature point groups with minimum distances, cross-neighborhood filtering, and optimized weighted averaging of intensity and distance images. Experimental tests using semi-simulated data demonstrate that the proposed method improves the ranging accuracy by 1.896 bin (64% confidence level) for static small targets, and by 1.554 2 bin (75% confidence level) for dynamic ones. This statistical model simulates the complex, random echo photon events caused by the motion coupling between an approaching aircraft and a single-photon LiDAR, thus facilitating subsequent algorithm development and system performance boundary verification.

Key words: GM-APD LiDAR; super-resolution ranging; continuous frame reconstruction; dynamic ranging

0 引言

单光子激光雷达自20世纪90年代问世以来[1]，其凭借单光子级探测灵敏度、皮秒级时间分辨率、厘米级测距精度及系统集成度高等优势，被广泛应用于空间态势感知、无人系统自主导航、复杂环境

收稿日期：2026－04－27.

* 通信作者：金长江

监测等领域[2-3]。NASA、MIT 林肯实验室、Heriot-Watt 大学以及中国科学技术大学、哈尔滨工业大学、北京航空航空大学等机构[4-9]均开展了大量相关研究工作，推动该技术在远距离三维成像领域持续发展。

在实际应用中，空间碎片、微型无人机、远距离特征点等动态小目标具有尺寸小、回波信号弱、运动速度快、背景噪声强等特点[10]，其测距过程极易受噪声光子与运动耦合效应影响，导致传统方法出现漏检、测距漂移、精度下降等问题[11]。单光子雷达基于 GM-APD 探测器与时间相关单光子计数（Time Correlated Single Photon Counting，TCSPC）技术工作，回波光子事件服从泊松分布，在强噪声下有效信号极易被淹没[12]。同时，激光发射功率、探测器效率、选通门宽度、激光脉宽等硬件参数共同限制了测距精度的理论上限，使得动态条件下稳定、高精度测距成为亟待解决的关键问题[13-14]。

现有测距方法多依赖峰值提取或简单滤波，对动态小目标适应性差，存在抗噪能力弱、分辨率不足、运动畸变难以补偿等缺陷[15]。为此，本文提出一种面向动态小目标的超分辨率测距方法，通过连续帧分块重构、密度筛选去噪、最小距离值特征点团质心提取、十字邻域滤波及距离值作强度加权融合，实现弱信号条件下的高精度测距。室内半仿真实验验证了该方法在静态与动态场景下的有效性，可为真实场景数据处理提供理论依据与算法参考。

1　单光子激光雷达测距原理

单光子激光雷达的测距原理是基于“光子计数”和“时间统计”来实现极高精度距离测量。单光子激光雷达发射脉冲激光，接收端使用 GM-APD 探测器捕捉单个光子，并产生一个电脉冲信号[16]。该脉冲会被专用的读出电路及时捕获，内部的时间数字转换器（TDC）会精确记录从激光发射到探测再到回波光子之间的飞行时间（Δt），并为其打上一个时间戳，信号捕捉过程如图 1 所示。通过测量发射到接收的时间差（ToF）来计算距离[17]。

根据 ToF 基本原理，目标距离计算公式为：

$$d=\frac{c\cdot\Delta t}{2} \tag{1}$$

式中，c 为真空中光速（$c\approx 3\times10^8$ m/s），Δt 为光子往返时间差。

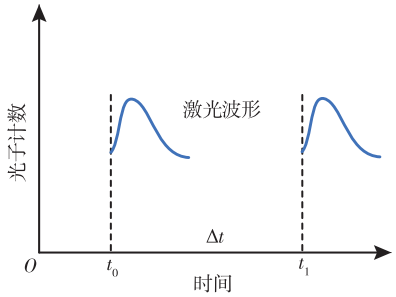
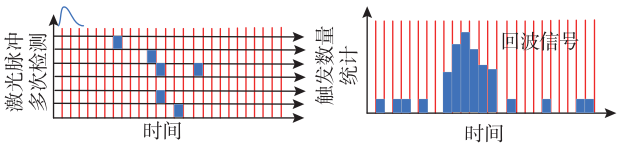


图 1　光子电脉冲信号捕捉

系统采用离散时间间隔 bin 作为计时与测距基本单元。本文实验中 TDC 时间分辨率为 1 ns，即 1 个 bin 对应 1 ns 的时间间隔。将其代入距离公式（1）可得：1 个时间 bin 等效于 15 cm 的物理距离。因此，以 bin 为单位的测距精度改进量可直接反映厘米级测距误差的改善程度。

再通过 TCSPC 技术[18]，重复无数次测量并统计结果的分布，以从极弱信号中还原波形，如图 2 所示。



（a）多次探测时序图　　（b）多次探测统计

图 2　时间飞行法测距结果

假定激光脉冲波形为高斯波形，根据激光雷达方程，选通门内的回波光子数关于时间的表达形式为：

$$N_s(t)=\frac{I(hc/\lambda)}{\pi\left(\theta_L R/2\right)^2}\frac{A_r}{R^2}\times\iint_A f_r(\theta_i,\theta_r,\varphi_r)\times\frac{1}{\sqrt{2\pi}\,\tau}\exp^{-\frac{(t-t_s-3\tau)^2}{2\tau^2}\cos\theta_i\cos\theta_r}\mathrm{d}A \tag{2}$$

式中，h 为普朗克常数，θ_L 为激光束散角，A_r 是接收镜头面积，激光脉冲的发射时间设定在脉冲波形的 -3τ 位置。

Gm-APD 的触发特性符合 Poisson 分布，对于距离选通激光雷达，在某距离范围内噪声及回波在各时间间隔的触发概率为：

$$P_{i,jk}=\exp\left(-\sum_{l=0}^{l=i-1}N_{l,jk}\right)\left[1-\exp\left(-N_{l,jk}\right)\right],\quad i=1,2,\cdots,J \tag{3}$$

式中，第一项为探测器在前 $i-1$ 个 tag 中不触发的概率，即产生 0 个初始电子的概率，$N_{0,jk}=0$；J 为选

通门的时间间隔总数。

2 动态小目标单光子超分辨率测距算法

本算法通过多阶段处理实现动态小目标高精度测距，可分为特征点提取和超分辨测距两步进行。

特征点指动态小目标上距离最近的点。首先，对连续帧数据进行分块，并对分块后的数据帧逐像元匹配滤波，通过统计各距离值出现频次筛选出频次大于阈值的目标聚类距离值（剔除低频次噪声值）。选取其中最小值作为目标特征距离值，构成稳定点初始候选点集并记录其像元坐标、数量及距离值。计算初始候选点集的全局几何质心，通过欧氏距离公式计算每个候选像元到质心的距离，对距离升序排序后取前80%的近中心像元组成目标核心点团，仅当核心点团像元数量不低于最小阈值时，保留对应的坐标值及距离值。基于保留的核心点团重新计算几何质心，以亚像素级精度确定稳定点像素坐标，经四舍五入得到整数像素坐标后，提取对应距离像值作为稳定点距离值。然后，以质心为中心并融合十字邻域帧内的信号，再次匹配滤波获得精准距离。最后，在距离值$\pm n$ bin范围内，对强度值加权平均实现超分辨测距。

2.1 连续帧重构及最小距离值提取

设原始数据为D，包含N个连续帧，将其划分为若干个大小相等的块。对于第k个块，则有：

$$B_k=\{F_{k\times M+1},F_{k\times M+2},\cdots,F_{k\times M+M}\} \tag{4}$$

式中，M为每个块包含的帧数，F_k表示第k帧的所有像元数据。

对于B_k中的某个像元p，设其在该块M帧中的原始时间序列为：

$$\boldsymbol{X}_p=\left[x_p(1),x_p(2),\cdots,x_p(M)\right] \tag{5}$$

对该序列进行匹配滤波，得到滤波后的输出序列为：

$$y_p(n)=\sum_{m=1}^{M}x_p(M)\cdot h(m-n) \tag{6}$$

式中，$h(m-n)$是与期望回波信号相匹配的滤波器模板。

输出序列$y_p(n)$中提取的该像元距离值r_p和强度值c_p为：

$$r_p=\arg\max_n\left|y_p(n)\right| \tag{7}$$

$$c_p=\max_n\left|y_p(n)\right| \tag{8}$$

距离值由峰值位置确定，强度值由峰值幅度确定。

统计块B_k中所有有效距离值的频次分布。设距离值r在块中出现的次数，即具有该距离值的像元数量为：

$$F_k(r)=\sum_{p\in B_k}\theta\left(r_p=r\right) \tag{9}$$

式中，θ为指示函数，当条件为真时，$\theta=1$；否则为0。

筛选出频次大于阈值T_F的距离值为：

$$R_k^{(\mathrm{valid})}=\left\{r|F_k(r)>T_F\right\} \tag{10}$$

在有效距离值集合$R_k^{(\mathrm{valid})}$中找到最小值，且其对应的像元数为：

$$\mathrm{Count}_k^{(\min)}=F_k\left\{\min\left[R_k^{(\mathrm{valid})}\right]\right\} \tag{11}$$

2.2 质心位置提取

设第k个块的最小距离值为$r_k^{(\min)}$，提取所有距离值等于该值的像元坐标，形成点集P_k：

$$P_k=\left\{(x,y)|D_k(x,y)=r_k^{(\min)}\right\} \tag{12}$$

式中，$D_k(x,y)$表示块k中像元(x,y)的距离值。

先计算点集P_k的初始质心$(\bar{x}_0,\bar{y}_0)$：

$$\bar{x}_0=\frac{1}{N_k}\sum_{(x,y)\in P_k}x,\bar{y}_0=\frac{1}{N_k}\sum_{(x,y)\in P_k}y \tag{13}$$

对于点集P_k中的所有点(x_i,y_i)，计算其到初始质心的欧氏距离d_i，并将其由小到大排序，提取其前80%的点作为中间点团Q_k。

$$Q_k=\left\{P_k(x,y)|d_i\leqslant 0.8\sqrt{(x_i-\bar{x}_0)^2+(y_i-\bar{y}_0)^2}\right\} \tag{14}$$

最终提取中间点团的质心位置为：

$$(\bar{x}_k,\bar{y}_k)=\frac{1}{|Q_k|}\sum_{(x,y)\in Q_k}(x,y) \tag{15}$$

该步骤可以实现目标中心精确定位，抑制离散噪声点干扰。

2.3 十字邻域滤波

上一步提取的质心位置(x_k,y_k)，其十字邻域（包含自身）构成集合为：

$$N=\{(x_k,y_k),(x_k-1,y_k),(x_k+1,y_k),(x_k,y_k-1),(x_k,y_k+1)\}$$

对于第i个像元，在第t帧接收到的原始信号

记为：

$$\boldsymbol{S}_i(t)=\begin{bmatrix} S_1(1) & S_1(2) & \cdots & S_1(T) \\ S_2(1) & S_2(2) & \cdots & S_2(T) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_5(1) & S_5(2) & \cdots & S_5(T) \end{bmatrix} \tag{16}$$

将十字邻域内的所有像元的信号逐帧累加求和，得到长度为 T 的一维向量 $\boldsymbol{F}$：

$$\boldsymbol{F}(t)=\sum_{i=1}^{5}\boldsymbol{S}_i(t),\ t=1,2,\cdots,T \tag{17}$$

再通过融合信号 $\boldsymbol{F}$ 和期望信号模板 h 的互相关来实现匹配滤波。

$$\boldsymbol{R}(n)=\sum_{t=1}\boldsymbol{F}(t)\cdot h(t-n),\ n=1,2,\cdots,T \tag{18}$$

十字邻域的距离值，由输出序列 $\boldsymbol{R}(n)$ 峰值所在的位置决定，结合该位置对应的回波信号的时间延迟，结合光速换算出目标距离，从原始数据到经十字邻域滤波处理后的最终距离值公式为：

$$d=\frac{c}{2f_s}\cdot\left\{\arg\max_n\left|\sum_{t=1}^{T}\left[\sum_{i=1}^{5}S_i(t)\right]\cdot h(t-n)\right|\right\} \tag{19}$$

式中，$S_i(t)$ 为第 i 个十字邻域像元在第 t 帧的原始信号，T 为每个块包含的总帧数，$h(t)$ 与期望回波信号形状匹配的滤波器模板，f_s 为系统采样率，$\arg\max_n$ 为寻找使输出绝对值最大的时间延迟 n。

该步骤通过峰值对应的时间延迟与光速换算目标物理距离，提升测距稳定性。

2.4　超分辨率测距

设匹配滤波后得到的距离值（峰值位置）为 r_{raw}，以此为中心，确定加权范围为：

$$B=\left\{r\in\mathbb{Z}\middle|r_{\mathrm{raw}}-n\leqslant r\leqslant r_{\mathrm{raw}}+n\right\} \tag{20}$$

采用强度值×距离值/强度值均值，首先计算加权范围内所有强度值的算术平均值：

$$\bar{I}=\frac{1}{|\mathcal{B}|}\sum_{r\in\mathcal{B}}I(r)=\frac{1}{2n+1}\sum_{r_{\mathrm{raw}}-n}^{r_{\mathrm{raw}}+n}I(r) \tag{21}$$

那么超分辨率测距值 d_{dsr} 的计算公式为：

$$d_{\mathrm{dsr}}=\frac{\sum_{r_{\mathrm{raw}}-n}^{r_{\mathrm{raw}}+n}I(r)\cdot d(r)}{\frac{\sum_{r\in\mathcal{B}}I(r)}{\bar{I}}} \tag{22}$$

式中，$I(r)$ 为第 r 个 bin 的强度值，$d(r)$ 为第 r 个 bin 对应的物理距离。

该步骤利用回波强度权重提升距离估计精度，从而实现亚 bin 级超分辨率测距。

3　仿真与实验分析

为验证本文算法对动态小目标的超分辨率测距的性能提升效果，开展基于GM-APD激光雷达探测系统的模拟动态小目标室内场景探测半仿真实验。利用GM-APD激光雷达探测系统采集模拟飞行器进近场景的距离图像、强度图像。

3.1　实验参数设置

搭建室内半仿真环境进行实验测试，实验参数如表 1 所示。场景图如图 3 所示，一模拟飞行器通过自动滑轨，可模拟小目标的动态进近或远离。使用多帧重构得到的距离像和强度像，如图 4 所示。

表 1　实验硬件配置

实验参数	信息
目标	模拟飞行器
距离	55 bin
探测器分辨率	64×64
激光脉冲宽度	10 ns
激光重频	20 kHz
选通门宽	1 μs
探测器分辨率	1 ns

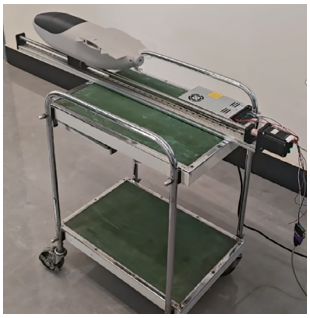
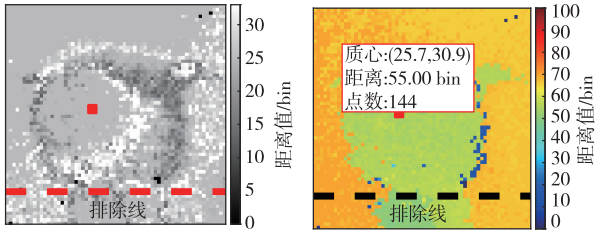


图 3　飞行器动态进近模拟实验场景图



（a）第 1 帧强度像（质心锁定）　（b）第 1 帧距离像（质心锁定）

图 4　对应动态小目标强度像和距离像

3.2　实验结果

采用单光子激光雷达在室内对静态模拟飞行器进行成像，得到了 64×64 像素的图片。首先，选择在 55 bin 位置处进行静态小目标探测成像。原始距离

频次直方图如图5所示，显示距离频次范围为0～70 bin，靠近距离门起始位置的噪声峰很高，呈现持续衰减的状态。

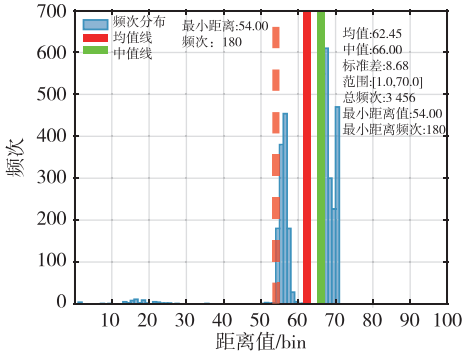


图5 静态目标第1帧距离值频次直方图

通过观察单个像素直方图统计结果，进行最小距离值像元分布，如图6所示。通过选取最小距离值的若干个像元的合集，并做中间点团处理，保留80%像元数，再取质心，得到最小距离值像元分布，并通过十字邻域算法得到测距结果；从连续帧1～600帧，以50帧连续帧为一个帧块，12个帧块的小目标特征点测距精度统计如表2所示。

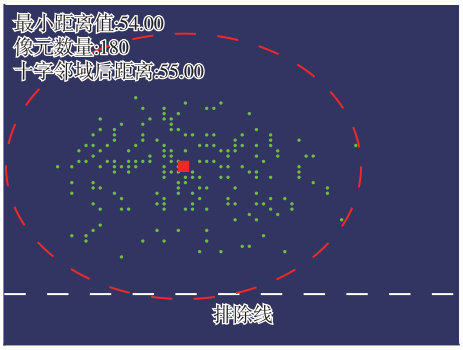
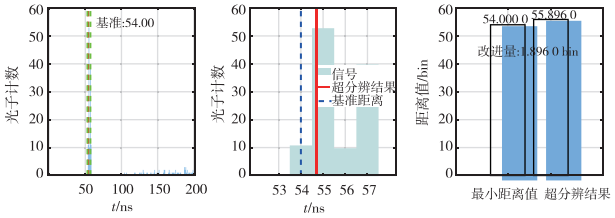


图6 静态目标第1帧最小距离值像元分布

表2 静态测距精度分析

帧块（帧数）	最小距离值	质心点集数	中心点团数	质心距离	十字邻域	超分辨率
1～50	54	180	144	55	55	55.896 0
51～100	54	181	145	54	55	55.674 5
101～150	54	178	142	55	54	55.528 0
151～200	54	181	145	55	55	55.604 8
201～250	54	188	150	54	55	55.638 9
251～300	54	179	143	56	55	55.902 1
301～350	54	170	136	55	55	56.001 5
351～400	54	180	144	56	55	56.081 3
401～450	54	172	138	55	55	55.887 6
451～500	54	184	147	55	55	55.730 6
501～550	54	180	144	55	55	55.797 6
551～600	54	194	155	54	55	55.752 4

图7为对以最小距离值为基准的子时间间隔超分辨率测距的分析，通过对基准信号的加权放大，实现了在现有时间间隔bin基础上，精度更高的子时间间隔（sub-bin）的测距结果。各帧距离值在不同算法处理过程下探测结果如图8所示。最小距离值算法一直保持结果54 bin；质心距离值算法在54～56 bin之间变化，其中输出为55 bin概率较大；十字邻域匹配滤波大部分测得结果55 bin；子时间间隔超分辨率测距结果在55.528 0～56.081 3 bin之间，测距精度更高一个数量级，改进量为1.896 0 bin，平均置信度为0.64。



（a）第1帧信号直方图 （b）加权区域放大 （c）结果对比

图7 静态小目标距离值超分辨率分析

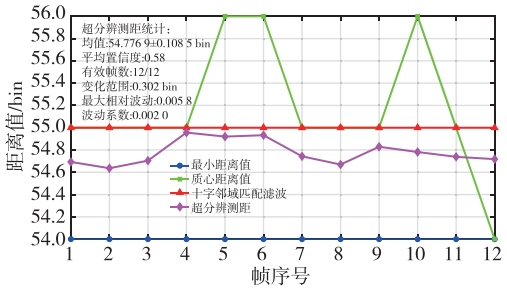
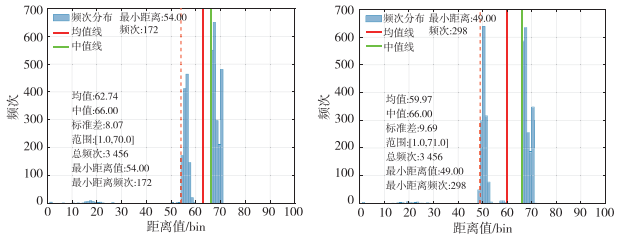


图8 静态条件下连续12帧距离值趋势对比

采用单光子激光雷达在室内对模拟飞行器在55～50 bin做往返，进行动态小目标探测，得到64×64像素的图片。原始距离频次直方图如图9所示，显示距离频次范围为0～70 bin，靠近距离门起始位置的噪声峰很高，呈现持续衰减的状态。



（a）第1帧距离频次直方图 （b）第11帧距离频次直方图

图9 动态目标第1帧与第11帧距离值频次分布图

通过观察单个像素直方图统计结果，进行最小距离值像元分布，如图 10 所示。通过选取最小距离值的若干个像元的合集，并做中间点团处理，保留 80% 像元数，再取质心，得到最小距离值像元分布，并通过十字邻域算法得到测距结果。

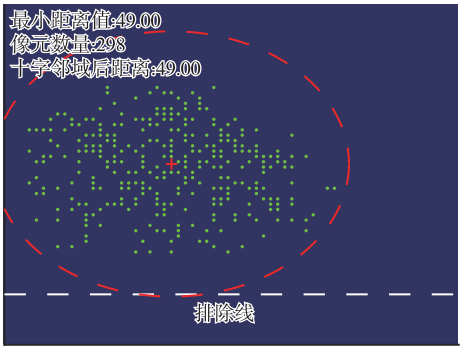


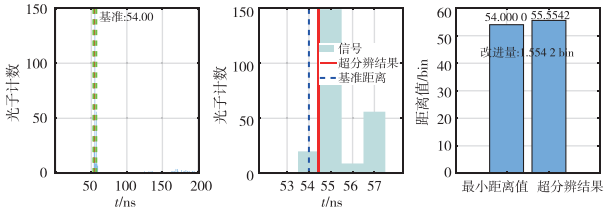
图 10　动态目标第 11 帧最小距离值像元分布

从连续帧 1～1 100 帧，以 100 帧连续帧为一个帧块，11 个帧块的小目标特征点测距精度统计如表 3 所示。

表 3　动态测距精度分析

帧块（帧数）	最小距离值	质心点集数	中心点团数	质心距离	十字邻域	超分辨率
1～100	54	172	138	54	54	55.526 7
101～200	54	248	198	54	54	55.526 7
201～300	53	112	90	53	54	55.526 7
301～400	53	369	295	53	53	53.006 3
401～500	52	234	187	52	52	52.002 9
501～600	52	495	396	52	52	52.002 6
601～700	51	263	210	51	50	50.004 0
701～800	50	275	220	50	50	50.004 0
801～900	50	525	420	50	50	50.004 1
901～1 000	49	252	202	49	49	49.003 8
1 001～1 100	49	298	238	49	49	49.003 8

图 11 为对以最小距离值为基准的子时间间隔超分辨率测距的分析，通过对基准信号的加权放大，实现了在现有时间间隔 bin 基础上，精度更高的子时间间隔 sub-bin 的测距结果，改进量 1.554 2 bin。图 12 为各帧距离值在不同的算法处理过程下的探测结果，最小距离值算法测得结果 54～49 bin；质心距离值算法测得结果在 54～49 bin；十字邻域匹配滤波大部分测得结果 54～49 bin；子时间间隔超分辨率测距结果基本在 55.526 7～49.003 8 bin 之间。动态小目标由远及近，测距变动趋势一致，且精度提高，改进量 1.554 2 bin，平均置信度为 0.75。



（a）第 1 帧信号直方图　（b）加权区域放大　（c）结果对比

图 11　动态小目标距离值超分辨率分析

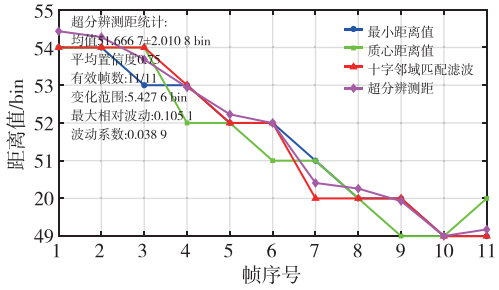


图 12　动态条件下连续 11 帧距离值趋势对比

4　结论

针对超分辨率测距处理距离精度的影响进行分析，通过连续帧重构、最小距离值特征点群的质心位置提取、十字邻域滤波到最后优化加权超分辨率分析，并将半仿真实验数据代入进行验证分析。不论针对静态小目标或动态小目标，测距精度都由 1 bin 提高到 0.001 bin；且针对动态小目标，该超分辨率测距方法具有更高置信度。这对于后续的真实实验环境下的数据处理，具有理论指导意义。

目前针对小目标的测试距离和运动速度为室内环境下搭建。在真实使用场景下，不论是背景噪声、目标运动速度、更远测试距离乃至目标表面的材质，都将为动态测距带来更多难点。后续可对回波信号的降噪处理做进一步的分析，以得到更好的动态小目标测距效果。

参考文献：

[1] Marino R, Spitzberg R, Bohrer M. A photon counting 3-D imaging laser radar for advanced discriminating interceptor seekers [C]//Annual Interceptor Technology Conference, 1993: AIAA1993-2644.

[2] 赵浴阳，周鹏飞，解天鹏，等. 单光子激光雷达技术发展现状与趋势[J]. 光电工程，2024，51(3)：7-29.
Zhao Yuyang, Zhou Pengfei, Xie Tianpeng, et al. Development status and trends of single-photon LiDAR technology[J]. Opto-Electronic Engineering, 2024, 51(3): 7-29.

[3] 张汉熠，赵新宇，张益成，等. 单光子激光雷达研究进展[J].

中国激光, 2022, 49(19): 270-287.
Zhang Hanyi, Zhao Xinyu, Zhang Yicheng, et al. Review of advances in single-photon LiDAR [J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(19): 270-287.

[4] Massa J S, Wallace A M, Buller G S, et al. Laser depth measurement based on time-correlated single-photon counting[J]. Optics Letters, 1997, 22(8): 543-545.

[5] McCarthy A, Collins R J, Krichel N J, et al. Long-range time-of-flight scanning sensor based on high-speed time-correlated single-photon counting[J]. Applied Optics, 2009, 48(32): 6241-6251.

[6] Pawlikowska A M, Halimi A, Lamb R A, et al. Single-photon three-dimensional imaging at up to 10 kilometers range [J]. Optics Express, 2017, 25(10): 11919.

[7] Henriksson M. Photon-counting panoramic three-dimensional imaging using a Geiger-mode avalanche photodiode array[J]. Optical Engineering, 2018, 57(9): 1-12.

[8] Folden J, Ingle A, Koppal S J. FoveaSPAD: exploiting depth priors for adaptive and efficient single-photon 3D imaging[J]. IEEE Transactions on Computational Imaging, 2024, 10: 1722-1735.

[9] Abazi A S, Jaha R, Graham-Scott C A, et al. Multiphoton enhanced resolution for superconducting nanowire single-photon detector-based time-of-flight lidar systems[J]. Physical Review Research, 2025, 7(3): 033114.

[10] Zhang B, Wang H, You S, et al. A small-size 3D object detection network for analyzing the sparsity of raw lidar point cloud[J]. Journal of Russian Laser Research, 2023, 44(6): 646-655.

[11] 董瑞芳, 刘 涛, 张首刚. 基于激光的高精度时间频率传递和测距技术[M]. 北京: 科学出版社, 2021.
Dong Ruifang, Liu Tao, Zhang Shougang. High-Precision Time-Frequency Transmission and Ranging Technology Based on Laser[M]. Beijing: Science Press, 2021.

[12] 彼得·塞茨,艾伯特J. P. 塞尤维森. 单光子成像[M]. 北京: 国防工业出版社, 2015.
Seitz P, Theuwissen A. Single-Photon Imaging [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2015.

[13] 王丽英, 李 玉, 王崇倡. 激光雷达遥感原理与应用[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2025.
Wang Liying, Li Yu, Wang Chongchang. LiDAR Remote Sensing: Principles and Applications [M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2025.

[14] 刘祖迪, 崔国栋, 潘康立, 等. 一种对高速运动目标的单光子测距方法[J]. 激光与红外, 2024, 54(3): 373-379.
Liu Zudi, Cui Guodong, Pan Kangli, et al. A single photon ranging method for high speed moving targets[J]. Laser & Infrared, 2024, 54(3): 373-379.

[15] Li Z P, Ye J T, Huang X, et al. Single-photon imaging over 200 km[J]. Optica, 2021, 8(3): 344.

[16] 周 鑫. GM-APD激光雷达探测性能及噪声抑制方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
Zhou Xin. Research on detection performance and noise suppression method of GM-APD LiDAR [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021.

[17] 马 乐, 陆 威, 姜 鹏, 等. 基于双高斯方差优化的Gm-APD三维距离像预处理方法研究[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(S2): 131-136.
Ma Le, Lu Wei, Jiang Peng, et al. Research on Gm-APD 3D range image preprocessing method based on double Gaussian variance optimization [J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(S2): 131-136.

[18] 马 乐. Gm-APD激光雷达信号提取算法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
Ma Le. Algorithmresearch on Gm-APD laser radar signal extraction [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.

作者简介:

冯 谦(1987—),女,河南省郑州市人,高级工程师,博士,主要研究方向为光电引导导航、光电测量等;

金长江(1983—),男,河南省郑州市人,研究员,博士,主要研究方向为光电信息处理、激光测量等。