

卫星激光大气遥感数据反演探讨

马 超, 廖 鹤, 周文龙, 李文峰

(上海卫星工程研究所, 上海 200240)

摘 要: 卫星激光遥感是继红外、可见和微波之后的一种新型主动探测手段, 其数据反演是卫星应用的关键技术和重要环节。卫星激光大气遥感主要有气体成分浓度、气溶胶/云垂直廓线和三维风场等三个应用方向。针对大气 CO₂ 和气溶胶/云等要素, 分别介绍了天基激光差分吸收和后向散射探测原理, 探讨了 CO₂ 反演 bottom-up 算法和气溶胶/云反演层次查找分类算法流程。此外, 设计了卫星遥感分级数据产品并给出了反演算法地基和机载验证途径。该研究可服务于激光大气遥感卫星的顶层设计。

关键词: 卫星; 星载激光雷达; 大气遥感; 反演算法

中图分类号: V474.6; V412.4 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2014)S-0013-05

Discussion on retrieval of satellite atmospheric remote sensing by spaceborne lidar

Ma Chao, Liao He, Zhou Wenlong, Li Wenfeng

(Shanghai Institute of Satellite Engineering, Shanghai 200240, China)

Abstract: Satellite atmospheric remote sensing by spaceborne lidar is a new type of active detection means after infrared, visible and microwave methods and data retrieval is the key technology of satellite applications. The measurement of atmosphere gas concentration, aerosol/cloud profile and three-dimensional wind is main application field of spaceborne lidar remote sensing. For atmospheric CO₂ and aerosol/cloud, the space-based laser differential absorption and backscatter detection principle were introduced and the CO₂ bottom-up inversion algorithm and aerosol/cloud level lookup and classification inversion algorithm were also explored. In addition, the ground and airborne verification means for satellite remote sensing data products were provided. This work can aid for top-level design of satellite.

Key words: satellite; spaceborne lidar; atmospheric remote sensing; retrieval algorithm

收稿日期: 2014-10-11; 修订日期: 2014-11-13

基金项目: 国家自然科学基金(11302132)

作者简介: 马超(1985-), 男, 工程师, 硕士, 主要研究方向为航天任务分析及总体设计。Email: machaonj@126.com

0 引言

卫星激光遥感是继红外、可见和微波之后的一种新型探测手段,其不受太阳光照条件限制,能够对大气温室气体、气溶胶/云、风场、植被和冰盖等多种要素实现全天时、高精度测量,获取宏观、连续、精细的地理空间信息,是今后对地观测领域的重要发展方向。目前,美国已经发射了激光遥感卫星 CALIPSO,且 NASA 与 ESA 已规划了多颗后续激光遥感卫星^[1-6],国内也正在开展此类卫星的预先研究^[7-8]。卫星激光大气遥感主要有三种测量体制和应用方向,分别为差分吸收测量气体浓度、后向散射测量气溶胶/云垂直廓线、多普勒频移测量风场廓线。文中主要对大气 CO₂、气溶胶/云卫星激光遥感反演方法进行探索,为今后卫星的应用做好铺垫。

1 卫星激光大气 CO₂ 遥感反演

1.1 基本原理

卫星激光大气 CO₂ 遥感采用积分路径差分吸收方法。星载差分吸收激光雷达向地面发射间隔很短(约 200 μs)的、波长为 λ_{on} 和 λ_{off} 的两个激光脉冲,如图 1 所示,其中 λ_{on} 的波长处于 CO₂ 气体分子强吸收谱线,该光束在大气介质中传输时受到 CO₂ 气体分子的强烈吸收而衰减,于是根据激光被吸收的程度便可确定大气中 CO₂ 气体分子的浓度。同时,为了减小大气中其他气体分子和气溶胶的干扰以及仪器参数等对探测精度的影响,选取另一波长 λ_{off} 对其进行校正,该波长处于 CO₂ 弱吸收谱线,略偏离于 λ_{on}。

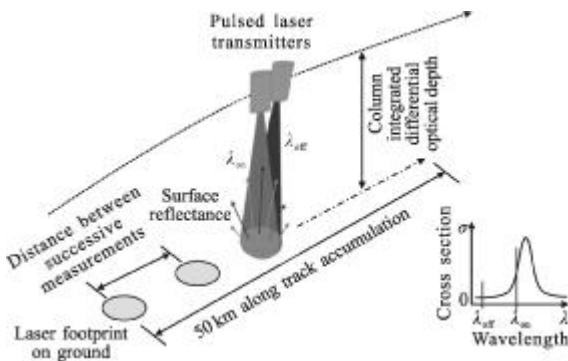


图 1 星载积分路径差分吸收(IPDA)激光雷达探测原理图
Fig.1 Spaceborne integration path differential absorption (IPDA) lidar schematics

1.2 反演算法流程

卫星激光大气 CO₂ 遥感反演的目标是为了得到 1 ppm(1 ppm=10⁻⁶)精度的加权平均体积混合比 XCO₂,其表达式为:

$$XCO_2 = \frac{DAOA_{CO_2}}{\int_{p=0}^{p_{sc}} WF_{CO_2}(p, T) \cdot dp} \quad (1)$$

$$DAOD_{CO_2} = \frac{1}{2} \ln \frac{P_r(\lambda_{off})P_t(\lambda_{on})}{P_r(\lambda_{on})P_t(\lambda_{off})} \quad (2)$$

$$WF_{CO_2}(p, T) = \frac{\Delta\sigma_{CO_2}(p, T)}{g \cdot (m_{dry-air} + m_{H_2O}) \cdot VMR_{H_2O}} \quad (3)$$

XCO₂ 可以分解为差分吸收光学厚度 DAOD 和加权函数 WF 两个核心参数,这两个核心参数可以继续往下分解成脉冲能量、频率稳定性、光谱纯度、口径、温度、湿度、压强等众多执行参数。通过这个自顶向下(top-down)的过程便将卫星系统顶层指标(1 ppm XCO₂)分解到各个可控单元,从而对数据源(传感器、模型和数据库等)提出技术要求。

数据反演与上述指标分解过程相反,是个自底向上(bottom-up)的过程,反演流程如图 2 所示。数据反演的关键是控制差分吸收光学厚度 DAOD 和加权函数 WF 这两个核心参数的精度,对可能引入的误差进行校正。

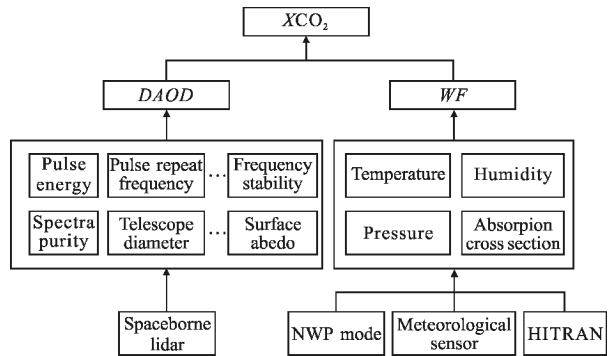


图 2 卫星激光 CO₂ 遥感反演流程

Fig.2 Retrieval process of atmospheric CO₂ remote sensing by spaceborne lidar

(1) DAOD 测量及误差校正

差分吸收光学厚度 DAOD 通过星载差分吸收激光雷达测得。由于对 CO₂ 的吸收强度不同,探测器接收到的两激光束的反射回波就有区别。对于 λ_{on} 和 λ_{off} 两个波长激光雷达探测回波功率方程分别为:

$$P_r(\lambda_{on}) = \rho \cdot \eta \cdot A \cdot R^{-2} \cdot P_t(\lambda_{on}) \cdot \Delta t_{eff}^{-1} \cdot \exp[-2(OD_0 + OD_{CO_2}(\lambda_{on}))] \quad (4)$$

$$P_r(\lambda_{off}) = \rho \cdot \eta \cdot A \cdot R^{-2} \cdot P_t(\lambda_{off}) \cdot \Delta t_{eff}^{-1} \cdot \exp[-2(OD_0 + OD_{CO_2}(\lambda_{off}))] \quad (5)$$

公式(4)、(5)相除并取对数,即得到差分吸收光学厚度:

$$DAOD_{CO_2} = OD_{CO_2}(\lambda_{on}) - OD_{CO_2}(\lambda_{off}) = \frac{1}{2} \ln \frac{P_r(\lambda_{off})P_t(\lambda_{on})}{P_r(\lambda_{on})P_t(\lambda_{off})} \quad (6)$$

差分吸收光学厚度的精度主要与高程误差、多普勒频移误差、气溶胶/云干扰和信噪比等有关。对于高程误差和气溶胶/云干扰,主要利用激光雷达自身的高程和气溶胶探测数据来校正;多普勒频移校正需要知道激光雷达光轴的精确指向,可通过激光雷达光学基准板与星敏的关联实现高精度指向测量;信噪比可通过增大激光雷达功率口径积来提高。

(2) WF 确定

根据权重函数 WF 的表达式可知,其是温度、湿度和压强的函数,需要输入上述气象参数,并借助分子吸收光谱数据库 HITRAN 计算吸收截面得到。吸收截面的准确性可以通过 CO₂ 吸收池测量实验来验证。温湿压气象参数一方面可以通过大气模式(如 ECMWF)或数值天气预报模型(NWP)获取,另一方面可以在卫星上搭载相应的探测仪器实时测量。

1.3 分级数据产品

卫星激光大气 CO₂ 遥感数据分为以下三级:(1) Level 0 级 激光雷达原始测量数据;(2) Level 1A 级 L0 级数据和卫星平台数据(高度、速度、姿态和时间等);Level 1B 级 标定好的激光雷达探测数据、差分吸收光学厚度、散射体高度、时间、经纬度地理信息数据;(3) Level 2 级 全球二氧化碳混合比 XCO₂,如图 3 所示。

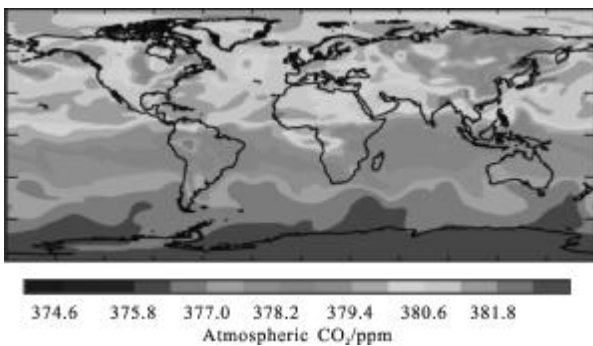


图 3 全球 CO₂ 浓度(XCO₂)卫星激光遥感效果图

Fig.3 Global CO₂ concentration(XCO₂) remote sensing map by spaceborne lidar

2 卫星激光大气气溶胶/云遥感反演

2.1 基本原理

气溶胶/云探测采用的是双波长后向散射和偏振接收方法。激光雷达向大气发射一束具有一定功率密度的激光束,气溶胶粒子对激光的产生散射作用,在接收的大气后向散射回波信号中含有这些物理作用的信息,对回波信号进行处理,便可以反演出气溶胶粒子的特性,如图 4 所示。

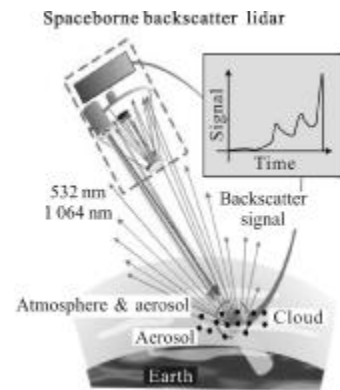


图 4 星载后向散射激光雷达探测原理图

Fig.4 Schematic of spaceborne backscatter lidar detection principle

2.2 反演算法流程

气溶胶/云探测星载激光雷达回波信号廓线中包括多种层次特征,其数据反演首先要进行层次查找,给出层次的位置和厚度;然后再开展场景分类,判断层次的类型,将气溶胶层和云层区分出来;最后进行层次消光特性反演,整个反演流程如图 5 所示。

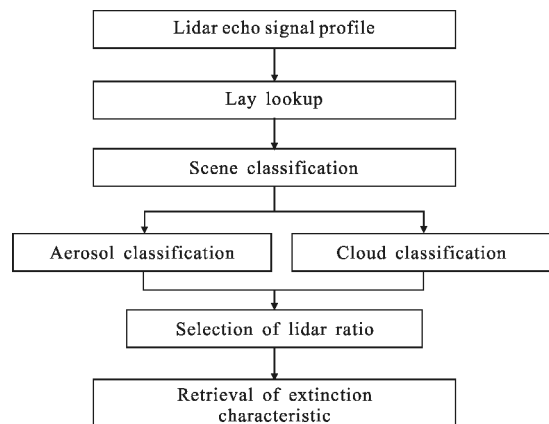


图 5 气溶胶/云激光遥感反演流程

Fig.5 Retrieval process of atmospheric aerosol/cloud remote sensing by spaceborne lidar

(1) 层次查找

层次查找的目的是为了给出层次的位置和厚度。星载激光雷达常用的层次边界探测方法是基于衰减散射比的阈值法，其定义为总的后向衰减散射数据与清洁大气后向散射衰减数据之比，判定方法为：判断回波信号强度高于清洁大气信号强度且超过所设定阈值信号时所对应的海拔高度。星载激光雷达层次查找算法分为两步，首先是廓线扫描，其次是弱层次查找，其中廓线扫描采用的就是基于衰减散射比的阈值法，而弱层次查找则采用选择性迭代边界定位法。图 6 为仿真的衰减散射比信号廓线，图 7 为利用该信号廓线进行层次查找的结果。

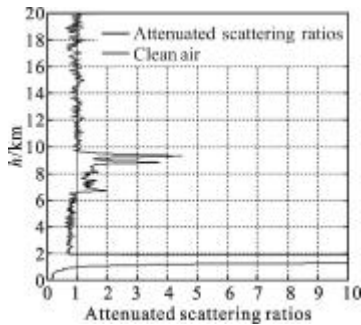


图 6 衰减散射比信号廓线

Fig.6 Attenuation backscatter signal profile

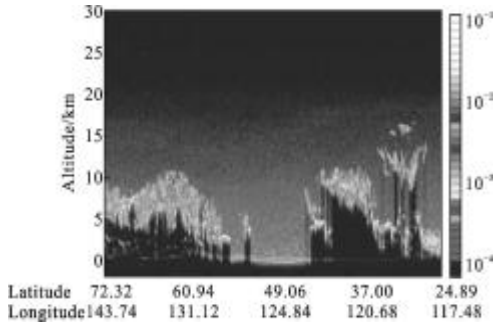


图 7 层次查找结果

Fig.7 Result of layer lookup

(2) 场景分类

在完成层次查找之后，需要对层次的种类进行研究，即场景分类。场景分类算法主要包括三部分，首先是气溶胶层和云层的区分，其次是气溶胶类型的细分，最后是云相态(冰云、水云)的区分。通常情况下，云具有较大的双波长信号比和后向散射信号；而对于气溶胶来说，除了沙尘气溶胶和海洋气溶胶

外，双波长信号比和后向散射信号都较低。故选用 532 nm 后向衰减散射数据与双波长信号比对云和气溶胶进行区分，分类结果如图 8 所示。冰云的冰晶引起的线偏振激光的退偏振比为 30%~50%，而水云的液滴会保持入射光的偏振性，所以可利用退偏振比来区分冰云和水云，分类结果如图 9 所示。

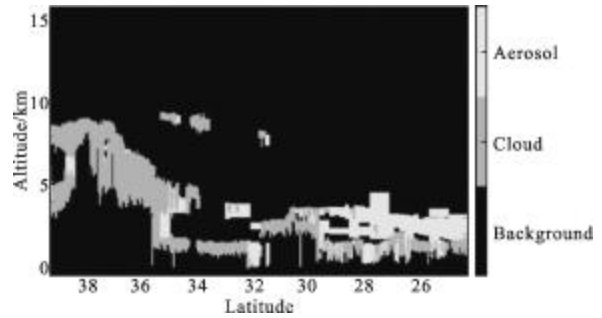


图 8 气溶胶层和云层分类结果

Fig.8 Result of aerosol and cloud classification

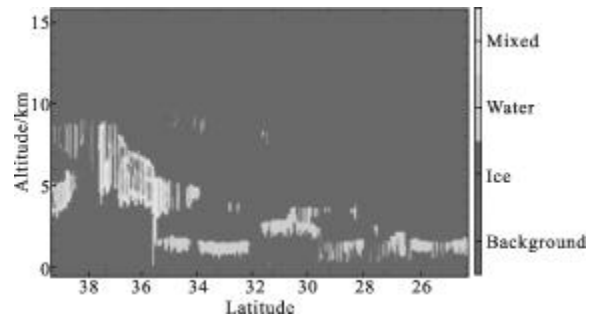


图 9 冰云和水云分类结果

Fig.9 Result of ice cloud and water cloud classification

(3) 消光特性反演

星载后向散射激光雷达全球大气气溶胶和云探测的目标是获得其垂直消光系数廓线和后向散射系数廓线，最常用的是 Fernald 反演方法。Fernald 方法需要假设激光雷达比，即消光系数与后向散射系数之比，而激光雷达比与粒子的形状和种类有关，随着空间地域等有较大变化，所以准确确定激光雷达比是反演的关键。可针对大气气溶胶和云的不同种类，依据全球范围内太阳辐射计观测资料计算不同类型气溶胶和云的激光雷达比，形成数据库和查找表，利用 Fernald 方法计算垂直消光系数和后向散射系数，其表达式如下：

$$\alpha_a(z) = -\frac{S_a}{S_m} \alpha_m(z) + \frac{z^2 P(z) \cdot \exp\left[2\left(\frac{S_a}{S_m} - 1\right) \int_z^z \alpha_m(z') dz'\right]}{\frac{z_c^2 P(z_c)}{\alpha_a(z_c) + \frac{S_a}{S_m} \alpha_m(z_c)} + 2S_a \int_z^z z' P(z') \exp\left[2\left(\frac{S_a}{S_m} - 1\right) \int_z^z \alpha_m(z'') dz''\right] dz'} \quad (7)$$

$$\beta_a(z) = -\beta_m(z) + \frac{z^2 P(z) \cdot \exp\left[2(s_a - s_m) \int_z^{z_c} \beta_m(z') dz'\right]}{\frac{z_c^2 P(z_c)}{\beta_a(z_c) + \beta_m(z_c)} + 2s_a \int_z^{z_c} z'^2 P(z') \exp\left[2(s_a - s_m) \int_z^{z_c} \beta_m(z'') dz''\right] dz'} \quad (8)$$

式中: $z_c=34$ km 为标定高度, 因为该高度为清洁大气; $s_m=8\pi/3$ 为空气分子的消光后向散射比; s_a 即为需要假设的激光雷达比。

2.3 分级数据产品

卫星激光大气气溶胶/云遥感数据分为以下三级:

(1) Level 0 激光雷达原始探测数据;(2) Level 1A Level 0 数据和卫星平台数据; Level 1B 经过地理校正、仪器及人工因素校正后的重组数据;(3) Level 2 全球气溶胶/云垂直廓线数据。

3 卫星激光大气遥感反演算法验证

目前,卫星激光大气遥感反演算法尚不成熟,其准确性需要经过大量数据的验证,不断改进,方可投入业务化应用。

(1) 地基验证

目前国内的地基激光雷达监测站点以遍及各地,组成了一个观测网,且地基激光遥感算法已十分成熟。为验证卫星遥感反演算法精度,可选择卫星过境前后的测量数据与地基激光雷达站点监测数据进行对比,对二者作统计回归分析,计算相关系数 R_2 。若相关性高则认为算法满足精度要求,否则需要对算法进行改进。

(2) 机载验证

受自然条件限制,难以在广阔的海洋和条件恶劣的沙漠、高原地区布置地基激光雷达。对于这些区域的卫星遥感数据,可通过与机载激光雷达观测数据进行对比来验证。值得注意的是,要考虑机载激光雷达性能和观测气象条件与卫星观测的一致性,确保二者数据的可比性。为保证激光雷达性能的一致,机载激光雷达可以采用星载激光雷达的缩比模型;为保证气象环境的一致,设计飞机的飞行路线尽可能沿着卫星地面轨迹。

4 结束语

文中对卫星激光大气 CO_2 、气溶胶/云遥感反演方法进行了探索。首先介绍了 CO_2 测量的差分吸收

原理和气溶胶/云测量的后向散射原理,然后具体讨论了 CO_2 反演 bottom-up 算法和气溶胶/云反演层次查找分类算法流程。另外,设计了卫星遥感分级数据产品并给出了反演算法地基和机载验证途径。目前,卫星激光大气遥感反演研究刚刚起步,其模型算法尚不成熟,还有许多问题需要深入研究。

参考文献:

- [1] Ingmann P, Bensi P, Durand Y, et al. ESA SP -1313/1 candidate earth explorer core missions-reports for assessment: A -SCOPE -Advanced space carbon and climate observation of planet earth [R]. Noordwijk: ESA Communication Production Office, 2008: 120.
- [2] Ehret G, Kiemle C, Wirth M, et al. Spaceborne remote sensing of CO_2 , CH_4 , and N_2O by integrated path differential absorption lidar: a sensitivity analysis[J]. Applied Physics B: Lasers and Optics, 2008, 90: 593-608.
- [3] Winker D M, Pelon J R, McCormick M P. The CALIPSO mission: spaceborne lidar for observation of aerosols and cloud[C]//SPIE, 2003, 4893: 1-11.
- [4] Abshire J B, Riris H, Allan G R, et al. Pulsed airborne lidar measurements of atmospheric CO_2 column absorption [J]. Tellus B, 2010, 62(5): 770-783.
- [5] ESA, Earth CARE Report for Assessment[R]. ESA SP -1257 (1), 2001.
- [6] Yu A, Stephen M, Li S, et al. Space laser transmitter development for ICESat -2 mission [C]//SPIE, 2010, 7578: 757809-2.
- [7] Zhu Mengzhen, Cheng Yong, Tan Chaoyong, et al. Development of foreign spaceborne laser [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(12): 3241-3248. (in Chinese) 朱孟真, 程勇, 谭朝勇, 等. 国外空间激光的发展现状[J]. 红外与激光工程, 2013, 41(12): 3241-3248.
- [8] Song Xueping, Jia Xiaodeng, Qin Yifan, et al. Experiment research on laser backscattering characteristic of fog [J]. Infrared and Laser Engineering, 2010, 139 (2): 260-265. (in Chinese) 宋雪平, 贾晓东, 覃一凡, 等. 云雾对激光后向散射特性试验研究[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(2): 260-265.