

引用格式: LIU Xiang, ZHANG Lihua, DAI Zeyuan, et al. A Parameter-free Denoising Method for ICESat-2 Point Cloud Under Strong Noise[J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(11):1110002

刘翔,张立华,戴泽源,等.一种无输入参数的强噪声背景下ICESat-2点云去噪方法[J].光子学报,2022,51(11):1110002

一种无输入参数的强噪声背景下ICESat-2点云去噪方法

刘翔^{1,2},张立华^{1,2},戴泽源^{1,2},陈秋³,周寅飞^{1,2}

(1 海军大连舰艇学院 军事海洋与测绘系,辽宁 大连 116018)

(2 海军大连舰艇学院 海洋测绘工程军队重点实验室,辽宁 大连 116018)

(3 91001 部队,北京 100071)

摘要:针对当前无输入参数的四叉树去噪方法在强噪声背景下对噪声光子误识率较高的缺陷,提出了一种无输入参数的适应强噪声背景的ICESat-2点云去噪方法。首先,以剪枝四叉树的层值表征光子密度,避免强噪声背景下局部稀疏、相距较近的噪声光子被四叉树分隔层次较多而被误表征为密度过大;然后,自适应求取信号光子的密度阈值,完成噪声光子的一级去除;最后,通过箱线图进一步去除少量未能被剪枝四叉树识别的局部较密的离群噪声光子,实现去噪过程。选择美国北达科他州和加利福尼亚州两个研究区域,对强噪声背景下的ICESat-2点云开展去噪实验验证。实验结果表明:与四叉树去噪方法相比,本文所提方法明显具有更优的去噪性能;本文所提方法去噪后所得信号光子拟合的冠顶和地表曲线与分辨率为1 m的机载激光雷达高程数据产品剖面高程曲线基本一致。

关键词:ICESat-2;无输入参数;强噪声背景;去噪;四叉树;剪枝四叉树;箱线图

中图分类号:P237

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20225111.1110002

0 引言

2018年9月15日发射的ICESat-2(The Ice, Cloud and Land Elevation Satellite-2)是美国第二代冰、云和陆地高程卫星,用以执行冰盖高程测量和变化监测、陆地高程测量、全球植被高度测量以及监测云和气溶胶等任务^[1-3]。相较于ICESat所搭载的全波形地学激光测高系统(Geoscience Laser Altimeter System, GLAS),ICESat-2搭载的先进地形激光高度计系统(Advanced Topographic Laser Altimeter System, ATLAS)为微脉冲光子计数测高雷达系统,具有高灵敏性、高重频的特性,可以获得光斑更小、密度更高的光子点云数据,增强了对全球三维信息的获取能力^[2]。同时这也是全球范围内第一次将该项技术运用于星载平台之上^[1],代表了未来星载激光测高重要发展趋势。但由于ICESat-2光子计数激光雷达发射和探测的激光脉冲都为弱信号,难以区分目标物体表面返回脉冲、大气散射、太阳辐射及仪器自身噪声^[4-5],导致其回波数据中掺杂了大量的背景噪声。在强噪声背景下,较低的信噪比使得信号光子与噪声光子难以区分,如何从背景噪声中提取信号光子已成为ICESat-2数据应用的一项关键而基础的工作。

针对单光子激光测高雷达数据的去噪,国内外学者进行了诸多研究。文献^[5-6]通过统计光子与其邻近光子局部距离进行去噪处理,但邻近光子数量为经验设定值;文献^[7-11]基于光子滤波核内光子密度值的差异进行去噪,但滤波核范围参数需人为进行设定;文献^[12]以DBSCAN聚类方法为基础,将所用圆形滤波核形状改为水平椭圆进行信号光子聚类,但该聚类方法存在对输入参数敏感的问题;文献^[13]则以OPTICS方法进行聚类,降低了对输入参数的敏感度,但所采用椭圆滤波核半径仍需通过试错法来得到。

基金项目:国家自然科学基金(Nos. 41871369, 41901320, 42071439, 41871295)

第一作者:刘翔(1998—),男,硕士研究生,主要研究方向为摄影测量与海洋遥感。Email:2764380058@qq.com

导师(通讯作者):张立华(1973—),男,教授,博士,主要研究方向为海战场环境保障。Email:zlhua@163.com

收稿日期:2022-04-11;录用日期:2022-06-10

<http://www.photon.ac.cn>

以上去噪方法存在参数人为设定较为繁杂或对参数敏感的问题。尽管文献[14-15]将光子分布光栅化为图像,以边缘提取的图像处理方式进行去噪,避免了参数设定过程,但光栅化必然会造成光子点云信息不可逆的损失,影响数据的后续应用。

为了解决单光子激光测高雷达数据去噪对输入参数的依赖性问题,ZHANG Guoping等^[16]提出了一种基于四叉树的无参数输入去噪方法,该方法无需人为经验设定的光子在高程和沿轨距离方向上的范围以及周围光子数量,只需利用四叉树将每个光子合理分隔即可通过分隔层值表征光子密度,从而可做到在去噪时无需参数输入,在ICESat-2的模拟数据MATLAS去噪实验中取得了良好的效果。但对于强噪声背景下的实测ICESat-2数据,四叉树去噪方法处理局部稀疏、相距较近的噪声光子时表征密度不合理,会将较多噪声光子误识别为信号光子,从而影响去噪效果。

为此,本文针对四叉树去噪方法的缺陷,首先以剪枝四叉树的层值表征光子密度,避免强噪声背景下局部稀疏、相距较近的噪声光子被四叉树分隔层次较多而被误表征为密度过大,自适应求取信号光子的密度阈值,完成一级去噪;然后通过箱线图进一步去除少量未能被剪枝四叉树识别局部较密离群噪声光子,完成二级去噪。

1 数据与研究方法

1.1 研究区域概况

本文研究区域及实验所用ICESat-2数据分布情况如图1所示,研究区域1位于美国的北达科他州,该区域为平原地带,地势较为平坦,植被覆盖稀疏;研究区域2位于美国的加利福尼亚州,该区域靠近内华达山脉,地势起伏较大,中等植被覆盖。两个研究区域地势起伏差异较大、地表覆盖类型不同,具有较强的代表性。

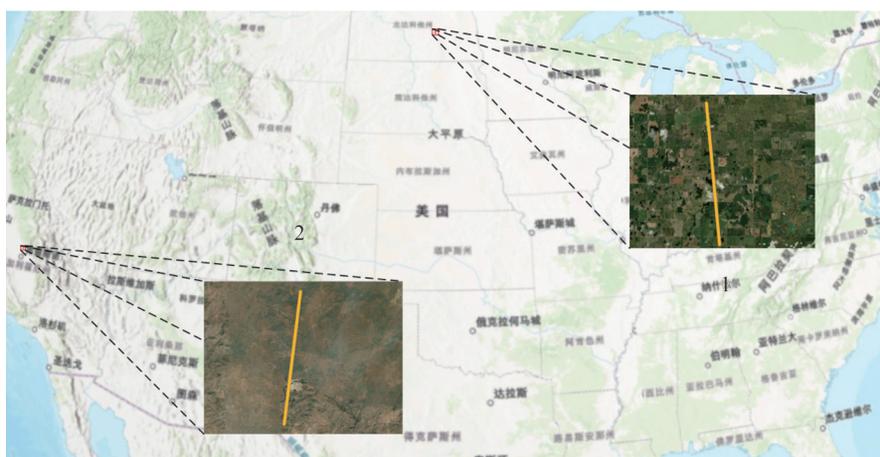


图1 研究区域位置及数据分布示意图

Fig. 1 Location of study area and distribution of data

1.2 数据来源

1.2.1 ICESat-2/ATLAS 数据

2019年5月美国国家冰雪数据中心 NSIDC(National Snow and Ice Data Center)开始向全球用户公开发布ICESat-2/ATLAS数据^[4]。本文使用其中的Level-2级数据产品ATL03作为本次去噪的实验数据,ATL03为全球定位光子数据,它记录了光子精确的经纬度和高程信息,是生成诸如海冰高程(ATL07)^[17]、陆地植被高程(ATL08)^[18]等其他产品的数据基础^[19]。

1.2.2 机载激光雷达数据

为验证本文方法去噪效果,实验选择美国国家生态观测站网络NEON(National Ecological Observatory Network)发布的机载激光雷达高程数据产品作为验证数据,包括数字表面模型(Digital Surface Model, DSM)和数字地面模型(Digital Terrain Model,DTM),二者分辨率皆为1 m。同时为保证验证的准确性,机

载激光雷达数据观测时间与ICESat-2数据观测时间均为同年同月,以减少因时相变化所造成的不同数据产品之间的高程误差。

1.3 研究方法

1.3.1 一级去噪

在ICESat-2光子点云中,信号光子与噪声光子空间分布差异往往较大,具体表现为信号光子较噪声光子分布更加密集^[20-21],这种密度的差异是当前ICESat-2点云去噪的基本依据。因此,选取合适的密度阈值是正确分类信号光子和噪声光子的关键。本文根据信号光子和噪声光子密度不同的特点,挖掘Otsu法在自适应求取灰度特性有明显差别的两类目标分割阈值上的优势,通过剪枝二叉树的层值来定量表示光子密度,以密度替代灰度,求取信号光子和噪声光子密度最大类间方差作为分类阈值,对两类光子进行分类。

1.3.1.1 二叉树层值表征光子密度

二叉树层值表征光子密度是利用二叉树方法对光子分隔,即在高程和沿轨距离二维空间 D 上按照光子的位置将空间进行四象限递归划分,依照光子最终所处二叉树象限叶节点的层值来定量光子的密度。分隔过程为首先根据ICESat-2光子数据的范围给定初始根节点空间 D_0 ,记录 D_0 中光子个数为 $\text{sum}(D_0)$,当 $\text{sum}(D_0)$ 超过设定的空间光子最大容纳值 $\text{max}_{\text{limit}}$,则将当前空间划分为右上(I)、左上(II)、左下(III)、右下(IV)四个相同的子象限空间,计算各子空间内光子数,对超过 $\text{max}_{\text{limit}}$ 的子空间再次进行划分,递归执行以上划分,直至各子空间内光子数在最大容纳值之内,此时光子处于各叶节点所对应的划分空间中。空间划分准则可归纳为

$$\begin{cases} D'_{k-1} = \{ X | X \subseteq D_{k-1}, \text{sum}(X) > \text{max}_{\text{limit}} \} \\ D_k = \text{split}(D'_{k-1}) \end{cases} \quad (1)$$

式中, D'_{k-1} 为第 $k-1$ 层中可进行划分的象限集合; D_{k-1} 为第 $k-1$ 层象限集合; X 为 D_{k-1} 中某个象限空间; $\text{sum}(X)$ 为象限空间 X 内光子数;为保证去噪精度,通常需对每个光子进行分隔,因此 $\text{max}_{\text{limit}}$ 一般设为1。

图2为某区域利用二叉树分隔阴影部分光子的示意图,图3为相应的二叉树树状结构图,从中可以看出由于噪声光子分布较信号光子稀疏,因此在分隔时只需要较少的划分次数即可被分隔开,处于的叶节点象限空间层值 k 较小,而信号光子因分布密集所处叶节点象限空间层值 k 较高,层值 k 与密度存在着明显的正相关关系,因此采用层值来对信号和噪声光子密度进行表征,将层值作为光子的密度标签。

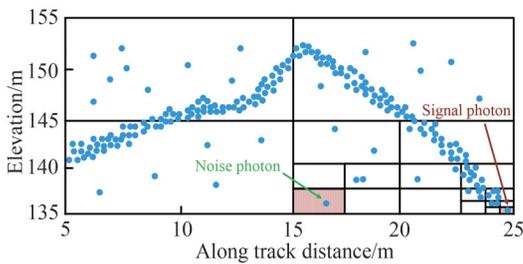


图2 二叉树分隔光子示意图
Fig. 2 Photons separated by quadtree

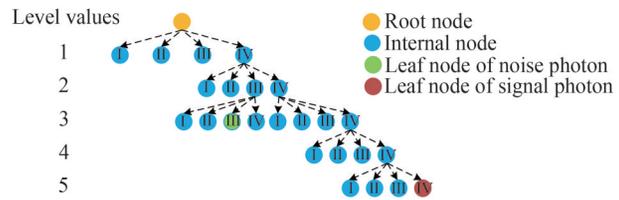


图3 二叉树分隔光子树状结构图
Fig. 3 Tree structure of photons separated by quadtree

1.3.1.2 剪枝二叉树层值表征光子密度

由于噪声光子的分布呈现随机性,在利用二叉树分隔ICESat-2光子时,会出现局部稀疏情形下某些噪声光子相距较近而需要较多的划分次数方可分隔的现象,如图4红框标识的象限所示。此时利用二叉树方法表征光子密度时,这类噪声光子由于所在叶节点象限层值较高,接近信号光子的层值,如图5所示,导致在去噪过程中被误分为信号光子。特别是在强噪声背景下,信噪比较低,光子点云中会大量散布此类噪声光子,进而导致二叉树方法难以达到较好的去噪效果。

进一步分析光子密度的表征过程,光子层值需要反映的是光子与周围光子而不是与最邻近光子之间的疏密程度,在图4红框标识的象限中,内部光子虽然距离较近,但是象限进行一次四等划分后并不能将其分隔,从其与周围光子分布的稀疏程度来看其密度仍然较小,所以此时象限空间所在层对应的层值就代表了

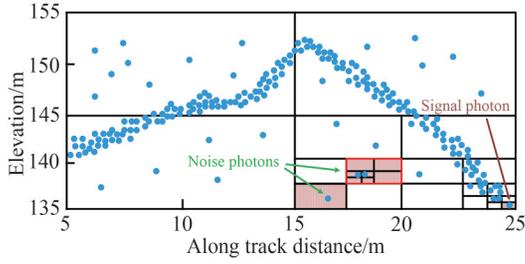


图4 四叉树误分隔光子示意图
Fig. 4 Photons incorrectly separated by quadtree

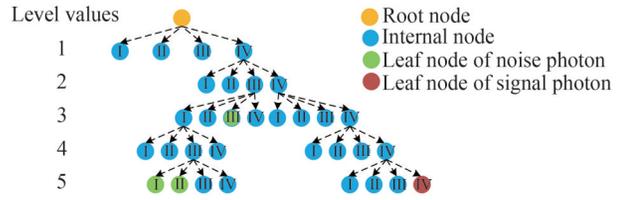


图5 四叉树误分隔光子树状结构图
Fig. 5 Tree structure of photons incorrectly separated by quadtree

其内部光子的密度。基于此,为减少噪声光子的误识别,本文引入数据搜索过程中的“剪枝”思想改进原有四叉树生成过程,并采用剪枝四叉树层值来表征光子密度。数据搜索算法中的“剪枝”是通过一定的策略对树结构进行优化,删除部分无效节点,提升算法效率。而本文所述的“剪枝”过程,则是先对将要进行划分的某象限进行分析判断,若划分一次后没有光子被分隔开,则此划分不进行,同时此象限的划分相应终止,以此来剪掉由于不合理的划分而生成的枝状结构。划分准则为

$$\begin{cases} D'_{k-1} = \{ X | X \subseteq D_{k-1}, n_{\text{sum}[\text{split}(X)]} \geq 2 \} \\ D_k = \text{split}(D'_{k-1}) \end{cases} \quad (2)$$

式中, $n_{\text{sum}[\text{split}(X)]} \geq 1$ 表示为对象限空间 X 四等划分后,子象限空间内光子数不小于 1 的空间个数,即存在光子的子象限空间个数。

对四叉树划分改进后,划分准则不再依据 $\text{max}_{\text{limit}}$,而是顾及了象限空间光子的分布情况。按照划分准则,对象限空间 X 的划分存在以下两种情况:

- 1) $\text{sum}(X) \leq 1$,即象限空间 X 不存在或只存在一个光子,对此象限不进行划分,此象限划分终止;
- 2) $\text{sum}(X) \geq 2$,即象限空间 X 存在多个光子,先对象限空间 X 进行分析判断,若进行一次四等划分后光子在同一象限,则不进行此划分,同时此象限划分终止;若不在同一象限,则进行划分,对划分后的子象限空间按照其内光子数迭代执行以上两种划分情况,直至划分终止。

图6为剪枝四叉树划分后阴影部分光子的分隔情况,相对于图4来说,红框象限按照划分准则不再进行划分。从所对应的树状结构图图7可以看出,通过上述划分方式,红色阴影部分的枝状结构被剪掉,噪声光子所处层级降低,层值变小,避免了其被误识别为信号光子。

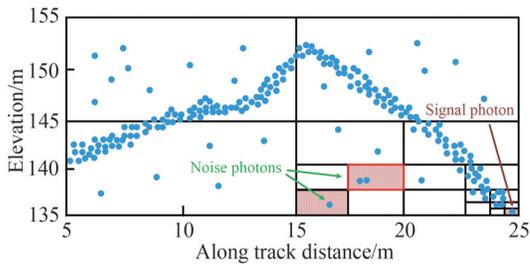


图6 剪枝四叉树分隔光子示意图
Fig. 6 Photons separated by pruned quadtree

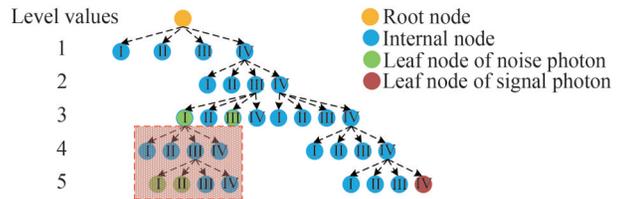


图7 剪枝四叉树分隔光子树状结构图
Fig. 7 Tree structure of photons separated by pruned quadtree

1.3.1.3 Otsu法求取光子密度阈值

由于受地表反射率、太阳高度角、大气散射等因素的影响,沿轨方向上不同区域内光子的噪声密度会有所差异^[11]。为适应这种沿轨方向上信号光子和噪声光子密度对比的不同,在沿轨方向划分 100 m 等距离窗口,分窗口利用 Otsu 法自适应求取各窗口光子的密度阈值,依据密度阈值进行噪声光子和信号光子的分类。

设一个窗口内所有光子层值取值范围为 $[0, k]$,假定密度阈值为 t ,将窗口内的光子分为层值为 $[0, t-1]$ 和 $[t, k]$ 两类,类间方差为

$$\sigma^2(t) = \omega_1(\mu_1 - \mu)^2 + \omega_2(\mu_2 - \mu)^2 \quad (3)$$

式中,

$$\omega_1 = \sum_{i=0}^{t-1} p_i \quad (4)$$

$$\omega_2 = \sum_{i=t}^k p_i \quad (5)$$

$$\mu_1 = \sum_{i=0}^{t-1} ip_i / \omega_1 \quad (6)$$

$$\mu_2 = \sum_{i=t}^k ip_i / \omega_2 \quad (7)$$

$$\mu = \sum_{i=0}^k ip_i = \omega_1 \mu_1 + \omega_2 \mu_2 \quad (8)$$

式中, p_i 为窗口内层值为*i*的光子所占比, ω_1 、 ω_2 分别为层值小于*t*和大于等于*t*的光子所占比, μ_1 、 μ_2 分别为层值小于*t*和大于等于*t*的光子层值均值, μ 为窗口内所有光子的层值均值。

当部分噪声光子被错分为信号光子或者部分信号光子被错分为噪声光子时,就会导致类间方差变小,因此类间方差最大时意味着两类光子错分的概率最小^[22-23],所以窗口内光子的最佳密度阈值*t**为

$$t^* = \arg \max_{0 < t < k} \sigma^2(t) \quad (9)$$

即*t*从(0, *k*)中取值,*t**为使类间方差 $\sigma^2(t)$ 最大时所对应的*t*值。此时窗口内层值小于*t**的光子分类为噪声光子,其他为信号光子,依据分类结果将噪声光子去除完成本文的一级去噪。

1.3.2 二级去噪

经过剪枝二叉树去噪以后,绝大部分噪点得到了消除。虽然噪声光子在整体上比信号光子分布稀疏,但依然存在孤立噪声光子簇,此时利用剪枝二叉树层值表征密度时,此类局部噪声光子由于分布密集,因此其层值偏大,被误识别为信号光子。对于这种少量的离群噪声光子,采用箱线图的方法进行去除。由于箱线图是通过光子高程四分位数来设置上下阈值进行离群点的判定,因此为顾及高程变化对箱线图去噪的影响,同样采用分窗口的形式进行去噪,窗口宽度在地形复杂区域和平坦区域分别取 100 m 和 50 m。其中箱线图的上下限为^[24-25]

$$\text{Upper}_{\text{limit}} = Q_3 + 1.5(Q_3 - Q_1) \quad (10)$$

$$\text{Lower}_{\text{limit}} = Q_1 - 1.5(Q_3 - Q_1) \quad (11)$$

式中, Q_1 、 Q_3 分别为窗口内所有光子高程的下四分位数和上四分位数。如图 8 为箱线图去噪的示意图,蓝点为高程值大于 $\text{Upper}_{\text{limit}}$ 或小于 $\text{Lower}_{\text{limit}}$ 的光子,其被识别为离群噪点。

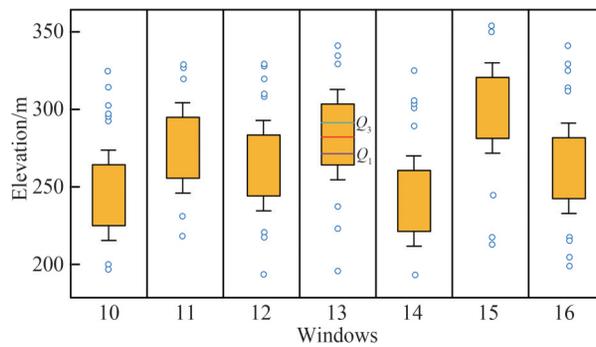


图 8 箱线图离群点检测

Fig. 8 Outlier detection by box-plot

1.3.3 去噪效果验证

为有效地验证去噪效果,采取定性和定量相结合的方式与机载 Lidar 生成的 DTM 和 DSM 进行对比。定性验证采用将二叉树方法、本文所提方法去噪后光子拟合的地表和冠层顶部曲线,与相应位置处 DTM 和 DSM 剖面的高程曲线进行对比的方式。在植被区地表光子和冠顶光子分别位于信号光子点云底部和顶部,由此采用移动窗口的方式,将窗口内高程值最小和最大的信号光子分别作为地表和冠层的种子光子,然后

利用三次样条插值函数拟合得到地表和冠层曲线^[9],对比的真实地表曲线为DTM剖面高程曲线,真实冠层曲线为DSM剖面高程曲线。定量验证为计算种子光子高程和验证高程数据之间均方根误差RMSE和决定系数 R^2 ,其中RMSE和 R^2 表示为

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (h_i - \hat{h}_i)^2} \quad (12)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (h_i - \hat{h}_i)^2}{\sum_{i=1}^N \left(h_i - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N h_i \right)^2} \quad (13)$$

式中, N 为计算的光子点数, h_i 为ICESat-2光子高程值, \hat{h}_i 为光子所处位置对应的DTM或DSM高程值。

2 试验结果与分析

本文在北达科他州研究区域1和加利福尼亚州研究区域2选择两条ICESat-2条带开展去噪实验。图9和图10分别为两区域光子在沿轨方向和高程的二维分布图,中间密集部分为信号光子,大量的噪声光子较为稀疏地分布在信号光子带的两侧,光子数据的信噪比皆比较低,处于强噪声背景下。

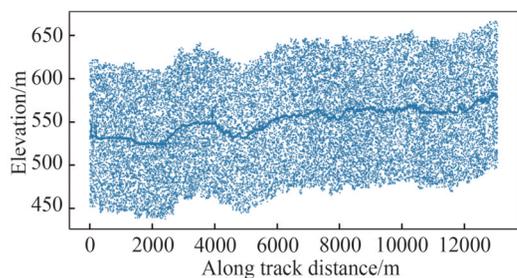


图9 研究区域1原始点云

Fig. 9 Initial point cloud in study area 1

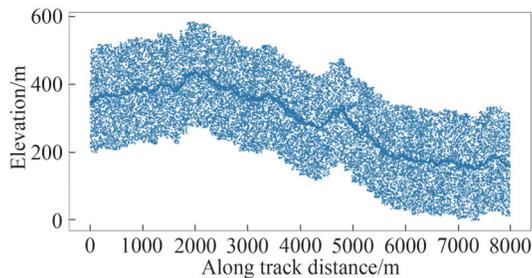


图10 研究区域2原始点云

Fig. 10 Initial point cloud in study area 2

2.1 研究区域1去噪结果

在研究区域1开展去噪实验,图11和图12分别为利用四叉树方法和剪枝四叉树方法的去噪结果,其中四叉树方法和剪枝四叉树方法采用了相同的窗口划分策略和光子密度阈值求取方法,去噪结果中蓝色光子为去除的噪声光子,红色光子为去噪后得到的信号光子。从中,可以明显看出,在强噪声背景下,剪枝四叉树方法相比四叉树方法误识别的噪声光子数量得到减少,去噪效果更好。将上述两种方法经过二次去噪得到如图13和14所示结果图,可以看到四叉树方法去噪结果在经过二次去噪后仍存在一定量的噪声光子,而本文所提剪枝四叉树方法和二级去噪则基本去除了所有噪声光子。这是由于二次去噪所采用的箱线图法去噪性能会随着离群噪点的增多而降低,而剪枝四叉树方法减少了误识别噪声光子的数量,所以使剪枝四叉树结合二级去噪在去噪效果上要优于四叉树方法结合二级去噪。

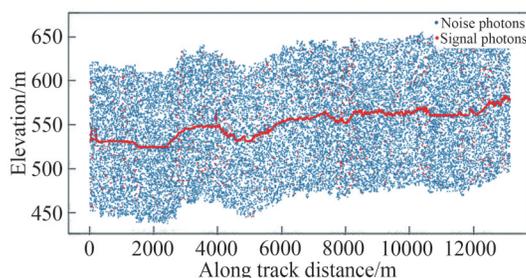


图11 四叉树方法在研究区域1去噪结果
Fig. 11 Denoising result of quadtree method in study area 1

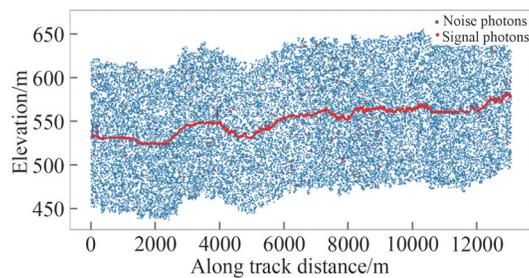


图12 剪枝四叉树方法在研究区域1去噪结果
Fig. 12 Denoising result of pruned quadtree method in study area 1

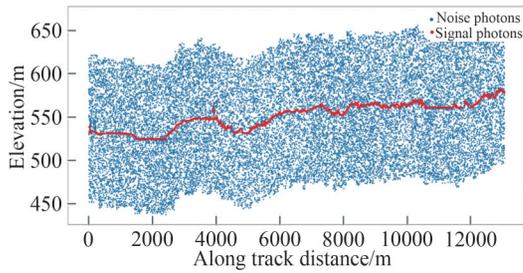


图 13 二叉树方法和二级去噪在研究区域 1 去噪结果

Fig. 13 Denoising result of quadtree method and second-level denoising in study area 1

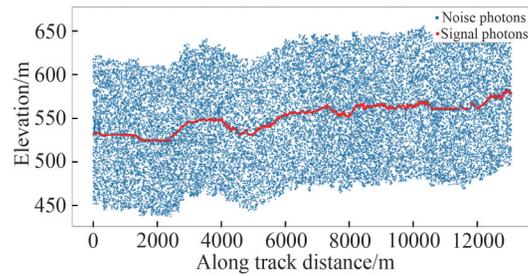


图 14 剪枝二叉树方法和二级去噪在研究区域 1 去噪结果

Fig. 14 Denoising result of pruned quadtree method and second-level denoising in study area 1

为进一步验证本文所提方法相较于二叉树方法具有更优的去噪性能以及去噪结果的准确程度,本文以机载激光雷达生成的高程数据产品为标准进行对比试验。由于此区域植被覆盖稀疏,因此在研究区域 1 只使用 DTM 作为对比数据。分别用二叉树方法提取的信号光子和本文所提方法提取的信号光子得到地表种子光子,将拟合的地表曲线与 DTM 剖面高程曲线进行对比,结果如图 15 所示。可以看到,利用二叉树方法提取的信号光子所拟合的地表曲线与 DTM 剖面的真实地表曲线之间存在着较大偏差,无法正确反映地表走势,而本文所提方法提取的信号光子拟合的地表曲线则与 DTM 剖面的地表曲线基本一致。进一步地,定量计算两种方法所得地表种子光子高程与 DTM 高程之间的均方根误差与决定系数,其结果如表 1 所示。可以看出,本文方法的 RMSE 为 0.91 m,优于二叉树方法所对应的 10.51 m, R^2 为 0.997,非常接近理想值 1,计算光子的高程与分辨率为 1 m 的机载激光雷达高程数据产品高程基本一致,较二叉树方法对应的 0.713,有显著提高。

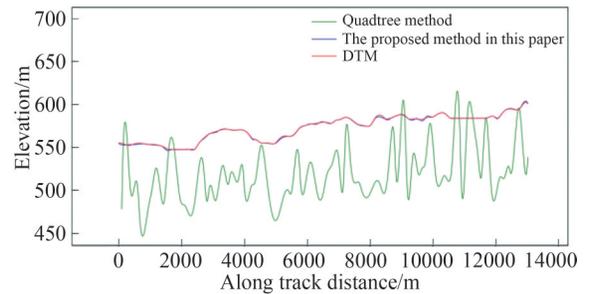


图 15 研究区域 1 地表曲线结果

Fig. 15 Ground curves in study area 1

表 1 研究区域 1 地表精度评价

Table 1 Ground accuracy evaluation in study area 1

| Algorithm | RMSE/m | R^2 |
|-----------------|--------|-------|
| Quadtree method | 10.51 | 0.713 |
| Proposed method | 0.91 | 0.997 |

2.2 研究区域 2 去噪

图 16 和图 17 分别为利用二叉树方法和剪枝二叉树方法在研究区域 2 的去噪结果,可以看出,二叉树方法识别的噪声光子较多,而剪枝二叉树方法明显减少了误识别噪声光子的数量。图 18 为二叉树方法和二级去噪的结果,仍然残留了一定量的噪声光子,图 19 所示的剪枝二叉树方法和二级去噪则基本去除了所有的噪声光子。

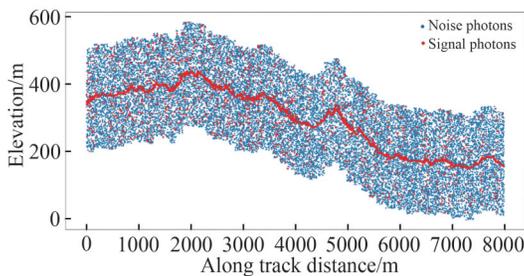


图 16 二叉树方法在研究区域 2 去噪结果
Fig. 16 Denoising result of quadtree method in study area 2

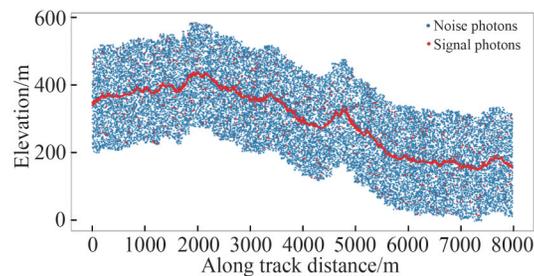


图 17 剪枝二叉树方法在研究区域 2 去噪结果
Fig. 17 Denoising result of pruned quadtree method in study area 2

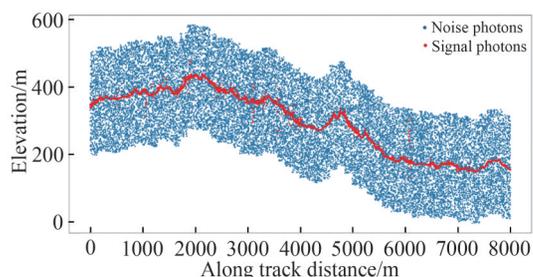


图 18 四叉树方法和二级去噪在研究区域 2 去噪结果

Fig. 18 Denoising result of quadtree method and second-level denoising in study area 2

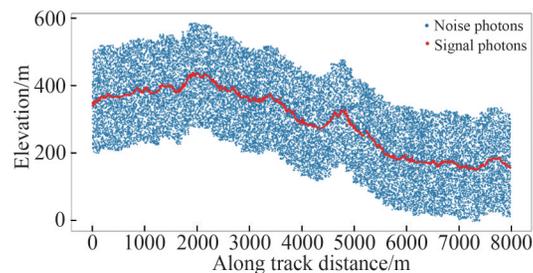


图 19 剪枝四叉树方法和二级去噪在研究区域 2 去噪结果

Fig. 19 Denoising result of pruned quadtree method and second-level denoising in study area 2

同样为进一步验证本文所提方法相较于四叉树方法具有更好的去噪性能以及去噪结果的准确程度,对于研究区域 2,从四叉树方法提取的信号光子和本文所提方法提取的信号光子得到冠顶和地表种子点,将拟合的冠顶和地表曲线分别与 DSM 和 DTM 剖面高程曲线进行对比,如图 20 和 21 所示。从图中可以看出,利用四叉树方法提取的信号光子拟合的冠顶和地表曲线与 DSM 和 DTM 剖面的冠顶和地表曲线都存在较大的偏差,而利用本文所提方法提取的信号光子拟合的曲线则与 DSM 和 DTM 剖面曲线基本一致。从表 2 和表 3 可以看出,研究区域 2 本文方法所得信号光子中提取的冠层和地表种子光子高程与 DSM 和 DTM 高程之间的 RMSE 分别为 3.56 m 和 2.47 m,明显优于四叉树方法对应的 90.17 m 和 90.92 m, R^2 为 0.998 和 0.999,接近理想值 1,计算光子的高程与分辨率为 1 m 的机载激光雷达高程数据产品高程基本一致,与四叉树对应的 0.4 和 0.156 相比,有显著提高。

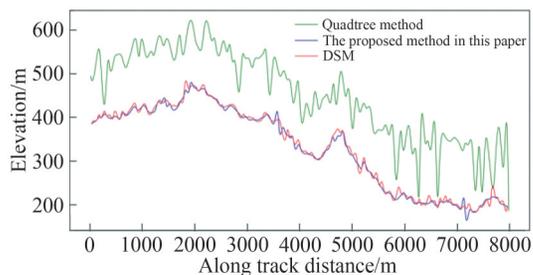


图 20 研究区域 2 冠顶曲线结果

Fig. 20 Canopy top curves in study area 2

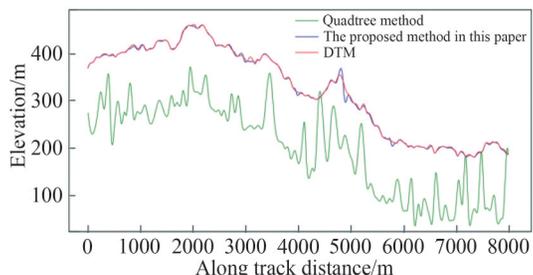


图 21 研究区域 2 地表曲线结果

Fig. 21 Ground curves in study area 2

表 2 研究区域 2 冠顶精度评价

Table 2 Canopy top accuracy evaluation in study area 2

| Algorithm | RMSE/m | R^2 |
|-----------------|--------|-------|
| Quadtree method | 90.17 | 0.400 |
| Proposed method | 3.56 | 0.998 |

表 3 研究区域 2 地表精度评价

Table 3 Ground accuracy evaluation in study area 2

| Algorithm | RMSE/m | R^2 |
|-----------------|--------|-------|
| Quadtree method | 90.92 | 0.156 |
| Proposed method | 2.47 | 0.999 |

3 结论

本文提出了一种无输入参数强噪声背景下 ICESat-2 点云去噪方法,以剪枝四叉树层值表征光子密度,自适应求取信号光子密度阈值,进行一级去噪;然后通过箱线图进一步去除少量离群噪声光子,进行二级去噪。本文所提方法避免了强噪声背景下局部稀疏、相距较近的噪声光子被四叉树分隔层次较多而被误表征

为密度过大,自适应求取信号光子的密度阈值,并对相聚密集噪声光子进行了有效去除,与四叉树方法相比,具有更优的去噪性能。本文所提方法去噪后的信号光子所拟合的冠顶和地表曲线与分辨率为1 m的机载激光雷达高程数据产品高程剖面曲线基本一致。

当然,限于所掌握的公开数据有限等原因,本文只选取了较为典型的区域进行了比对实验,更多区域的实验验证还有待以后进一步进行。同时,本文去噪方法中采用了划分窗口的方式,可能会存在不同窗口去噪结果相邻边界不一致的现象,后续研究中将结合窗口拓展等方式来降低此类边缘效应。

参考文献

- [1] MARKUS T, NEUMANN T, MARTINO, et al. The Ice, Cloud, and land Elevation Satellite-2 (ICESat-2): Science requirements, concept, and implementation[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 190: 260-273.
- [2] ZHU Xiaoxiao, WANG Cheng, XI Xiaohuan, et al. Research progress of ICESat-2/ATLAS data processing and applications[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(11): 76-85.
朱笑笑, 王成, 习晓环, 等. ICESat-2星载光子计数激光雷达数据处理与应用研究进展[J]. *红外与激光工程*, 2020, 49(11): 76-85.
- [3] WANG Mi, WEI Yu, YANG Bo, et al. Extraction and analysis of global elevation control points from ICESat-2 /ATLAS data[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(2): 184-192.
王密, 韦钰, 杨博, 等. ICESat-2/ATLAS全球高程控制点提取与分析[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2021, 46(2): 184-192.
- [4] SHAN J, TOTH C K. *Topographic laser ranging and scanning: principles and processing*[M]. UK: CRC Press, 2009.
- [5] XIA Shaobo, WANG Cheng, XI Xiaohuan, et al. Point cloud filtering and tree height estimation using airborne experiment data of ICESat-2[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2014, 18(6): 1199-1207.
夏少波, 王成, 习晓环, 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.
- [6] XU Yiteng, LI Guoyuan, QIU Chunxia, et al. Single photon laser data processing technology based on terrain correlation and least square curve fitting[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(12): 148-157.
许艺腾, 李国元, 邱春霞, 等. 基于地形相关和最小二乘曲线拟合的单光子激光数据处理技术[J]. *红外与激光工程*, 2019, 48(12): 148-157.
- [7] XIE Feng, YANG Gui, SHU Rong, et al. An adaptive directional filter for photon counting Lidar point cloud data[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2017, 36(1): 107-113.
谢锋, 杨贵, 舒嵘, 等. 方向自适应的光子计数激光雷达滤波方法[J]. *红外与毫米波学报*, 2017, 36(1): 107-113.
- [8] NIE Sheng, WANG Cheng, XI Xiaohuan, et al. Estimating the vegetation canopy height using micro-pulse photon-counting LiDAR data[J]. *Optics Express*, 2018, 26(10): A520-A540.
- [9] CHEN Bowei, PANG Yong, LI Zengyuan, et al. Potential of forest parameter estimation using metrics from photon counting LiDAR data in howland research forest[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(7): 856.
- [10] CAO Bincai, FANG Yong, JIANG Zhenzhi, et al. Implementation and accuracy evaluation of ICESat-2 ATL08 denoising algorithms[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2020, (5): 25-30.
曹彬才, 方勇, 江振治, 等. ICESat-2 ATL08去噪算法实现及精度评价[J]. *测绘通报*, 2020, (5): 25-30.
- [11] ZHANG Shuaitai, LI Guoyuan, ZHOU Xiaoqing, et al. Signal photon point cloud denoising algorithm based on multi-features adaptive model[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(6): 20210949.
张帅台, 李国元, 周晓青, 等. 基于多特征自适应的单光子点云去噪算法[J]. *红外与激光工程*, 2022, 51(6): 20210949.
- [12] ZHANG J, KERKES J, CSATHO B, et al. A clustering approach for detection of ground in micropulse photon-counting LiDAR altimeter data[C]. *IGARSS*, 2014: 177-180.
- [13] ZHU Xiaoxiao, NIE Sheng, WANG Cheng, et al. A noise removal algorithm based on OPTICS for photon-counting LiDAR data[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2021, 18(8): 1471-1475.
- [14] MAGRUDER L A, WHARTON III M E, STOUT K D, et al. Noise filtering techniques for photon-counting LiDAR Data[C]. *SPIE 8379, Laser Radar Technology and Applications XVII: 83790Q*.
- [15] CHEN Bowen, PANG Yong. A denoising approach for detection of canopy and ground from ICESat-2's airborne simulator data in Maryland, USA [C]. *AOPC 2015: Advances in Laser Technology and Applications*, 2015, 9671: 383-387.
- [16] ZHANG Guoping, XU Qing, XING Shuai, et al. A noise-removal algorithm without input parameters based on quadtree isolation for photon-counting LiDAR[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2021, 19: 1-5.
- [17] KWOK R, CUNNINGHAM G F, HOFFMANN J, et al. Testing the ice-water discrimination and freeboard retrieval algorithms for the ICESat-2 mission[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 183: 13-25.
- [18] NEUENSCHWANDER A, PITTS K. The ATL08 land and vegetation product for the ICESat-2 Mission[J]. *Remote*

- Sensing of Environment, 2019, 221: 247-259.
- [19] E Xiangying, DAI Guangyao, WU Songhua. ICESat-2 ATLO3 data preprocessing and correction method[J]. Infrared and Laser Engineering, 2021, 50(6): 92-102.
俄相颖, 戴光耀, 吴松华. ICESat-2 ATLO3数据预处理及校正方法[J]. 红外与激光工程, 2021, 50(6): 92-102.
- [20] FANG Yong, CAO Bincai, GAO Li, et al. Development and application of lidar mapping satellite[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(11): 19-27.
方勇, 曹彬才, 高力, 等. 激光雷达测绘卫星发展及应用[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(11): 19-27.
- [21] JIAO Huihui, XIE Junfeng, LIU Ren, et al. Discussion on denoising method of photon counting LiDAR for satellite ground observation[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2021, 42(5): 140-150.
焦慧慧, 谢俊峰, 刘仁, 等. 星载对地观测光子计数激光雷达去噪方法浅析[J]. 航天返回与遥感, 2021, 42(5): 140-150.
- [22] ZHANG Zheng, XU Chao, REN Shuxia. Digital image processing and machine vision: Visual C++ and Matlab implementation[M]. Beijing: People's Posts and Telecommunications Press, 2010.
张铮, 徐超, 任淑霞. 数字图像处理与计算机视觉——Visual C++与Matlab实现[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2010.
- [23] WANG Enliang, XU Lei, HAN Hongwei, et al. Extracting river ice concentration in cold regions based on the OTSU algorithm[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2021, 29(6): 1429-1439.
汪恩良, 徐雷, 韩红卫, 等. 基于OTSU算法提取寒区河流流冰密度研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2021, 29(6): 1429-1439.
- [24] HOAGLIN D C, LGLEWICZ B, TUKEY J W. Performance of some resistant rules for outlier labeling[J]. Journal of the American Statistical Association, 1986, 81(396): 991-999.
- [25] FRIGGE M, HOAGLIN D C, LGLEWICZ B. Some implementations of the boxplot[J]. The American Statistician, 1989, 43(1): 50-54.

A Parameter-free Denoising Method for ICESat-2 Point Cloud Under Strong Noise

LIU Xiang^{1,2}, ZHANG Lihua^{1,2}, DAI Zeyuan^{1,2}, CHEN Qiu³, ZHOU Yinfei^{1,2}

(1 Department of Military Oceanography and Hydrography & Cartography, Dalian Naval Academy,
Dalian, Liaoning 116018, China)

(2 Key Laboratory of Hydrographic Surveying and Mapping of PLA, Dalian Naval Academy,
Dalian, Liaoning 116018, China)

(3 91001 Troops, Beijing 100071, China)

Abstract: The Ice, Cloud, and Land Elevation Satellite-2 (ICESat-2) was launched on 15 September 2018 to measure ice sheet and glacier elevation change, land elevation, global vegetation elevation and monitor clouds and aerosols. The sole instrument on-board ICESat-2 is the Advanced Topographic Laser Altimeter System (ATLAS). ATLAS employs a micro-pulses multi-beam photon-counting laser lidar technology, which is the first time this technology has been applied to a spaceborne platform. However, since the laser pulses emitted and detected by ATLAS are weak signals, the ICESat-2 data introduces a significant number of noise photons. The denoising of the ICESat-2 data is a key point for its application.

A few algorithms have been proposed to remove noise photons in the ICESat-2 data, which are based on the criterion that signal photons are more densely distributed than noise photons. Most of the denoising methods nowadays depend on the set parameters and the parameter-free method is becoming a new frontier. To fix the current parameter-free quadtree denoising method which misidentifies noise photons under the strong noise background, this paper proposes an improved parameter-free denoising method for the ICESat-2 point cloud. For avoiding the noise photons sparse in density but close in the distance in a partial area, which means photons may be separated by the original quadtree and misrepresented as a high density, the pruned quadtree is used to represent a suitable density. According to the location of ICESat-2 photons, the initial space is given and recursively divided into four quadrants. Instead of dividing until each quadrant contains no more than one photon, a quadrant is not divided in the case that the quadrant is divided once and its internal photons are not separated. The density of photon is the corresponding level value in the tree structure. Then, several equidistant windows are divided according to the along track

distance to adapt the changes of SNR. The Otsu method adaptively calculates the photon density threshold of each window. Photons with level values less than the density threshold are removed to complete the first-level denoising. After that, there may be a small number of outlier noise photons with a high local density and cannot be identified by the pruned quadtree, the box-plot is used to complete the second-level denoising. Considering that the change of elevation will affect the box-plot denoising, equidistant windows are also divided according to the along track distance. Photons whose elevations in each window are not within the upper and lower thresholds calculated by box-plot are identified as noise photons.

Using the data from North Dakota and California to carry out the denoising experiments for the ICESat-2 point cloud under strong noise. The airborne lidar elevation products with a resolution of 1m are used as the verification data, and the denoising effect is verified by a combination of qualitative and quantitative methods. Experimental results show that: 1) Compared with the original quadtree denoising method, the number of noise photons misidentified by the pruned quadtree method is reduced under strong noise. Based on the advantages of pruned quadtree, the proposed pruned quadtree method combined with box-plot is also superior to the quadtree method combined with box-plot in terms of denoising effect; 2) The ground and canopy top curves fitted by the signal photons obtained by the quadtree method have large deviations from the profile elevation curves of the airborne lidar elevation products, while the curves fitted by the signal photons obtained by the proposed method can basically be consistent with the profile elevation curves. Moreover, the accuracy evaluation results of the proposed method are better than those of the quadtree method. The RMSE and R^2 values of the ground accuracy evaluation corresponding to the proposed method in study area 1 are 0.91 m and 0.997, respectively. The RMSE and R^2 values of the ground accuracy evaluation corresponding to quadtree method in study area 1 are 10.51 m and 0.713, respectively. In study area 2, the RMSE values of the ground and canopy top accuracy evaluation corresponding to the proposed method are 2.47 m and 3.56 m with the R^2 values are 0.999 and 0.998, respectively. The RMSE corresponding to quadtree method are 90.92 m and 90.17 m with R^2 are 0.156 and 0.400. Overall, the proposed method without input parameters is effective for removing noise photons in the ICESat-2 data under strong noise.

Key words: ICESat-2; Parameter-free; Strong noise; Denoising; Quadtree; Pruned quadtree; Box-plot

OCIS Codes: 280.3640; 280.3400; 140.3538; 070.4560