

# 方向自适应的光子计数激光雷达滤波方法

谢锋, 杨贵\*, 舒嵘, 李铭

(中国科学院上海技术物理研究所 中国科学院主动光电实验室, 上海 200083)

**摘要:**提出一种自适应滤波方向的光子计数激光雷达点云滤波方法,定义了一种可调节主滤波方向的滤波核,通过遍历得到最佳滤波方向的密度值并剔除远离地物的噪声点,根据密度值与邻域内其它点的密度值差值剔除接近地物的噪声点。通过实验数据对算法进行了验证,结果表明算法能有效剔除与地面非常接近的噪声点,适用于低密度地物点云的滤波处理,其中植被滤波精度 91.86%,地面点滤波精度 97.89%。

**关键词:**光子计数;滤波;激光雷达;点云;滤波核

**中图分类号:**TP79, TN958.98 **文献标识码:**A

## An adaptive directional filter for photon counting Lidar point cloud data

XIE Feng, YANG Gui\*, SHU Rong, LI Ming

(Key Lab of Spatial Active Opto-Electronic Techniques, Shanghai Institute of Technical Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

**Abstract:** An adaptive directional filter method was proposed for the photon counting Lidar point cloud data. The method defines a filter kernel with its main filter direction adjustable. The density of the best filter direction were achieved by traverse and the noise points away from the objects were removed. The noise points adjacent to the objects were eliminated according to the density difference between the point and points in its neighborhood. The filtering method provide here is validated through the point cloud data obtained in an aerial experiment. The results show that the filtering method is able to eliminate the noise points very close to the ground effectively and is fit for the low density object point cloud recognition, while the filter accuracy is 91.86% for vegetable points and 97.89% for ground points.

**Key words:** photon counting, denoising, Lidar, point cloud, filter kernel

**PACS:** 42.68. Wt, 87.63. It

## 引言

采用多波束微脉冲光子计数技术的激光雷达具有寿命长、重量轻、体积小、功耗小的特点<sup>[1]</sup>,作为星载激光高度计时具有独特的优势。NASA 于 2010 年成功研发了机载的光子计数激光雷达 MABEL (Multiple Altimeter Beam Experimental Lidar) 系统<sup>[2]</sup>并于 2010 年 12 月开始进行机载试验<sup>[3]</sup>,中科院上海技术物理研究所研制成功了国内首套机载多波束光子计数激光雷达 (Multiple beam Lidar, MBL) 系统并于 2015 年 12 月开展了机载试验。

光子计数激光雷达能够探测到微弱的光信号<sup>[4]</sup>,通常用来进行大气探测<sup>[5-6]</sup>。作为对地成像激光雷达时,由于大气散射噪声和太阳辐射噪声在探测信号中占有相当比例,造成该点云数据具有较高的背景噪声<sup>[7]</sup>。由于光子计数雷达数据只沿飞行方向呈 2 维窄带状分布,现有的针对 LiDAR 点云的滤波算法不适用于该数据的滤波处理<sup>[8-9]</sup>。目前针对光子点云的滤波算法可分为两类:一种算法基于回波点的局部密度信息,根据回波点的局部密度值或局部密度直方图判断是否为噪声点<sup>[10]</sup>;另外一种算法基于地面回波点的形态信息,将剖面点云栅格化为

收稿日期:2016-05-12,修回日期:2016-08-14

基金项目:国家高技术研究发展计划(2012AA121103)

**Foundation items:** Supported by National High Technology Research and Development Program of China (2012AA121103)

**作者简介 (Biography):** 谢锋(1977-),男,广西柳州人,副研究员,博士。研究领域为激光雷达数据处理及应用。E-mail: xf@mail.sitp.ac.cn

\* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: yanggui@mail.sitp.ac.cn

**Received date:** 2016-05-12, **revised date:** 2016-08-14

2 维影像并采用影像处理技术检测地物轮廓<sup>[11]</sup>. 现有光子点云滤波算法应用于实际数据时主要存在两个问题:一是点云局部密度不够时(如建筑物或陡峭山体的边缘、植被下的地面)信号会被当作噪声点滤除,造成地物回波被滤掉;二是当噪声点位置与地物回波信号位置接近时,算法无法有效区分噪声与信号.

基于地面回波数据呈线状连续分布的特点,结合点云的形态特征和密度分布特征,提出了一种自适应滤波方向的点云滤波方法.该方法首先定义了一种可调节滤波方向的滤波核,并通过调节滤波核的方向找到每个回波点的最佳滤波方向,然后根据最佳滤波方向上的密度统计值、与邻域点的密度值的差异这两个参量用来识别回波是否为噪声.

## 1 研究区与实验数据

### 1.1 试验区介绍

采用 2015 年 12 月 30 日 MBL 飞行数据作为试验数据,实验区域位于中国海南省(108°40',19°7'),实验区及飞行航线如图 1 所示.



图 1 MBL 飞行试验区域及航线设计  
Fig. 1 The MBL flight test area and route design

将点云进行坐标投影变换并沿地面飞行轨迹方向排列,生成高程剖面点云,横坐标表示沿轨距离,纵坐标表示点云高程(米).图 2(a)为实验区尖顶房和平坦地表的剖面(沿轨飞行时间 4 s,对应于距

离约 200 m),图 2(b)为山区的点云剖面数据(沿轨飞行时间 10 s,对应于距离约 500 m).

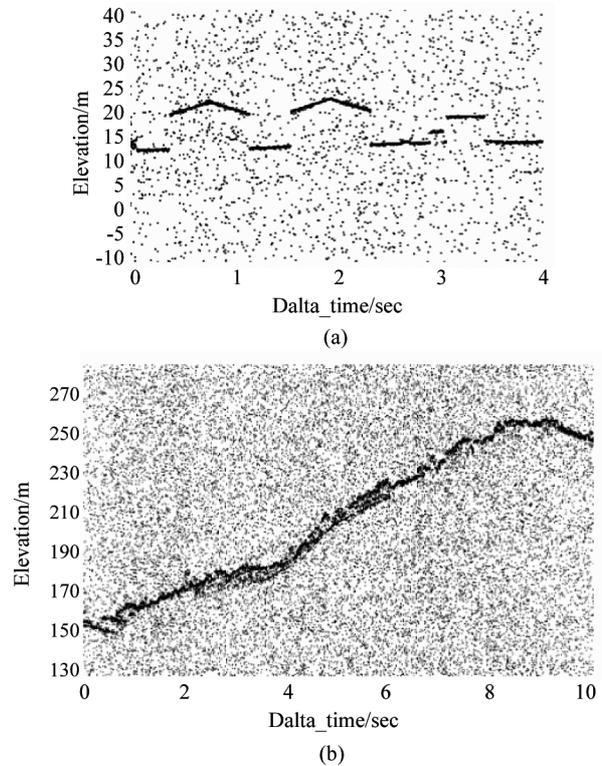


图 2 MBL 剖面点云数据 (a) 平地/建筑物剖面点云 (b) 山区剖面点云  
Fig. 2 The sectional view of MBL point cloud data (a) the ground/building (b) the mountains

选择图 3(a)所示的蓝色区域作为精度验证场,该区域内的主要地物为农田、水泥地、茂密程度不等的植被、房屋.共设计了覆盖该区域的 6 个航线,航线设计如图 3(a)所示.

由于光子计数点云具有离散化的特点,仅凭目视判读难以给出滤波算法的定量化评价结果,本文考虑使用地面测量数据对点云的滤波效果进行评价.使用地面三维激光扫描仪获取的地面点云数据与 MBL 机载点云数据进行对比,以验证点云滤波算法的精度.地面三维激光点云如图 3(b)所示,其精度优于 2 cm.

### 1.2 MBL 数据特点分析

光子计数成像激光雷达通过对单个光子事件探测计数<sup>[12]</sup>,能够据此降低系统的能量消耗,提高系统的可靠性<sup>[13]</sup>.然而由于背景噪声和暗电流的影响,同一个发射信号可能产生多个回波信号,导致回波数据的信噪比较低.

相比噪声,地物回波所在的局部具有较高的密

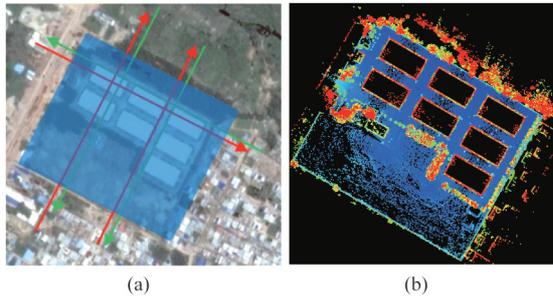


图3 点云精度验证区数据 (a) MBL 航线 (b) 地面激光雷达点云数据

Fig. 3 Data of acquisition area (a) MBL flight strip (b) point cloud data of ground LIDAR

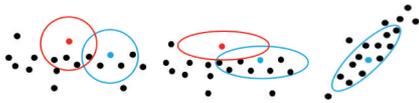


图4 滤波核形态对密度统计的影响 (a) 圆形搜索区域 (b) 椭圆形搜索区域 (c) 地表倾斜方向的滤波核

Fig. 4 Effect of filter nuclear shape for density statistics results (a) a circular search area (b) elliptical search area (c) nuclear surface tilt direction filtering

度,因此绝大多数光子计数激光雷达点云滤波算法均以局部的密度作为滤波的依据.然而实际飞行获取的点云数据并不总能满足以上理想情况,星载数据密度比机载数据更低<sup>[14]</sup>,依赖密度的方法将更难以满足滤波需求.

图4(a)为点云回波的示意图,红色的是噪声点,蓝色点是地面点.当使用圆形滤波核时,噪声点和地面点统计得到相同的局部密度.Zhang<sup>[15]</sup>等将圆形的搜索区调整为水平的椭圆搜索区以增加识别的准确率.

将滤波核的形态调整为图4(b)所示的椭圆形后,图中噪声点和地面点的密度统计值分别为0和7,二者具有明显的区分度.而对于图4(c)所示的倾斜地表,使用图中所示的与地形方向一致的滤波核能够带来更好的密度统计效果.因此,针对不同的地形使用不同方向的滤波核才能得到最理想的密度统计结果.

## 2 光子计数激光雷达点云滤波算法

图5是基于多方向滤波核的点云滤波算法流程图.首先以不同滤波方向的滤波核遍历输入的点云数据并得到对应的密度值,得到每一扫描帧内的每一个回波数据在不同方向滤波核下的最大密度值,并根据阈值剔除远离地物点的噪声点(密度较低);然后对于每一个信号点,统计其前后几帧的所有回

波点的密度最大值;最后根据信号点与邻域密度最大值的差值剔除与地物回波接近的噪声点.

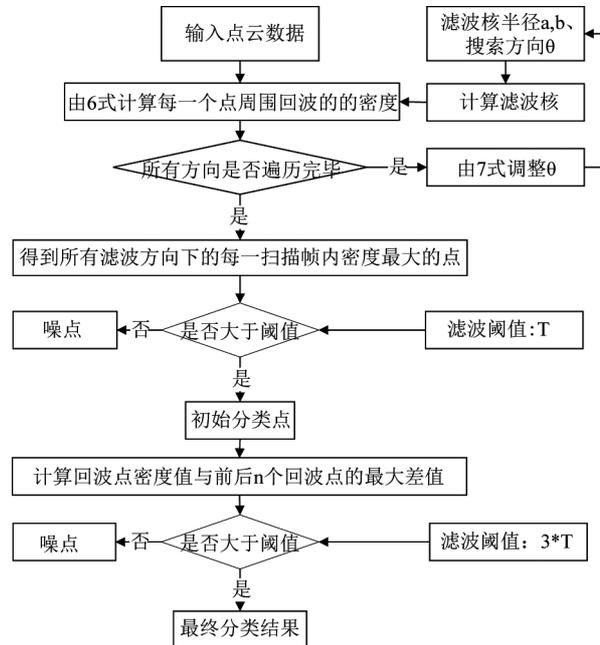


图5 自适应滤波方向的点云滤波流程

Fig. 5 Flow chart of adaptive directional filter method

### Step 1 计算滤波核

#### (1) 滤波核的设计

在点云数据中定义一个以点  $p$  为中心的椭圆形区域,则任意一个点  $q$  是否在该椭圆内可用以下公式判断:

$$dis(p, q) = \frac{(t_p - t_q)^2 D^2}{a^2} + \frac{(h_p - h_q)^2}{b^2}, \quad (1)$$

式中  $a, b$  表示椭圆的长短半径,  $t$  表示沿飞行方向的时间,  $h$  表示测距值,  $D$  表示相邻两次激光发射(相邻两个扫描帧)过程中移动距离.因此  $(t_p - t_q)D$  表示点  $p$  与点  $q$  在沿轨方向上的距离,  $h_p - h_q$  表示点  $p$  与点  $q$  在高程方向上的距离.  $dis(p, q)$  小于1时  $q$  在椭圆内,当其大于1时  $q$  在椭圆外.将式(1)中的椭圆旋转  $\theta$  角,变为以下形式:

$$dis(p, q, \theta) = \frac{\Delta T'^2}{a^2} + \frac{\Delta h'^2}{b^2}, \quad (2)$$

其中:

$$\begin{cases} \Delta T' = \cos\theta(t_p - t_q)D + \sin\theta(h_p - h_q) \\ \Delta h' = \sin\theta(t_p - t_q)D - \cos\theta(h_p - h_q) \end{cases}. \quad (3)$$

#### (2) 滤波核内权重的设置

由于噪声点与地面点的距离十分接近,仅仅统计椭圆形区域内的点云个数难以满足有效区分噪声与地面点,如图4所示.因此在滤波核内根据两点之

间的距离设置权重能够更有效地保证统计得到的密度值更有区分性. 由于滤波核需要重点统计  $t$  方向上的权重, 而且抑制  $h$  方向的点参与权重统计, 因此  $t$  方向和  $h$  方向的权重求解方式分别为:

$$\begin{aligned} W_t &= 1 - |\Delta t'|/k_t \\ W_h &= \exp(-\Delta h'^2/k) \end{aligned} \quad (4)$$

式中,  $W_t$  表示  $t$  方向上的权重,  $k_t = a$ ,  $W_h$  表示高程方向上的权重. 由于光子计数激光雷达测量的高程测量误差呈现高斯分布, 因此  $W_h$  采用高斯形的权重,  $k_t$  计算方式如下:

$$k_t = \text{Width}_{plus} * c \quad (5)$$

其中  $\text{Width}_{plus}$  表示发射波形的宽度, 单位为秒,  $c$  表示光速. 对任意一个回波点  $p$ , 统计其以  $a, b$  为轴长的椭圆形区域  $A$  内点云的加权(密度值):

$$W_p(\theta) = \sum_{q \in A} W_t(p, q, \theta) W_h(p, q, \theta) \quad (6)$$

#### Step 2 确定最佳滤波方向

当滤波核的方向与地形的方向相同的时候, 密度值的计算结果最大, 稀疏的地形因此能够统计得到更大的密度值, 有利于与噪声点的分离. 因此本文遍历各个滤波方向, 以密度统计结果最大的方向作为滤波核的最佳滤波方向, 步骤如下:

(1) 根据滤波核和主方向计算密度值. 对于任意一个回波数据  $p$ , 根据给定的滤波方向  $\theta_i$ 、滤波半径  $a$  和  $b$ , 使用式(6)计算其滤波核内的密度值  $W_p(\theta_i)$ .

(2) 遍历所有方向, 求解不同方向的密度值. 将滤波方向变为  $\theta_i$ , 使用(1)重新计算该滤波方向下各个点的密度值  $W_p(\theta_i)$ , 其中滤波方向  $0 \leq \theta_i < 180$ , 为了减少遍历的次数以提高算法的速度, 将  $\theta_i$  间隔  $15^\circ$  取值, 即:

$$\theta = n15^\circ, n = 0, 1, \dots, 11 \quad (7)$$

(3) 统计最佳滤波方向. 对于任意一个回波点, 以密度计算最大的结果作为主方向, 以此时的密度值作为该点的最佳密度值:

$$W_p = \max(W_p(\theta_0), W_p(\theta_1), \dots, W_p(\theta_{11})) \quad (8)$$

#### Step 3 噪声剔除

##### (1) 粗去噪方法

在计算得到每一个点的密度值之后, 使用一个给定的阈值  $T$ , 判断每一个点是否属于噪声点:

$$\begin{cases} \text{noise}, W_p > T \\ \text{signal}, W_p \leq T \end{cases} \quad (9)$$

由于光子计数激光雷达的信号与噪声相干性大的特点, 当噪声点与地物点较为接近时, 噪声点的密

度值统计结果也较高, 因此需要在粗去噪的基础上滤除剩余噪声点.

##### (2) 精去噪方法

对于任意一个小区域内的回波点(包括地面点和噪声点), 地面点距离点云的密集中心更近, 而噪声点与点云密集中心的距离相对更远. 而据公式(6)的密度计算方法, 距离点云密集中心越远密度计算结果越低. 因此任意噪声点的密度计算结果会低于空间上临近地面点的密度值. 利用以上特性, 统计任意一个点为中心的半径为  $c$  的范围内点云的最大密度值, 计算最大密度值与该点密度值的差值  $\Delta W_q$ :

$$\Delta W_q = W_p - \text{Max}(W_q), D(p, q) < 0 \quad (10)$$

如果该差值大于给定的阈值, 则将该点作为噪声点剔除:

$$\begin{cases} \text{noise}, \Delta W_p > 3T \\ \text{signal}, \Delta W_p \leq 3T \end{cases} \quad (11)$$

## 3 试验验证

### 3.1 典型地物滤波试验

#### (1) 平地滤波试验

图 6(a) 中, 横坐标表示沿轨距离, 纵坐标表示点云高程. 首先对 MBL 原始点云进行粗去噪, 由于树林的长度约为 35 m, 因此将滤波半径  $a$  设为 15 m, 而由于 MBL 的发射波形的半波宽约为 0.2 m, 因此将滤波半径  $b$  设为 0.2 m, 滤波阈值  $T$  设置为 8, 局部最大密度搜索半径设为 1 m.

经过算法第一步处理后结果如图 6(b) 所示, 图中红色表示滤波后的信号点. 从结果中可以看到粗去噪算法虽然剔除了远离地面(地物)的噪声点, 但是却无法剔除靠近地面的噪声点, 这主要是因为靠近地面点的噪声点在统计密度时地面点会参与密度的统计, 导致其具有较高的密度统计结果.

图 6(c) 所示是二维视图下粗去噪结果密度统计值, 其中横轴表示成像时间, 纵轴表示各回波点的密度统计值. 可以看到在密度值较大的房屋、地面点的下方存在一些密度值较小的散点, 这些点即为靠近地物的噪声点.

使用本文算法的第二步处理后结果如图 6(d) 所示, 对比图 6(b) 与图 6(d), 经过精去噪方法处理后有效地去除了粗去噪结果中靠近地物的噪声点. 且保留了植被冠层下方的稀疏地面点, 表明使用局部密度差值剔除噪声点的策略是可行的.

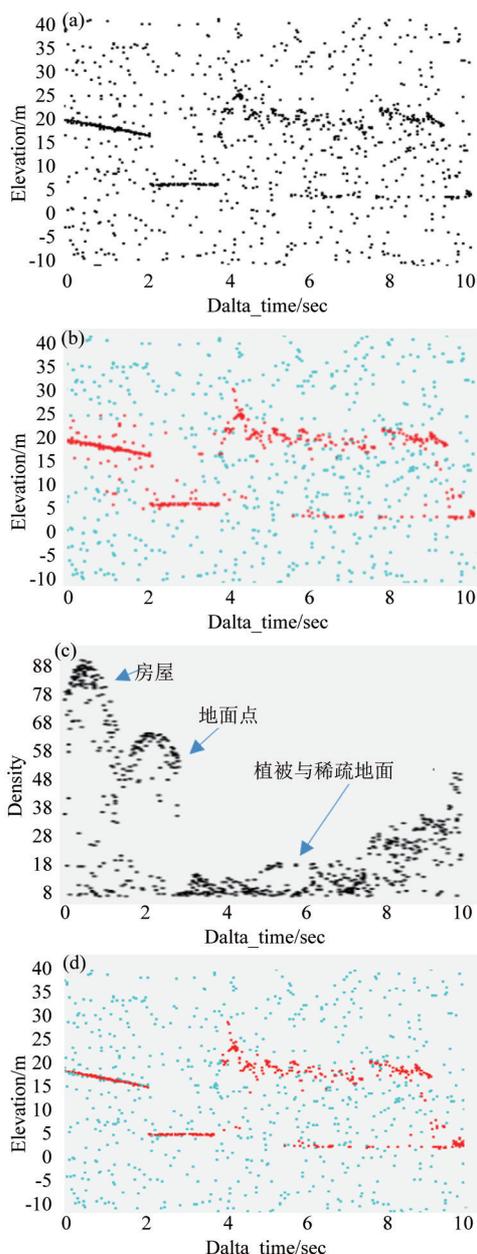


图6 稀疏植被区点云去噪结果 (a) 去噪前点云数据, (b) 粗去噪后点云数据, (c) 图(b)各点权重剖面图, (d) 精去噪后点云数据

Fig. 6 Denoising results of sparse vegetation point cloud (a) source data before denoising, (b) crude denoised result, (c) sectional view of the weight of each point in (b), (d) accurate denoising result of point cloud

### (2) 山区滤波试验

使用山区 MBL 数据进行滤波试验,该区域内植被茂密.将滤波半径  $a$  设为 8 m、滤波半径  $b$  设为 2 m,滤波阈值  $T$  设为 9、局部最大密度搜索半径设为 0.5 m.滤波结果如图 7(a)所示.

图 7(a)为滤波后山体的缩略图,其局部放大如图 7(b)所示,从结果中可以看到滤波算法识别出地面点、植被冠层、冠层与地面之间的点云.

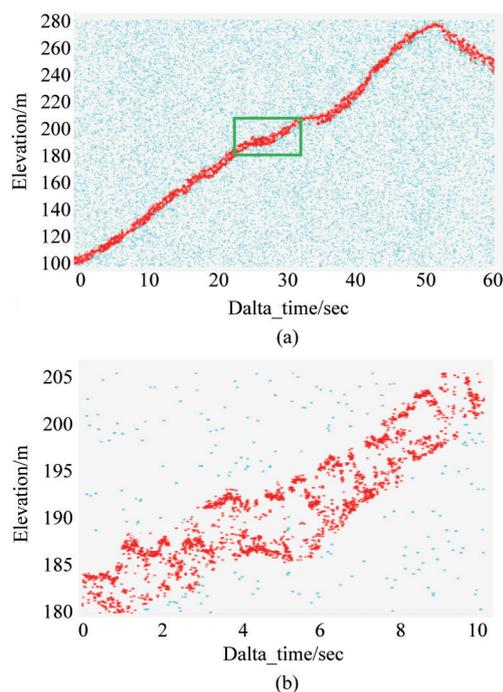


图7 山区植被点云去噪结果 (a)山区点云滤波结果, (b)局部放大

Fig. 7 Denoising results of vegetation point cloud on mountain (a) filtering results, (b) enlarge of point cloud

### 3.2 滤波精度评价

首先对检校场数据进行校正,得到每个回波的绝对地理坐标.图 8(a)所示为检校场 6 条航线的滤波结果的拼接效果(为便于显示未叠加噪点).图 8(b)为 MBL 的三维视图,从中可以看到植被冠层、地面点、房屋等地物特征.

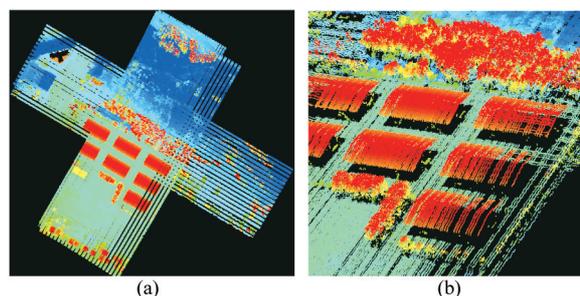


图8 检验场 MBL 滤波后点云数据 (a) MBL 点云二维视图, (b) MBL 三维视图

Fig. 8 MBL filtered point cloud data in checkfield (a) two-dimensional view of MBL point cloud, (b) three-dimensional view of MBL point cloud

分别使用本文滤波算法与 ZHANG<sup>[15]</sup>提出的 DCM(density-based clustering model)滤波算法对数据进行滤波处理. DCM 算法首先使用图 4(b)所示的椭圆形滤波核统计每一个回波的局部密度,然后

用总回波点数除以回波数据所在的总面积得到滤波阈值,最后根据阈值判断每一个回波是否为噪声。

根据 MBL 的每一个回波点的坐标在地面三维点云中查找,如果在地面点云的该空间位置也有回波点,则该回波点为地面点,否则为噪声点.考虑到 MBL 和 RIEGL 的点云离散分布,且各自的空间定位存在一定的误差,因此当判断每一个 MBL 回波点是否为噪声时,查找以其为中心的 5 cm 大小的圆形空间范围内是否有地面点.通过这种方法判断每一个 MBL 后得到整个航带的地面点、噪声点总数,以此作为滤波精度评价的标准数据。

对于一组点云数据,地物回波信号(植被和地面点)数为  $N_T$ ,其中信号被正确分为信号的数量为  $N_C$ ,被错误分为噪声的数量为  $N_w$ ,  $N_w + N_C = N_T$ ;噪声点数为  $N_H$ ,其中信号被错误分为信号点的数量为  $N_E$ ,被错误分为噪声的数量为  $N_R$ ,  $N_R + N_E = N_H$ 。

表 1 各航带点云数量

Table 1 Number of return points on every flight strip

航带编号	点云数量			噪声/信号
	地面点	植被点	噪点	
1	144939	23589	1922460	11.4
2	137676	22929	1876108	11.7
3	121923	12008	1860403	13.9
4	114700	12443	1941150	15.3
5	121626	21365	1856284	13.0
6	114979	23130	2098601	15.2

表 1 为试验所用 6 个航带的植被、地面点、噪点的数量.各航带数据噪声点数量远多于信号点数量,约为信号点数的 13 倍,这是因为正午太阳光引起了大量的伪回波信号(噪点).考虑到信号点被错分为噪点会引起地面回波丢失,而噪声被错分为信号会导致测距出现错误.以上两个指标是影响滤波结果的主要因素,因此选择这两个指标作为滤波精度的评价标准,滤波精度计算公式为:

$$K = N_C / N_T \quad (12)$$

其中植被点滤波精度  $K_V = N_{CV} / N_{TV}$ ,  $N_{CV}$  表示正确分为植被点信号点数,  $N_{TV}$  表示植被点总数;地面点滤波精度  $K_G = N_{CG} / N_{TG}$ ,  $N_{CG}$  表示正确分为地面点的信号点数,  $N_{TG}$  表示地面点总数.噪声分为信号的误分概率计算公式为:

$$E = N_E / N_T \quad (13)$$

植被点噪声误分精度  $E_V = N_{EV} / N_{TV}$ ,  $N_{EV}$  表示错误分为植被点的噪声点数;地面点噪声误分精度  $E_G = N_{EG} / N_{TG}$ ,  $N_{EG}$  表示错误分为地面点的噪声点数.需要注意的是,由于  $N_C + N_E \neq N_T$ ,所以  $K + E \neq 1$ 。

表 2 点云滤波精度

Table 2 Filtering accuracy of test point cloud

航带编号	本文算法(%)		DCM 算法(%)	
	植被点	地面点	植被点	地面点
1	92.46	98.32	86.43	97.54
2	91.32	97.94	90.47	96.43
3	90.54	98.76	89.38	98.53
4	92.69	96.75	91.43	94.57
5	92.42	98.41	88.24	98.19
6	91.75	97.13	87.16	97.13
平均精度	91.86	97.89	88.85	97.07

精度评价结果如表 2 所示,可以看到植被和地面点的滤波精度分别可达到 91.86% 和 97.89%. 植被点的滤波精度明显高于地面点的滤波精度,且本文算法精度明显高于 DCM 算法的精度。

点云误分概率评价结果如表 3 所示,可以看出本文算法地面点噪声误分概率明显低于 DCM 算法.需要注意的是,由于数据测量时风的影响,航空数据与地面数据获取时刻植物叶片并不处于同一位置,可能会降低植被的滤波与误分精度评价结果。

表 3 点云误分概率

Table 3 Probability of misclassification

航带编号	本文算法(%)		DCM 算法(%)	
	植被点	地面点	植被点	地面点
1	1.34	2.23	1.43	6.94
2	3.15	1.42	3.42	5.57
3	2.13	2.52	2.84	8.03
4	2.36	0.32	2.48	4.28
5	1.54	1.54	1.93	7.35
6	3.23	1.29	3.64	5.18
平均误差	2.29	1.55	2.62	6.23

## 4 讨论

由于植被冠层回波点稀疏,植被回波密度统计值可能低于靠近地面的噪点密度统计值.现有滤波方法<sup>[10-11,14-15]</sup>没有考虑到滤波核的方向对回波局部密度统计的影响,导致靠近地面回波的噪声点密度统计值较大,而地形起伏较大的非平坦地面点密度统计值较小,使得信号与噪声密度统计值不具可区分性,因此滤波精度较低。

针对现有方法的不足,本文算法通过分析局部的点云密度,动态调整各个局部的滤波阈值,减小了植被信号的漏分概率和地面噪点的错分概率.解决了滤波核的方向问题对精度带来的影响,通过自适应调整滤波核的主方向,提高稀疏地面回波点的密度统计值.抑制靠近地面的噪声密度统计值,增大了信号与噪声的可区分度,所以具有较高的精度。

本文算法对数据在沿飞行方向的二维剖面单独进行滤波处理,考虑到光子计数激光雷达在垂轨方向有多个探测器,下一步将考虑结合相邻探测器的数据进行三维滤波,同时结合地面与植被冠层的高程差信息以进一步提高稀疏植被冠层的滤波精度。

## 5 结论

基于离散化的回波点的在地物起伏方向具有更大密度的特性,提出一种算法基于回波的密度和形态特征的自适应滤波方向的点云滤波方法。主要解决回波稀疏区域的信号与噪声分离问题,具有较高的地形适应性。

通过实验数据对算法进行了验证,所提出的滤波算法能有效剔除与地面非常接近的噪声点,且具有较高的滤波精度。实验结果表明,植被和地面回波数据的滤波综合精度达到 94.87%,其中地面滤波精度达到 97.89%。算法较好的满足了光子计数激光雷达数据滤波的实用需求,提高了点云产品的高程精度。

## References

- [1] ZHU Lei, HUANG Geng-Hua, OUYANG Jun-Hua, et al. STUDY ON TIME INTERVAL MEASUREMENT SYSTEM IN PHOTON COUNTING IMAGING LIDAR[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (朱磊, 黄庚华, 欧阳俊华, 等. 光子计数成像激光雷达时间间隔测量系统研究[J]. *红外与毫米波学报*), 2008, **27**(6):461-464.
- [2] Abshire J B, Sun X, Riris H, et al. Geoscience Laser Altimeter System (GLAS) on the ICESat Mission: On-orbit measurement performance[J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, **32**(21):365-370.
- [3] Brunt K M, Neumann T A, Walsh K M, et al. Determination of Local Slope on the Greenland Ice Sheet Using a Multibeam Photon-Counting Lidar in Preparation for the ICESat-2 Mission[J]. *IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters*, 2014, **11**(5):935-939.
- [4] Dautet H, Deschamps P, Dion B, et al. Photon-counting techniques with silicon avalanche photodiodes[J]. *Applied Optics*, 1993, **32**(21):3894-900.
- [5] Matthew M G, Dennis H, William H, et al. Cloud Physics Lidar: Instrument Description and Initial Measurement Results[J]. *Applied Optics*, 2002, **41**(18):3725-34.
- [6] Yuekui Yang, Alexander Marshak, Stephen P. Palm, et al. Cloud Impact on Surface Altimetry From a Spaceborne 532-nm Micropulse Photon-Counting Lidar: System Modeling for Cloudy and Clear Atmospheres[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2011, **49**(12):4910-4919.
- [7] Brif C. Reduction of optimum light power with Heisenberg-limited photon-counting noise in interferometric gravitational-wave detectors[J]. *Physics Letters A*, 1999, **263**(1):15-20.
- [8] XIA Shaobo, WANG Cheng, XI Xiaohuan, LUO Shezhou, et al. Point cloud filtering and tree height estimation using airborne experiment data of ICESat-2[J]. *Journal of Remote Sensing*(夏少波, 王成, 刁晓环, 等. ICESat-2 机载试验点云滤波及植被高度反演[J]. *遥感学报*), 2014, **18**(6):1199-1207.
- [9] Sui Lichun. Analysis of Laser Scanner Data by Means of Digital Image Processing Techniques[M]. Munich, Germany: Publishing House, 2003.
- [10] Horan K H, Kerekes J P. An automated statistical analysis approach to noise reduction for photon-counting lidar systems[C]// Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2013 IEEE International. IEEE, 2013:4336-4339.
- [11] Awadallah M, Ghannam S, Abbott L, et al. Active Contour Models for Extracting Ground and Forest Canopy Curves from Discrete Laser Altimeter Data[C]//13th International Conference on Lidar Applications for Assessing Forest Ecosystems, 2013.
- [12] Albota M A, Heinrichs R M, Kocher D G, et al. Three-dimensional imaging laser radar with a photon-counting avalanche photodiode array and microchip laser[J]. *Applied Optics*, 2003, **41**(36):7671-8.
- [13] Rosette J, Field C, Nelson R, et al. A new photon-counting lidar system for vegetation analysis[C]// Proceedings of SilviLaser 2011, 11th International Conference on Lidar Applications for Assessing Forest Ecosystems, University of Tasmania, Australia, 16-20 October 2011.
- [14] Zhang J, Kerekes J P. First-Principle Simulation of Spaceborne Micropulse Photon-Counting Lidar Performance on CoMBLex Surfaces[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2014, **52**(10):6488-6496.
- [15] Zhang J, Kerekes J, Csatho B, et al. A clustering approach for detection of ground in micropulse photon-counting LiDAR altimeter data[C]// Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2014 IEEE International. IEEE, 2014:177-180.
- [16] Drake P. R, Bourgeois J, Hopf A. P. et al. Dual-polarization X-band phased array weather radar Technology update: International Radar Conference, 2014[C]. Lille, 2014:1-6.
- [17] Nord M. E, Nord M. E, Ainsworth T. L, et al. Comparison of Compact Polarimetric Synthetic Aperture Radar Modes[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, **47**(1), 174-188.
- [18] Okada Y, Nakamura S, Iribe K, et al. System characteristics for wide swath L-band SAR onboard ALOS-2/PALSAR-2: Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar, 2013[C]. Tsukuba, 2013:141-143.
- [19] Ramongassie S, Castiglioni S. K. Lorenzo, J, et al. Spaceborne P-band SAR for BIOMASS mission; IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2010[C]. Honolulu, 2010, 2880-2883.
- [20] van Zyl J. J. Calibration of polarimetric radar images using only image parameters and trihedral corner reflector responses[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1990, **28**(3), 337-348.

(上接第 40 页)