

ICESat/GLAS 回波能量数据的云光学厚度反演

么嘉祺^{1,2}, 高小明², 李国元², 杨雄丹^{1,2}, 禄 兢², 李参海²

- (1. 辽宁工程技术大学 测绘与地理科学学院, 辽宁 阜新 123000;
2. 自然资源部国土卫星遥感应用中心, 北京 100048)

摘 要: 星载激光测高仪能够有效获取地面点的三维坐标信息且具有较高的精度, 但是在大气传输中激光不可避免会受到云的影响。首先, 根据 GLAS(Geoscience Laser Altimeter System)地学激光测高系统记录的大气传输过程中的回波能量数据拟合回波波形; 其次, 采用微分零交叉法和 Fernald 法分别实现了云检测和云光学厚度的反演; 最后, 利用广东省 MODIS(MODerate-resolution Imaging Spectroradiometer)数据以及北京地区 AERONET(Aerosol Robotic Network)地面观测站实测数据进行了验证分析。结果表明: 文中方法在激光测高卫星云光学厚度反演上具有较高的可信度, 在实际情况下云光学厚度反演误差小于 0.1, 且云光学厚度小于 1 时, 相对误差远远小于 0.01, 相关结论对国产卫星激光测高数据质量控制具有参考价值。

关键词: 卫星激光测高; 云检测; 云光学厚度; 数据质量控制; GLAS

中图分类号: P413 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.S117009

Cloud optical depth inversion of echo energy data based on ICESat/GLAS

Yao Jiaqi^{1,2}, Gao Xiaoming², Li Guoyuan², Yang Xiongdan^{1,2}, Lu Jing², Li Canhai²

- (1. School of Surveying, Mapping and Geographical Sciences, Liaoning University of Engineering and Technology, Fuxin 123000, China;
2. Land Satellite Remote Sensing Application Center, Ministry of Natural Resources of P.R.China, Beijing 100048, China)

Abstract: Satellite laser altimetry can quickly and efficiently obtain the 3D coordinate data of ground points with high precision elevation, but the laser was inevitably affected by clouds in atmospheric transmission. Firstly, echo waveforms were fitted according to the echo energy data recorded in the atmospheric transmission process by the geoscience laser altimeter system (GLAS). Secondly, the differential zero-crossing method and Fernald method were used to realize cloud detection and cloud optical depth inversion respectively. Finally, moderate-resolution imaging spectroradiometer (MODIS) data and aerosol robotic network (AERONET) ground station data from Beijing region were employed to perform a validation analysis. The results show that the method presented in this paper has a high credibility in the optical depth inversion of the cloud by laser altimetry satellite. In the actual situation,

收稿日期: 2018-11-09; 修订日期: 2018-12-14

基金项目: 国家自然科学基金(41871382, 41601505); 空基科研星工程先期攻关项目(2016K-10);

国家重点研发计划战略性国际科技创新合作重点专项(2016YFE0205300)

作者简介: 么嘉祺(1995-), 男, 硕士生, 主要从事卫星激光测高数据处理方面的研究。Email: y1995y@foxmail.com

导师简介: 高小明(1981-), 女, 副研究员, 博士, 主要从事自然资源卫星总体设计相关方面的研究。Email: gaoxm@sasmac.cn

the cloud optical depth inversion error is less than 0.1, and when the cloud optical depth is less than 1, the relative error is far less than 0.01. The relevant conclusions are of reference value for the quality control of the laser altimetry data of domestic satellites.

Key words: satellite laser altimeter; cloud detection; cloud optical depth; data quality control; GLAS

0 引言

卫星激光测高能够大范围地获取亚米级甚至厘米级的地表高程信息,已经成为新型对地观测的重要手段之一^[1]。我国在 2016 年发射的资源三号 02 星上搭载了试验性激光测高载荷^[2],在即将发射的高分七号高分辨率立体测绘卫星以及陆地生态系统碳监测卫星,也装备了业务化应用的激光测高系统,主要用于获取高精度的广义激光高程控制点和全球森林生物量碳监测等^[3]。美国国家航天局在 2003 年发射了搭载 GLAS 的 ICESat 卫星,又于 2018 年 9 月成功发射了 ICESat-2^[4],用于长期研究极地冰盖、海冰高程变化及森林冠层覆盖的科学研究^[5],同时还在 2018 年 12 月发射了全球生态系统动力学调查^[6]。此外,用于获得全球 5 m 格网大小和 10 cm 高程精度的地形信息的高精度“表面地形激光测量”,也在美国国家研究委员会计划中^[7]。影响卫星激光测高精度的因素很多^[8],其中云的影响不容忽视,云除直接影响激光测距精度外,还可能使信噪比严重下降,测量结果完全无效。为了保证激光测高产品的精度和可靠性,云对激光测高数据质量的影响是一个不可忽略的因素。卫星激光测高的回波波形中能反映激光在传输中受云以及地物的影响,以回波数据作为切入口,对于卫星激光测高数据质量控制具有重要参考价值。

云是指大气中的液态水分子、凝华而成的冰晶粒子以及两者的混合物,与清洁大气相比,云的密度较大,因此在激光大气传输过程中,穿透云时回波信号强度会有所变化,针对这一特点许多学者提出了相应的云检测方法,包括阈值法^[9]、Klett 法^[10]、多传感器联合反演法^[11]、滑动窗口积分法^[12]以及微分零交叉法^[13]等。阈值法、多传感器联合反演法很难找到符合理想条件的数据,有很大的局限性;滑动窗口积分法、微分零交叉法等方法涉及到复杂的阈值选取

问题,不同的阈值对云检测结果有很大影响。毛飞跃等人^[14]对微分零交叉法进行了改进,在传统微分零交叉法的基础上顾及了信号前后的关系,减小了将噪声误识别为云的概率,虽然同样涉及多个阈值的选取,但是保证了较高的云检测精度。Duda 等人^[15-16]经过研究发现云对卫星激光测高数据的影响主要与云高度、云粒子半径、云光学厚度等几个因素有关。云光学厚度(Cloud Optical Depth, COD),指云在单位截面积上由于粒子吸收和散射对光造成的削减量,是一个无量纲单位。相比于前两者,云光学厚度更直观的表现了云对激光的削弱作用,因此受到相关学者的关注^[17]。国内学者围绕大气激光雷达以及激光通信开展了较多的云对激光影响方面的研究,但专门针对卫星激光测高的云检测与定量分析较少。

1 原理与方法

1.1 云检测算法原理

1.1.1 还原大气传输波形

ICESAT/GLAS 记录的 1 ns 间隔的回波波形为光斑到达地面后返回的信号,在大气传输过程中的数据为 75 m 间隔的回波能量。文中通过 GLAH02 数据中记录的 1 064 nm 通道接收的回波能量值还原大气传输过程中的回波波形,进而通过波形数据实现云检测。在 GLAS 数据产品 GLAH02 中记录了回波能量值能量,如表 1 所示,r5_ir_lid 为 5 Hz 产品,记录 132 个数组,表示海拔高度 20~10 km 范围内的回波能量值;r40_ir_lid 为 40 Hz 产品,记录 148 个数组,表示海拔高度 10~-1 km 范围内回波能量值。两个参数为系统每隔 75 m 距离所记录的回波能量值,根据光信号与电信号的转化关系,量化为 0~255 之间的数值记录在 GLAH02 中。尽管存在一定的无效值,但是回波能量值仍能表示大气传输部分返回激光束的能量变化,因此通过不同高度的回波能量值,可以还原大气传输波形。

表 1 GLAH02 词典表
Tab.1 GLAH02 dictionary table

Label	Datatype (Dimensions)	Long_name (Standard_name)	Units	Description
r5_ir_lid	REAL(Unlimited,132)	1 064 nm lidar data from 20 km to 10 km	(pe/sample)·km ² /J	Normalized lidar signal from the 1 064 nm cloud digitizer data for the 20 km to 10 km atmospheric segment. Background subtraction, and range squared correction is applied.
r40_ir_lid	REAL(Unlimited,148)	1 064 nm lidar data from 10 km to -1 km	(W·km ²)/J	Normalized lidar signal from the 1 064 nm cloud digitizer data for the 10 km to -1 km atmospheric segment. Background subtraction, and range squared correction is applied.

1.1.2 微分零交叉法云检测

为了通过波形判断激光束是否受到了云的影响,文中采用微分零点交叉法实现云检测。微分零交叉法是通过回波波形的一阶微分的零点、结合回波波形判断云层的位置,原理是根据激光束的回波能量变化判断云的位置,但是噪声引起的波形微小变化也会被误判为云。为了排除一些明显的噪声,需要对波形进行一定的去噪处理。当一阶微分 dP/dr 大于 30(根据参考文献[14]选取)时可能存在云,为排除噪声影响,只有当一阶微分连续大于 20 的点数超过 15 时才能判定为云顶、云底点^[14],通常选择具有代表性的 5~11 个点来拟合波形^[13],将有云区域(微分零点处附近)分为几部分,选取波形区域峰值点作为代表性点。HHT(希尔伯特)变换^[18]常用于激光云高仪等激光波形数据去噪处理,在变换平滑之后仍能很好的保留波形特征用于云检测等处理。经过 HHT 平滑后,按上述选点要求,在波形上选取 7 个代表性点(如图 1 紫色标记点处)进行拟合波形^[14],得到如图 1 所示波形。

图 1 中蓝色波形由以上两个参数散点数据构成,表示原始数据,紫色圆点代表所选择的 7 个代表性点,黑色波形 $P(r)$ 为利用代表性点所构建的波形,红色波形 dP/dr 为波形 $P(r)$ 对应的一阶微分曲线,横坐标为回波信号距目标地物距离,纵坐标为回波

振幅。该方法本质上为寻找微分零点,结合原有波形 $P(r)$ 进行判断变化明显的区域(小波峰)是否为云,如图 1 微分零点处,微分由负变正附近的原波形波谷判断为云底;微分零点处,微分由正变负附近的原波形波峰判断为云顶。 R_a 处为几何重叠因子造成的并不判断为云底^[19], r_b 、 r_d 处为云底, r_c 、 r_e 处为云顶,在海拔高度 3~6 km、9~12 km 处存在云干扰。

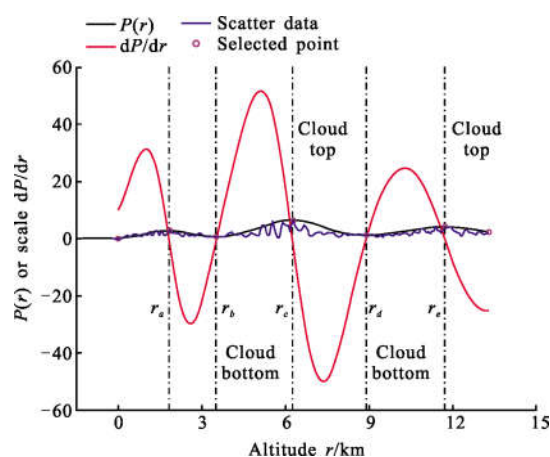


图 1 散点数据、代表性点、还原波形 $P(r)$ 以及对应一阶微分曲线

Fig.1 Scatter data, the selected point, the reduced echo waveform $P(r)$ and the corresponding first order differential curve

1.1.3 云光学厚度的反演

采用 Fernald 法实现云光学厚度的反演,虽然需

要设定多个参数,但反演结果精度更高。

当激光的波长处于大气窗口时,大气分子对激光吸收较少,大气中的水汽、二氧化碳、臭氧、氮气等主要分子对波长为 1 064 nm 的激光基本上无吸收作用^[20],所以主要考虑分子散射对大气的影响。根据标准大气模型计算得到的大气分子吸收系数小于 10^{-6} km^{-1} ^[21],所以激光在云中的多次散射是影响激光质量的主要因素。Fernald 法是国内外使用最为广泛

的激光雷达求解方法,它考虑了 Rayleigh 散射和 Mie 散射两者的影响, r 表示激光雷达到目标的距离, $\alpha_{\text{Mie}}(r)$ 表示粒子的消光系数, $\alpha_{\text{Ray}}(r)$ 表示分子的消光系数, $\beta_{\text{Mie}}(r)$ 表示粒子的后向散射系数, $\beta_{\text{Ray}}(r)$ 表示分子的后向散射系数。

令 $S_1 = \frac{\alpha_{\text{Mie}}(r)}{\beta_{\text{Mie}}(r)}$ 、 $S_2 = \frac{\alpha_{\text{Ray}}(r)}{\beta_{\text{Ray}}(r)}$,则在 r_c 高度以下的粒

子消光系数激光雷达方程为^[22]:

$$\alpha_{\text{Mie}}(r) = -\frac{S_1}{S_2} \alpha_{\text{Ray}}(r) + \frac{P(r)r^2 \exp\left[2\left(\frac{S_1}{S_2}-1\right) \int_r^{r_c} \alpha_{\text{Ray}}(r) dr\right]}{\frac{P(r_c)r_c^2}{\alpha_{\text{Mie}}(r_c) + \frac{S_1}{S_2} \alpha_{\text{Ray}}(r_c)} + 2 \int_r^{r_c} P(r)r^2 \exp\left[2\left(\frac{S_1}{S_2}-1\right) \int_r^{r_c} \alpha_{\text{Ray}}(r) dr\right] dr} \quad (1)$$

式中: α_{Mie} 由设定的气溶胶散射比 $R=1+\frac{\beta_{\text{Mie}}(r_c)}{\beta_{\text{Ray}}(r_c)}=1.01$ 来确定^[23]。

从公式(1)可以看出,通过距离 r 和回波强度 $P(r)$ 求解云消光系数 α_{Mie} 需要先求解 S_1 、 S_2 、 $\alpha_{\text{Ray}}(r)$ 以及边界值 $\alpha_{\text{Ray}}(r_c)$ 。标定高度一般选择清洁大气处、对流层附近(海拔高度 20 km 处),以避免其他因素干扰,即 $r_c=20 \text{ km}$ 。参考文献[24]通过分析数据确定大气分子的消光后向散射比通常为固定系数: $S_2=8\pi/3$ 。 S_1 与激光雷达探测波长、云的类型、有效粒子半径等因素紧密相关^[25],选取合理的 S_1 值仍是一个难题,不同的学者计算或者实验得出的 S_1 也具有一定的差异,参考文献[14,26]分别选择 10、20、30 sr 分别进行试验,结果表明 S_1 取 20 接近理想反演云光学厚度的结果,其余两个值最大有 10%~20% 的偏差。文中通过查询数据所在时空的气象条件、云类型,结合参考文献[27]确定了 S_1 值。

根据 E Zehavi^[26]所提出的散射理论,大气分子的后向散射系数与单个大气分子的散射面积以及大气分子密度成正比关系。

$$\beta_{\text{Ray}} = N_m \times \sigma_m \quad (2)$$

式中: β_{Ray} 为大气分子的后向散射系数($\text{m}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$),其定义是单位体积、单位立体角的大气分子后向散射截面; σ_m 为单个大气分子的散射截面; N_m 为大气密度。 N_m 是与大气压强与大气温度有关,如下:

$$N_m = \frac{296}{T(\text{K})} \times \frac{p(\text{Pa})}{1.013 \times 10^5} \times N_L \quad (3)$$

式中: T 为大气温度(K); p 为大气压强(Pa); N_L 是当大气密度为 296 K、压强为 $1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$ 时的大气密

度参考值,取值为 $N_L=2.479 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$ 。在混合大气中,当高度小于 100 km 时,其中的单个大气分子的散射截面可以表示为:

$$\sigma_m = 5.45 \times \left[\frac{550}{\lambda} \right]^4 \times 10^{-32} \text{ m}^2 \cdot \text{sr}^{-1} \quad (4)$$

式中: λ 为激光的波长(单位:nm)。综上所述,可以很容易地算出大气分子的散射系数 β_{Ray} ,通过标准大气表可以较为精准地获取。根据 Rayleigh 散射理论,大气中的消光系数 α_{Ray} 与散射系数 β_{Ray} 成正比:

$$\alpha_{\text{Ray}} = \frac{8\pi}{3} \times \frac{45+10\varepsilon}{45+7\varepsilon} \times \beta_{\text{Ray}} \quad (5)$$

式中: ε 为分子的各向异性的系数,将上述代入公式(1),可以得到 α_{Mie} ,云光学厚度可以根据云消光系数 α_{Mie} 反演,结果如下:

$$\tau = \int_{r_{\text{bottom}}}^{r_{\text{top}}} \alpha_{\text{Mie}}(r) dr \quad (6)$$

式中: r_{top} 、 r_{bottom} 分别是云顶高度与云底高度; τ 为云光学厚度。

1.2 技术路线

文中实验需要试验区域对应的 GLAH02、GLAH11 数据,实验思路如图 2 所示:首先,利用数据产品 GLAH11 中 $r_{\text{cld_ir_OD}}$ 参数筛选受云影响的激光点($r_{\text{cld_ir_OD}}$ 是否为 0), $r_{\text{cld_ir_OD}}$ 参数表示 1 064 nm 通道所记录的云光学厚度值;其次,利用数据产品 GLAH02 中 $r5_{\text{ir_lid}}$ 、 $r40_{\text{ir_lid}}$ 两个参数还原大气传输部分的波形数据;然后,利用改进的微分零交叉法实现云检测,并通过 Fernald 法反演云光学厚度;最后,利用 GLAS、MODIS、AERONET 数据验证反演结果精度。

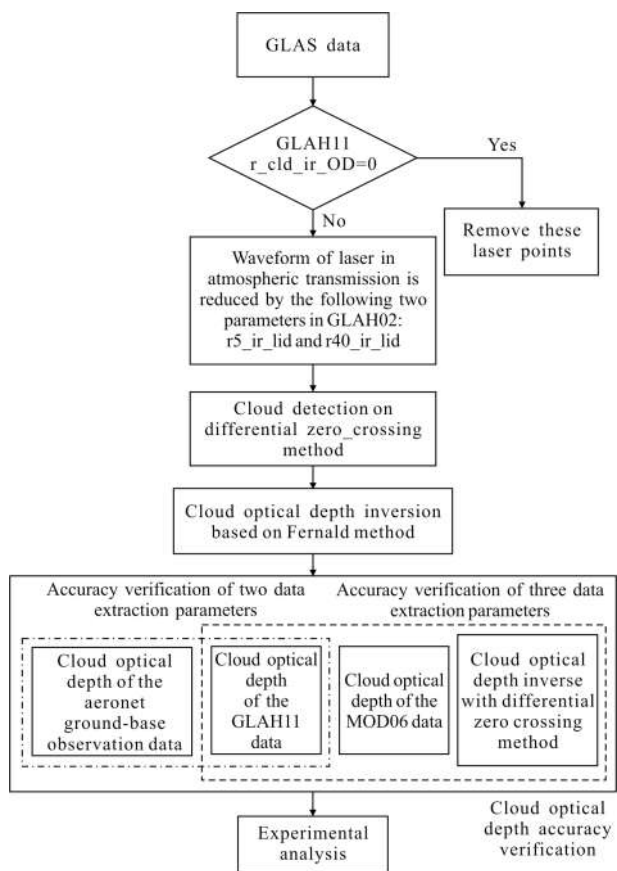


图 2 文中流程图

Fig.2 Flow chart of this paper

2 实验与分析

2.1 与 GLAS 及 MODIS 结果对比

文中选择广东省作为试验区域，广东省地处中国南部，位于北纬 20°13′~25°31′和东经 109°39′~117°19′之间，全省陆地面积为 17.98 万 km²。如图 3 所示，GLAS 记录了从 2003 年 3 月 6 日~2009 年 10 月 9 日 32 605 个有效标识激光点，通过 GLAH11 数据质量控制参数标识云光学厚度(r_cld_ir_OD)，可以初步判断受到云影响的激光点数量为 6 817。如 1.1 节中所述，文中方法在反演云光学厚度时需要设定多个参数，参数的选取尤其是值的选取与气象等因素有关，为保证反演结果的精度，选择 GLAS 数据中的某一天作为实验数据。图 3 为广东省 GLAS 激光点分布图，其中蓝色框选部分为选择的实验数据，时间为 2003 年 10 月 8 日，共 416 个激光点。

通过 1.1 节中所述方法，可以实现云光学厚度的反演，但是需要设定多个阈值，比如 S₁ 值、对应高

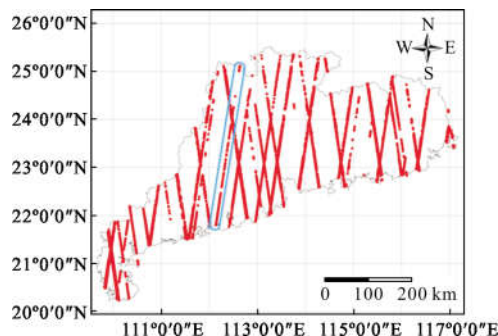


图 3 广东省 GLAS 激光点分布

Fig.3 Distribution of GLAS laser points in Guangdong province

度的温度、压强等值。通过中国气象网、国际云观测计划(ISCCP)等途径，判断数据获取时云的类型主要为卷云，通过相关参考文献[27]确定的值(文中实验 S₁ 取值为 20)，对应高度的温度、压强等值主要参考美国标准大气表^[14,29]。同一个激光点从拟合波形上判断，可能穿过多层云，也可能可能将噪声引起的变化误判断为云，为了验证基于 GLAS 数据拟合波形云光学厚度反演结果精度，结合 GLAH02 数据中云光学厚度参数进行了对比。如图 4 所示是选取数据(416 个

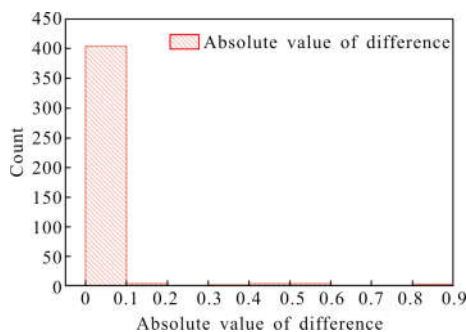


图 4 GLAS 数据与文中反演结果云光学厚度差值绝对值统计直方图

Fig.4 Histogram of absolute value difference of cloud optical depth between GLAS data and the results of inversion in this paper

激光点) 反演结果与 GLAS 数据的差值绝对值统计直方图，可以看出 Fernald 法云光学厚度反演结果与 GLAS 记录在产品 GLAH02 中的云光学厚度值基本一致，反演结果 95% 小于 0.1，且云光学厚度小于 1 时，反演误差远远小于 0.01，可以看出该方法可行的。经实验可以得出初步结论：相邻的激光点可以相互验证、排除部分遗漏噪声点、减小相应的误差，同一

激光光斑点如果穿透多层云,不同高度云光学厚度之和与数据产品 GLAH02 中的云光学厚度值较为一致。

在 MODIS 产品 MOD06 中记录了云的光学厚度参数,其空间分辨率为 30 s(约 900 m),提取激光脚点对应位置的云光学厚度值。为了验证文中反演云光学厚度的精度,将 GLAS、MODIS、文中反演云光学厚度值进行了对比,如图 5 所示,横轴为云光学厚度,纵轴为按 GLAS 云光学厚度降序排列的索引号。在云光学厚度偏大时,MODIS 云光学厚度偏大,其

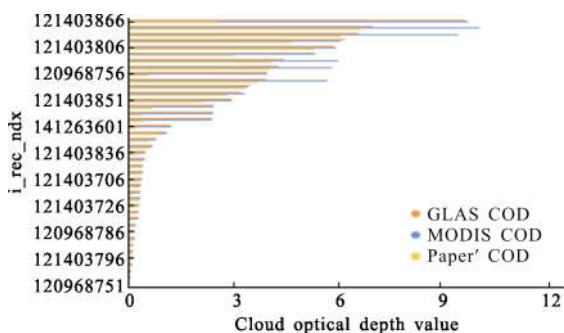


图 5 GLAS、MODIS、微分零交叉法云光学厚度对比

Fig.5 Comparison of cloud optical depth by GLAS, MODIS and differential zero crossing method

余部分(占总数据 90%)三者基本吻合。分析原因可能是:当云层过厚时,GLAS 激光脉冲无法穿透或者说穿透多层云时无法准确估计,而 MODIS 通过光谱仪能得到较为精确的结果,这样造成了云光学厚度偏大时 MODIS 与 GLAS、文中反演结果的偏差。

在云光学厚度较大时,文中反演结果、GLAS 数据光学厚度值与 MODIS 存在较大的差别,为了分析误差,结合 MODIS 影像进行相应的分析。图 6 所示为部分 GLAS 激光点所在位置的 MODIS 影像叠加,图(a)COD 为 1,图(b)COD 为 2,图(c)COD 为 5,图(d)COD 大于 5。通过观察得知:云光学厚度值与人主观对云厚薄的判断基本一致,当云层过厚时(如图 6(d)所示),激光会迅速衰减至噪声水平,因此当激光点穿过厚云时,GLAH11 中云光学厚度参数会有一些的偏差,甚至无效。在数据有效的前提下,当云光学厚度值为零时,通过 MODIS、GLAS 相关数据质量控制标识,可以判断激光并没有受到云的干扰,通过观察大量数据得到了同样的结论。因此通过云光学厚度值是否为零,可以初步判断激光光斑范围内是否存在云。

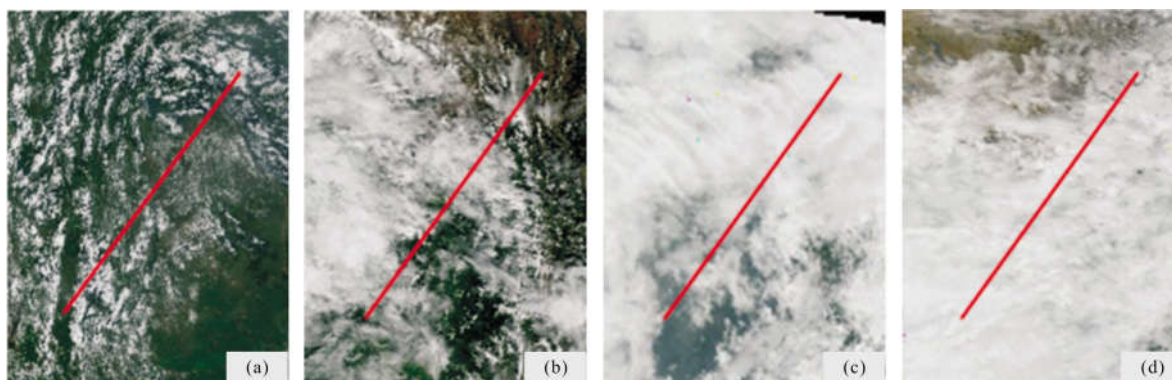


图 6 GLAS 激光点在 MODIS 上的轨迹示意图

Fig.6 Schematic diagram of the trajectory of the GLAS laser point on MODIS

2.2 与 AERONET 测站结果对比

为了进一步验证基于 GLAS 波形数据的云光学厚度反演精度,文中采用全球自动观测网 AERONET 地面观测站数据进行进一步验证。AERONET 是由美国国家航天局以及法国国家科学研究院联合建立的大气地面观测数据网络,采用 CE318 太阳光度计昼夜不间断进行大气观测,由于观测周期长、数据精度高,常作为验证反演数据精度

的真实值^[30]。

文中选取北京区域 GLAS 激光点以及 AERONET 地面观测站数据进行对比验证,如图 7 所示,在 2003~2009 年北京范围内 GLAS 激光点有效标识数量为 9 772 个,其中受到云影响的数据数量为 2 673 个。AERONET 北京区域地面观测站位于(39°58'37"N,116°22'52"E)处(图 7 中红色圆心位置),数据中记录了观测站位置云光学厚度值。选取以观测

站为圆心、10 km 为半径的区域,采样时间为 2003 年 10 月 4 日的激光点作为实验数据(图 7 中黄色圆区域,激光点数量为 110 个),其中受到云影响的点为 70 个。

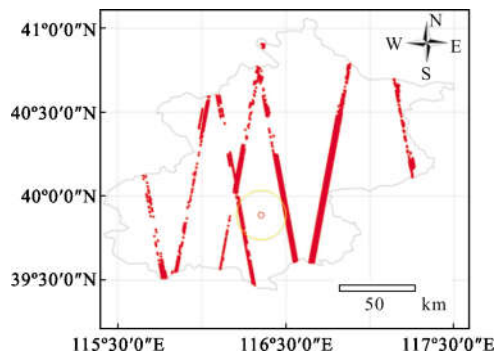


图 7 北京区域 GLAS 激光点分布

Fig.7 Distribution of GLAS laser points in Beijing

由于 GLAS 与 AERONET 对云观测的探测波长、时空尺度均不相同,需要对 AERONET 做波长插值处理。AERONET 云光学厚度数据提供了以下波长探测数据:1 020、870、670、500、440、380、340 nm。利用 1 020、870 nm 波长数据插值得到 1 064 nm 数据,这样解决了探测波长不一致的问题^[31]。选取激光工作时刻所对应的 AERONET 地面观测站测得的云光学厚度值作为真实值,进行插值得到所有激光点相对应的云光学厚度值,这样解决了时空尺度的问题。如 2.1 节中所述,通过同样的方式确定云光学厚度反演过程中的多个阈值(该节实验 S_1 取值为 18)。

AERONET 地面观测站数据在去除无效值后避免了噪声的干扰,云光学厚度精度更高。图 8 为所选取 GLAS 数据(110 个激光点)的 Fernald 法反演结果

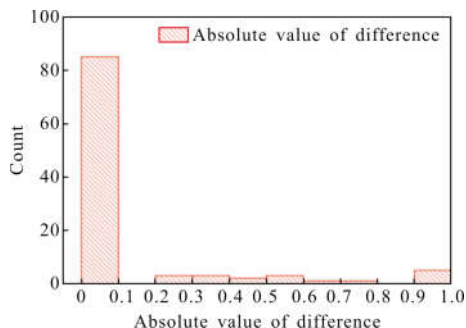


图 8 微分零交叉法与 AERONET 云光学厚度差值统计直方图

Fig.8 Statistical histogram of the cloud optical depth difference between the differential zero-crossing method and the AERONET data

与 AERONET 云光学厚度差值绝对值统计直方图。两者差值绝对值 83%集中在 0~0.1 之间,表明文中反演结果与 AERONET 地面观测站数据相差很小。

云散射会影响激光的测距精度,美国航天局为了提高 ICESat/GLAS 的大气散射改正精度,采用蒙特卡罗实验模拟预测了激光在穿过不同光学厚度云时可能造成的延迟距离,并对测高数据进行修正^[32]。GLA11 数据产品中同时存储了云光学厚度与相对应的距离改正值,提取上文所提到的北京区域 GLAS 激光点对应 GLA11 中的云光学厚度值、距离改正值,如图 9 所示,横轴为云光学厚度,纵轴为距离延迟改正数,图 9 直观显示了不同的 COD 云光学厚度条件下,因散射而引起的激光测距误差($\Delta\rho$)趋势,很明显地,测距误差随 COD 的增加而变大。当 $COD > 2$ 时,因大气散射而引起的测距误差可达 2 m 以上,成为影响激光测高质量的重要因素,必须加以考虑和修正。

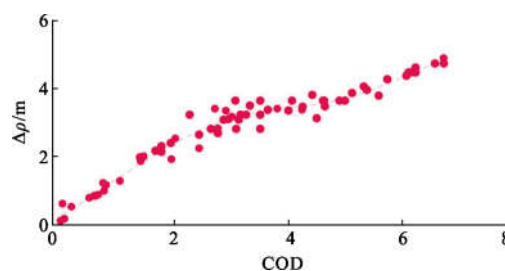


图 9 云光学厚度与测距误差之间的关系

Fig.9 Relationship between optical depth of cloud and ranging error

3 结束语

文中通过微分零交叉法实现云检测,通过 Fernald 法实现云光学厚度的反演,并采用 GLAS 数据进行了验证试验,能得到如下结论:

(1) 通过回波能量值所构建的波形,能还原大气传输过程中激光束的能量变化,为利用 GLAS 数据研究大气传输提供了一定的参考。

(2) 文中云光学厚度反演结果与 GLAS、MODIS 数据基本一致,广东省地区的试验结果相对误差小于 0.1,且云光学厚度小于 1 时,相对误差远远小于 0.01。

(3) 云光学厚度值可以作为衡量激光光斑内是否存在云的标准,在北京地区 AERONET 地面观测站数据得到了印证。

(4) 初步分析了 GLA11 数据产品中云光学厚度与测距误差,两者存在强相关。当 COD>2 时,因大气散射而引起的测距误差可达 2 m 甚至更大,成为除大气折射延迟外,影响激光测高质量的一个重要因素,在数据处理过程中必须加以考虑和修正。

卫星激光测高数据不可避免受到云影响,深入开展激光传输路径上的云检测、云光学厚度反演等研究非常必要。结合以上实验结果,文中的 COD 反演方法对于激光测高卫星数据质量控制具有重要的参考价值。此外结合我国雾霾多发、大气散射影响客观存在的特点,有针对性开展国产激光测高卫星大气散射延迟改正也是未来需要研究的问题。

参考文献:

- [1] Tang Xinming, Li Guoyuan. Development and prospect of laser altimetry satellite [J]. *Space International*, 2017(11): 13-18. (in Chinese)
唐新明,李国元. 激光测高卫星的发展与展望[J]. 国际太空, 2017(11): 13-18.
- [2] Li Guoyuan, Tang Xinming. Analysis and validation of ZY-3-02 satellite laser altimetry data [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(12): 1939-1949. (in Chinese)
李国元,唐新明. 资源三号 02 星激光测高精度分析与验证[J]. 测绘学报, 2017, 46(12): 1939-1949.
- [3] Tang Xinming, Li Guoyuan, Gao Xiaoming, et al. The rigorous geometric model of satellite laser altimeter and preliminarily accuracy validation [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2016, 45(10): 1182-1191. (in Chinese)
唐新明,李国元,高小明,等. 卫星激光测高精密几何模型构建及精度初步验证[J]. 测绘学报, 2016, 45(10): 1182-1191.
- [4] Waleed Abdalati, Zwally H J, Robert Bindshadler, et al. The ICESat-2 laser altimetry mission[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2010, 98(5): 735-751.
- [5] Yang Fan, Wen Jiahong, Weili Wang, et al. Application progress and prospect of ICESat and icesat-2 [J]. *Chinese Journal of Polar Research*, 2011, 23(2): 138-148. (in Chinese)
杨帆,温家洪,Weili Wang,等. ICESat 与 ICESat-2 应用进展与展望[J]. 极地研究, 2011, 23(2): 138-148.
- [6] Xie Dongping, Li Guoyuan, Tang Xinming, et al. GEDI space-based laser altimetry system and its application in the United States [J]. *Space International*, 2018(12): 39-42. (in Chinese)
谢栋平,李国元,唐新明,等. 美国 GEDI 天基激光测高系
- 统及其应用[J]. 国际太空, 2018(12): 39-42.
- [7] Anthony W Y, Michael A K, David J H, et al. Development effort of the airborne lidar simulator for the lidar surface topography (LIST) mission[C]//Lidar Technologies, Techniques, and Measurements for Atmospheric Remote Sensing VII. International Society for Optics and Photonics, 2011, 8182(3): 818207.
- [8] Li Guoyuan, Huang Jiapeng, Tang Xinming, et al. Influence of range gate width on detection probability and ranging accuracy of single photon laser altimetry satellite [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2018, 47 (11): 1487-1494. (in Chinese)
李国元,黄佳鹏,唐新明,等. 距离门宽度对单光子激光测高卫星探测概率及测距精度的影响 [J]. 测绘学报, 2018, 47(11): 1487-1494.
- [9] Winker D M, Vaughan M A. Vertical distribution of clouds over Hampton, Virginia observed by lidar under the ECLIPS and FIRE ETO programs [J]. *Atmospheric Research*, 1994, 34(1-4): 117-133.
- [10] James D K. Stable analytical inversion solution for processing lidar returns[J]. *Applied Optics*, 1981, 20(2): 211-220.
- [11] Zhien Wang, Kenneth Sassen. Cloud type and macrophysical property retrieval using multiple remote sensors [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 2001, 40(10): 1665-1683.
- [12] Han D W, Liu W Q, Zhang Y J, et al. Memorable glide window integral algorithm for retrieving cloud height [J]. *High Power Laser & Particle Beams*, 2008, 20(1): 1-5.
- [13] Pal S R, Steinbrecht W, Carswell A I. Automated method for lidar determination of cloud-base height and vertical extent[J]. *Applied Optics*, 1992, 31(10): 1488-1494.
- [14] Mao Feiyue, Gong Wei, Li Jun, et al. Cloud detection and parameter retrieval based on improved differential zero-crossing method for mie lidar [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(11): 3097-3102. (in Chinese)
毛飞跃,龚威,李俊,等. 基于改进微分零交叉法的米氏散射激光雷达云检测与参数反演 [J]. 光学学报, 2010, 30(11): 3097-3102.
- [15] David P D, James D S, Edwin W E. Atmospheric multiple scattering effects on GLAS altimetry-part I: Calculations of single pulse bias [J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 1999, 39(1): 92-101.
- [16] Mahesh A, Spinhirne J D, Duda D P, et al. Atmospheric multiple scattering effects on GLAS altimetry-part II: Analysis of expected errors in Antarctic altitude measurements [J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2002, 40(11): 2353-2362.

- [17] Liu Jinhuan. Optical transform of Gaussian beam [J]. *Optics and Precision Engineering*, 1994, 2(3): 15–21. (in Chinese)
刘金环. 高斯光束的光学变换[J]. 光学精密工程, 1994, 2(3): 15–21.
- [18] He Junfeng, Liu Wenqing, Zhang Yujun, et al. New method of lidar ceilometer backscatter signal processing based on Hilbert-Huang transform [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(2): 397–403. (in Chinese)
何俊峰, 刘文清, 张玉钧, 等. HHT 在激光云高仪后向散射信号处理中的应用 [J]. 红外与激光工程, 2012, 41(2): 397–403.
- [19] Zhang Gaixia, Zhang Yinchao, Hu Shunxing. Slant measurements of atmospheric boundary layer aerosol with mobile lidar [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(8): 1015–1019. (in Chinese)
张改霞, 张寅超, 胡顺星. 车载测污激光雷达对大气边界层气溶胶的斜程探测[J]. 光学学报, 2004, 24(8): 1015–1019.
- [20] Yang Yanjie. Analysis of atmospheric impact of 1.064 μm laser on air transmission [J]. *Science & Technology Information*, 2018(3): 56–57. (in Chinese)
杨彦杰. 1.064 μm 激光在对空传输中的大气影响分析[J]. 科技资讯, 2018(3): 56–57.
- [21] Bugaichuk S A, Khizhnyak A I. Steady state and dynamic gratings in photorefractive four-wave mixing [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 1998, 15(7): 2107–2113.
- [22] Fernald F G. Analysis of atmospheric lidar observations: some comments[J]. *Applied Optics*, 1984, 23(5): 000652.
- [23] Yuan Song, Xin Yu, Zhou Jun. Lidar observations of the lower atmosphere in Hefei [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2005, 29(3): 387–395. (in Chinese)
袁松, 辛雨, 周军. 合肥市郊低层大气的激光雷达探测研究[J]. 大气科学, 2005, 29(3): 387–395.
- [24] Kovalev V A, William E E. Elastic Lidar Theory Practice & Analysis Methods[M]. US: Wiley-Interscience, 2004.
- [25] Xiong Xinglong, Li Meng, Jiang Lihui, et al. The study of the lidar ratio retrieval method with multiple scattering cirrus cloud [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2014, 25(6): 1158–1164. (in Chinese)
熊兴隆, 李猛, 蒋立辉, 等. 多次散射的卷云激光雷达比反演方法研究[J]. 光电子·激光, 2014, 25(6): 1158–1164.
- [26] Ansmann A, Wandinger U. Independent measurement of extinction and backscatter profiles in cirrus clouds by using a combined Raman elastic-backscatter lidar[J]. *Applied Optics*, 1992, 31(33): 007113.
- [27] Wang Xiangchuan, Rao Ruizhong. Lidar ratios for atmospheric aerosol and cloud particles [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2005, 32(10): 1321–1324. (in Chinese)
王向川, 饶瑞中. 大气气溶胶和云雾粒子的激光雷达比 [J]. 中国激光, 2005, 32(10): 1321–1324.
- [28] Ephraim Zehavi. 8-PSK trellis codes for a Rayleigh channel [J]. *IEEE Trans Commun*, 1992, 40(5): 873–884.
- [29] Liu Zhao. Research on boundary layer height detection based on CALIPSO spaceborne lidar [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences), 2017. (in Chinese)
刘诏. 基于 CALIPSO 星载激光雷达的边界层高度探测研究[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院遥感与数字地球研究所), 2017.
- [30] Smirnov A, Holben B N, Eck T F, et al. Cloud-screening and quality control algorithms for the AERONET database[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2000, 73(3): 337–349.
- [31] Li Jiaheng, Liu Houfeng, Zhao Danting. MODIS based aerosol optical thickness inversion algorithm and its application progress [J]. *Green Technology*, 2012(2): 108–111. (in Chinese)
李加恒, 刘厚凤, 赵丹婷. 基于 MODIS 的气溶胶光学厚度反演算法及应用进展[J]. 绿色科技, 2012(2): 108–111.
- [32] Cheng Chen. Monte Carlo simulations of radiative transfer for space-borne lidar [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2018. (in Chinese)
程晨. 星载激光雷达辐射传输蒙特卡罗模拟[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2018.