星载激光雷达 CALIOP 数据处理算法概述

刘 东,刘 群,白 剑,张与鹏

(浙江大学 光电科学与工程学院 现代光学仪器国家重点实验室,浙江 杭州 310027)

摘 要:CALIOP 是首个能观测全球大气状态的星载偏振激光雷达,自 2006 年发射以来,为研究全球气候和环境变化提供了大量的第一手数据资料,在大气遥感领域具有重要的现实意义。文中系统介绍了星载激光雷达 CALIOP 的功能结构、数据产品以及数据处理过程。重点介绍了 CALIOP 的层次识别、场景分类和消光反演的算法原理和流程。

关键词:星载激光雷达 CALIOP; 数据产品; 层次识别; 场景分类; 消光反演

中图分类号:TN958.98 **文献标志码**:A DOI:10.3788/IRLA201746.1202001

Data processing algorithms of the space-borne lidar CALIOP: a review

Liu Dong, Liu Qun, Bai Jian, Zhang Yupeng

(State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, College of Optical Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: As the first space-borne polarization lidar to observe the state of the global atmosphere, CALIOP has provided large number of first-hand data on global climate and environmental changes since being launched in 2006. It has been proved to be a promising tool in the field of atmosphere remote sensing. In this paper, the functional structure, data products, and data processing of CALIOP were introduced. Moreover, the principles and processes of layer detection, scene classification and extinction retrieval were also especially emphasized.

Key words: spaceborne lidar CALIOP; data products; layer detection; scene classification; extinction retrieval

0 引 言

大气中的云和气溶胶在地球气候变化中扮演着重要角色。气溶胶粒子和云粒子通过对太阳光的吸收和散射作用,影响地球大气系统的辐射收支和循环模式,进而影响全球的气温和降水,使人类赖以生存的大气环境产生变化[1]。研究云和气溶胶的物理特性、空间分布、相互作用以及辐射效应对研究全球气候模式、预测未来的气候变化有着重要意义。星载激光雷达作为大气遥感主动探测的有效工具,克服了地基激光雷达遥感范围受限和被动遥感受制于太阳辐射而无法在夜晚工作的不足,能够实现对全球区域范围内的云和气溶胶进行长时间的连续观测。激光雷达是目前唯一可以获得高分辨率气溶胶廓线的仪器,相比于

收稿日期:2017-08-05; **修订日期**:2017-11-27

基金项目:国家重点研发计划(2016YFC0200700,2016YFC1400902,2016YFC400905);国家自然科学基金(41775023,61475141);中央高校基本科研业务费专项资金(2017QNA5001);现代光学仪器国家重点实验室创新项目(MOI2017MS01);浙江省公益技术研究项目(2016C33004)

作者简介:刘东(1982-),男,副教授,博士生导师,博士,主要从事光学传感与信息处理技术方面的研究。Email:liudongopt@zju.edu.cn

被动遥感,星载激光雷达可以观测到高反射地面或高反射云层上的气溶胶,可以探测多层结构云和光学厚度极薄的云,可以利用后向散射信号的偏振特性对云的热力相态进行区分。星载激光雷达近年来受到了国内外航天及气象领域的广泛关注。

2006 年 4 月 28 日, 由美国国家航天局 (NASA) 与法国国家航天中心(CNES)合作研制的云-气溶胶激光雷达和红外探测者卫星 (Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations,CALIPSO)成功发射。CALIPSO 为人类认识云和气溶胶在调节地球天气、气候和空气质量中所起的作用提供了新的视角。CALIPSO 的有效载荷由三个共线的对地观测仪器组成,分别是正交偏振云和气溶胶激光雷达(Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization,CALIOP)、红外成像辐射计 (Imaging Infrared Radiometer,IIR)和宽视场相机 (Wide Field Camera,WFC)。作为 CALIPSO 卫星上的重要载荷, 迄今为止 CALIOP 已经准连续观测了十多年,为研究全球气候和环境变化提供了大量的第一手数据资料[2] 。数据公布以来,被广泛地应用在气候变化、环境变化、天气过程和数值模式同化等多个科学领域[3],创造了巨大的经济和社会价值。但作为目前首个能观测全球大气的星载偏振激光雷达[3],其数据反演过程繁琐、算法复杂度高,为数据产品的精细化开发和分析带来不便。另外鉴于激光雷达的种种优势,欧美等国家都计划在最近几年发射新的星载激光雷达[4-5]。中国也启动了星载激光雷达的研发计划, 预计在 2019 年左右择机发射自主知识产权的星载激光雷达[6]。对星载激光雷达数据处理算法的研究势在必行。文中详细介绍了星载激光雷达 CALIOP 的系统结构、数据产品和反演算法,旨在为我国星载激光雷达的数据产品开发打下基础,为预测全球气候变化提供详尽的依据。

1 CALIOP 系统及数据产品

CALIPSO 卫星运行在距离地面 705 km 的太阳同步轨道上,轨道倾角为 98.2°,这保证了 CALIPSO 的纬度覆盖范围在 82°N-82°S 之间。CALIOP 是 CALIPSO 卫星上的主要载荷,是第一个可以测量全球大气状态的星载偏振激光雷达。图 1 为 CALIOP 发射和接收系统的框图。CALIOP 的发射系统采用了 Nd:YAG 激光器, 通过倍频技术输出 532 nm 和 1 064 nm 的脉冲激光,单脉冲能量均为 110 mJ,脉宽 20 ns, 脉冲重复频率为 20.16 Hz, 激光的发散角为 0.1 mrad[7]。

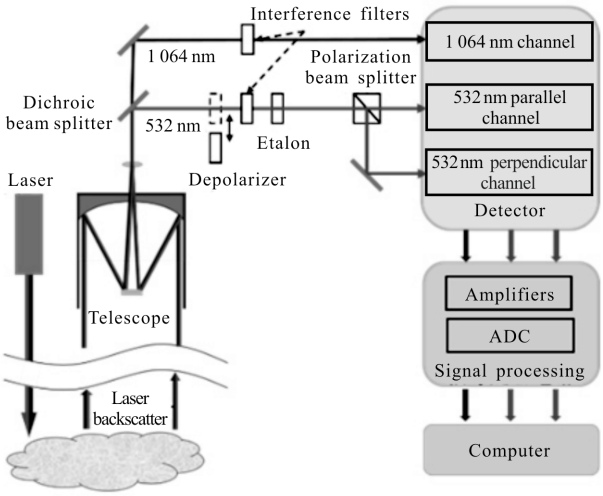

图 1 CALIOP 系统框图

Fig.1 Block diagram of the CALIOP instrument

CALIOP 的接收系统采用直径为1 m 的卡塞格林望远镜[8-9],其视场角为 0.13 mrad,覆盖了整个发射系统的视场范围。望远镜接收的回波信号经准直透镜和二色分光镜后分成波长为 532 nm 和 1 064 nm 的两路信号。光路中干涉滤光片和标准具的作用是为了减小太阳背景光的影响, 偏振分光镜信号分成偏振方向相互垂直的两路。三路信号分别到达探测器和信号处理系统。

由于 CALIOP 需要既能探测到平流层内清洁大气的弱信号,又能探测到对流层内云的强信号,其探测器的动态范围往往非常大,覆盖了大气分子、气溶胶和云后向散射信号 5 个数量级的变化。考虑到动态范围、暗电流和量子效率等因素,532 nm 通道利用光电倍增管 PMT 作为探测器,1 064 nm 通道则利用雪崩光电二极管 APD 作为探测器。每个通道中有两个 14 位的数字转换器,保证了 22 位的动态范围。CALIOP 数据的原始分辨率为垂直 15 m,水平 333 m;分别由接收装置的采样频率和卫星的移动速度、激光的脉冲频率决定[8]。为了压缩下传数据量,同时满足大气研究对数据空间分辨率的需求,CALIOP 在星上进行了简要的数据预处理,对不同海拔高度采取了不同的空间分辨率。各高度区间的具体分辨率见表 1[7-8]。

表 1 CALIOP 数据不同高度区间的空间分辨率及廓线特性

Tab.1 CALIOP data spatial resolution and profile properties at different height interval

Altitude region/km		Horizontal resolution/km	Vertical resolution/m		Profiles per 5 km
Base	Top		532 nm	1 064 nm	
-2.0	-0.5	1/3	300	300	15
-0.5	8.2	1/3	30	60	15
8.2	20.2	1	60	60	5
20.2	30.1	5/3	180	180	3
30.1	40.0	5	300	-	1

目前 CALIOP 的公开数据分为一级(Level 1)、二级(Level 2)和三级(Level 3)产品。Level 1 产品是经过校准和距离平方校正的衰减后向散射廓线数据。Level 2 产品为 Level 1 的反演结果,主要包括云和气溶胶廓线产品(Profile)、层产品(Layer)和类型产品(VFM),这些产品充分反映了大气的状态、组成和结构等信息,在实际研究中具有广泛用途。Level 3 产品是在 Level 2 的基础上对云和气溶胶的时空分布特性进行统计分析得到的月平均产品。在 CALIOP 的三级数据产品中,其中 Level 2 产品的内容最丰富,其数据处理算法也最复杂。

2 Level 1 数据处理算法

Level 1 数据处理包括三维地理定位和校准两部分。

2.1 地理定位

CALIOP 廓线的地理位置是由卫星的倾角和轨道决定的。CALIPSO 卫星的倾角不是一成不变的,为了观测的需要会调整倾角,倾角的范围从 1°~30°不等。CALIPSO 卫星的运行轨道接近圆形,但由于地球是一个椭圆,所以南北两极比赤道地区距离卫星更远。CALIPSO 卫星围绕地球运行的过程中,其与地球表面的距离变化高达 22 m/s[10],为了保证 30 m 的垂向分辨率,需要对数据采集时间进行调整。载荷控制器根据卫星的 GPS 数据实时调整距离门控来保证每条廓线相对海平面的高度一致[8]。CALIPSO 地理定位的准确度大概为水平方向 50 m,垂直方向 10 m。经过地理定位的数据为 Level 1A 产品,作为校准的输入数据。

2.2 数据校准

CALIOP level 1A 信号经过校准后产生 level 1B 产品,level 1B 产品包括 532 nm 通道、532 nm 垂直通道和 1 064 nm 通道的衰减后向散射廓线。CALIOP 激光雷达的回波信号方程为:

$$\mathbf{P}(z)=(\mathbf{P}_0\mathbf{G}_A\mathbf{C})\beta(z)\mathbf{T}^2(z)/z^2 \tag{1}$$

式中:$\mathbf{P}(z)$为距激光雷达距离 z 处的雷达回波信号;$\mathbf{P}_0$ 为激光的出射强度;$\mathbf{G}_A$ 为放大器增益系数;$\mathbf{C}$ 为校准系数。β 为后向散射系数,包括粒子后向散射 β_p 和大气分子后向散射 β_m 两部分:

$$\beta(z)=\beta_p(z)+\beta_m(z) \tag{2}$$

$\mathbf{T}^2$ 为双向透过率:

$$\mathbf{T}^2(z)=\exp[-2\int_0^z\alpha(r)dr] \tag{3}$$

式中:α 为消光系数,包含分子散射消光 α_m、粒子散射消光 α_p 和臭氧吸收 α_{O_3} 三部分:

$$\alpha(z)=\alpha_m(z)+\alpha_p(z)+\alpha_{O_3}(z) \tag{4}$$

$\beta'(z)=\beta(z)\mathbf{T}^2(z)$即为 NASA 官方发布的 level 1B 的衰减后向散射系数产品。

CALIOP 数据校准的目的就是为了求解校准系数 $\mathbf{C}$ 将雷达接收的回波信号转化为衰减后向散射系数[2],由公式(1)~(3)可知:

$$\mathbf{C}=\frac{z^2\mathbf{P}(z)}{\mathbf{P}_0\mathbf{G}_A\beta(z)\mathbf{T}^2(z)} \tag{5}$$

CALIOP 数据校准一共分为三步[11]:

(1) 532 nm 平行通道

CALIOP 采用高海拔分子归一化方法,校准信噪比较高的夜间 532 nm 平行通道信号。海拔较高的平流层大气内几乎没有气溶胶粒子,因此 CALIOP 根据全球建模与同化办公室 (Global Modeling and Assimilation Office,GMAO) 所提供的大气分子和臭氧数密度等辅助数据计算出 $\beta(z)$和 $\mathbf{T}^2(z)$[12]。将测量的雷达信号 $\mathbf{P}_{532,//}(z)$代入公式(5)即可得到夜间的校准系数 $\mathbf{C}_{532,//}$。CALIOP 版本 3 的数据是采用海拔 30~34 km 内的分子信号校正夜间数据的,但为了减轻平流层内火山气溶胶的影响[13],版本 4 将这一高度提升到了 36~39 km[14]。

由于太阳背景辐射的影响,日间数据的信噪比比较低,夜间的校正方法不再适用。CALIOP 对日间数据的校正是通过对比同纬度地区清洁大气散射比的昼夜差异来实现的。版本 3 中所选的清洁大气范围在海拔 8~12 km 之间[15],版本 4 中为了减小校正区域内的昼夜差异,选择了海拔 13~18 km 之间的清洁大气[13]。

(2) 532 nm 垂直通道

由于大气分子的退偏比小于 1%[11],30~40 km 的高度区间内垂直通道的信噪比较低，所以不能直接用分子信号校准。对该通道的校准是通过 $\mathbf{C}_{532,\perp}$ 和偏振增益比(PGR)实现的：

$$\mathbf{C}_{532,\perp}=\mathbf{C}_{532,//}\cdot \mathrm{PGR} \tag{6}$$

PGR 的测量方法为在 532 nm 接收光路中加入退偏器使两通道的光强相等[14],如图 1 中所示,两通道测量信号的比值即为偏振增益比。

(3) 1 064 nm 通道

海拔 30~40 km 高度区间内 1064 nm 通道的信号弱,信噪比低,无法用来校准,对该通道的校准是利用卷云信号实现的[12]。定义卷云的后向散射色比 χ_c 为：

$$\chi_c=\beta_{1064}(z)/\beta_{532}(z) \tag{7}$$

2010 年 Vaughan 等人证实卷云的色比为 1.01±0.25[15],CALIOP 通常取 1。

1064 nm 和 532 nm 通道的校正系数有以下关系：

$$\mathbf{F}=\mathbf{C}_{1064}/\mathbf{C}_{532}=\chi_c^{-1}(\mathbf{g}_{1064}/\mathbf{g}_{532}) \tag{8}$$

式中：$\mathbf{g}$ 为卷云的层次积分衰减后向散射系数；$\mathbf{g}_{1064}$ 和 $\mathbf{g}_{532}$ 可以直接通过两通道的回波信号计算得到。将 $\mathbf{C}_{532}$ 带入公式(8)就可以求出 1064 nm 通道的校准系数[16]。

为了保证校准的准确性,所使用的卷云数据必须符合校准的标准。CALIOP 前三个版本都是选取海拔高度在 8.2~17 km 之间、532 nm 衰减散射比连续 180 m 以上超过 50 的强后向散射卷云作为校准数据[16]。

另外,CALIOP 前三个版本都假设 $\mathbf{C}_{1064}$ 是昼夜连续不变的常数，并用一个数据块内所有满足校准条件的卷云计算平均校准系数，然后利用该平均校准系数来校准数据块内的所有廓线。但 Powell 等人[17]发现当卫星上雷达所处的环境温度发生改变时,$\mathbf{C}_{1064}$ 和 $\mathbf{C}_{532}$ 的变化并不一致，这体现在 $\mathbf{F}$ 会随环境的改变发生变化。尽管这一现象产生的原因还没有完全弄清,但 Vaughan 等人[16]通过统计方法发现 $\mathbf{F}$ 与季节、数据块的时长和 CALIOP 的运行时间有关,同一数据块内 $\mathbf{F}$ 值不为常数,因此在版本 4 的算法中,将 $\mathbf{F}$ 改为与时间 t 相关的函数[16],则 $\mathbf{C}_{1064}(t)=\mathbf{F}(t)\mathbf{C}_{532}(t)$,并采取多数据块平均的方法增加卷云样本数量。另外版本 4 中提高了卷云数据的筛选标准。将高度范围调整为与温度廓线、对流层顶高度,层次积分体退偏比阈值和层次中心高度,532 nm 积分衰减后向散射系数阈值相关的动态分配高度范围[16]。

图 2 为 CALIOP 发布的 2015 年 5 月 1 日夜晚 Level 1 数据产品中 532 nm 波段总的衰减后向散射信号时空分布图。

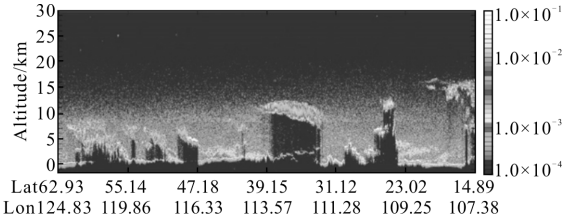

图 2 Level 1 532 nm 波段总的衰减后向散射信号

Fig.2 Level 1 532 nm total attenuation backscattering signal

3 Level 2 数据反演算法

CALIOP Level 2 数据反演算法主要来源于两个早期的星载激光雷达系统[2],分别是搭载在太空运输系统(STS)上的激光雷达太空技术实验仪(Lidar In-space Technology Experiment,LITE)[18] 和搭载在冰、云和陆地高程卫星 (Ice,Cloud,and land Elevation Satellite,ICESat) 上的地学激光测高系统(Geoscience Laser Altimeter System,GLAS)[19]。LITE 是首个可以观测云和气溶胶的卫星,但其动态范围很小,无法在一个通道内同时探测云和气溶胶；其在轨时间只有短短的 11 天，连续观测能力有限。GLAS 也可以获得大气的廓线信息,但其 532 nm 通道的动态范围较小,而 1 064 nm 通道的灵敏度也不如 CALIOP。并且这两个系统都没有偏振通道，无法辨别非球形的气溶胶粒子和云的不同相态。CALIOP 借鉴这些先驱系统的经验，提出了针对高动态范围偏振多通道结构的数据反演算法[2]。Level 2 数据反演算法共分为三个步骤：首先利用选择性迭代边界定位法(Selective Iterative Boundary Locator,SIBYL) 识别 532 nm 衰减后向散射信号中的层次特征；其次利用场景分类算法(Scene Classification Algorithms,SCA)和三通道数据区分层次类型；最后利用混合消光反演算法(Hybrid Extinction Retrievals Algorithm,HERA) 得到粒子的消光特性。CALIOP 首次利用这些算法得到了全球云、气溶胶的时空分布信息和云、气溶胶粒子微观特性等,具有很高的研究意义和参考价值。

3.1 层次识别

云、气溶胶层次的高度信息是 CALIOP 最基本的数据产品。精确反演云和气溶胶的物理光学特性首先要识别廓线中的云和气溶胶层次。SIBYL 算法

包括基于衰减散射比的单廓线扫描阈值法和弱层次查找两部分。由于粒子的后向散射强于分子,廓线中的层次定义为高于分子散射信号的部分。

3.1.1 基于衰减散射比的阈值法

廓线扫描采用基于衰减散射比的阈值法[20]。衰减散射比定义为:

$$\mathbf{R}'(\mathbf{z})=\beta'(\mathbf{z})/\beta'_{air}(\mathbf{z}) \tag{9}$$

式中:$\beta'_{air}(\mathbf{z})$为清洁大气的衰减后向散射系数:

$$\beta'_{air}(\mathbf{z})=\beta_{\mathbf{m}}(\mathbf{z})\cdot\mathbf{T}_{\mathbf{m}}^{2}(\mathbf{z})\cdot\mathbf{T}_{\mathbf{O}_3}^{2}(\mathbf{z}) \tag{10}$$

由公式(2)~(4)可知:

$$\beta'(\mathbf{z})=(\beta_{\mathbf{p}}(\mathbf{z})+\beta_{\mathbf{m}}(\mathbf{z}))\cdot\mathbf{T}_{\mathbf{p}}^{2}(\mathbf{z})\mathbf{T}_{\mathbf{m}}^{2}(\mathbf{z})\mathbf{T}_{\mathbf{O}_3}^{2}(\mathbf{z}) \tag{11}$$

衰减散射比可表示为:

$$\mathbf{R}'(\mathbf{z})=(1+\beta_{\mathbf{p}}(\mathbf{z})/\beta_{\mathbf{m}}(\mathbf{z}))\cdot\mathbf{T}_{\mathbf{p}}^{2}(\mathbf{z}) \tag{12}$$

清洁大气中 $\beta_{\mathbf{p}}(\mathbf{z})=0$,衰减散射比为定值。阈值法通过检测衰减散射比廓线中是否有连续的信号点大于清洁大气值,来判断层次的位置。

(1) 阈值序列的设定

由于星载激光雷达的信噪比比较低,单一的衰减散射比阈值不能较好地完成 0~30 km 范围内的层次查找。CALIOP 设置了随高度变化的阈值阵列。星载激光雷达的原始回波信号可以分为粒子、分子的后向散射信号和噪声信号两部分。噪声信号包括如探测器噪声和太阳背景噪声等不变噪声和信号量子噪声、热噪声等可变噪声[21]。

在设定初始阈值时,需要同时考虑不变噪声和可变噪声的影响。其中不变噪声不随海拔高度而变化,可用 30.1~40.0 km 清洁大气区域激光雷达衰减后向散射信号的标准偏差 **MBV** 来代表:

$$\mathbf{MBV}=\sqrt{\sum_{\mathbf{z}=30.1}^{\mathbf{z}=40.0}(\beta'(\mathbf{z})-\overline{\beta'})/(\mathbf{N}-1)} \tag{13}$$

可变噪声记为 **RBV**,假设分子后向散射信号服从泊松分布,则信噪比随信号的二分之一次方变化。记 $\mathbf{SNR}_{relative}$ 为与最高采样高度相关的相对信噪比:

$$\mathbf{SNR}_{relative}=\sqrt{\beta'_{air}(\mathbf{z})}/\sqrt{\beta'_{air}(\mathbf{z}_{max})} \tag{14}$$

则可变噪声可表示为:

$$\mathbf{RBV}(\mathbf{z})=\frac{\beta'_{air}(\mathbf{z})}{\mathbf{SNR}_{relative}(\mathbf{z})}=\sqrt{\beta'_{air}(\mathbf{z})\cdot\beta'_{air}(\mathbf{z}_{max})} \tag{15}$$

因此可得后向衰减散射系数的阈值为:

$$\beta'_{threshold}(\mathbf{z})=\beta'_{air}(\mathbf{z})+\mathbf{T}_0\cdot\mathbf{MBV}+\mathbf{T}_1\cdot\mathbf{RBV} \tag{16}$$

式中:$\mathbf{T}_0$ 和 $\mathbf{T}_1$ 均为经验值;$\mathbf{T}_0$ 的取值与海拔高度有关,不同海拔高度范围内 $\mathbf{T}_0$ 的取值如表 2 所示,一般情况下 $\mathbf{T}_1$ 的取值白天为 1.75,夜晚为 2.5[20]。则可得衰减散射比的阈值序列为:

$$\mathbf{R}'_{threshold}(\mathbf{z})=\frac{\beta'_{threshold}(\mathbf{z})}{\beta'_{air}(\mathbf{z})}=1+\frac{\mathbf{T}_0\cdot\mathrm{MBV}+\mathbf{T}_1\cdot\mathrm{RBV}}{\beta'_{air}(\mathbf{z})} \tag{17}$$

表 2 不同海拔高度范围内 T_0 的取值

Tab.2 Value of T_0 for different altitude region

Altitute range/km		T_0
Base	Top	
-2.0	-0.5	$\sqrt{15}$
-0.5	8.2	$5\sqrt{6}$
8.2	20.2	5
20.2	30.1	$\sqrt{5}$
30.1	40.0	1

(2) 阈值序列的更新[20]

初始阈值序列的计算只考虑了臭氧和大气分子的吸收散射作用,但由于高空层次对信号有很大的衰减作用,因此需要对上述阈值序列进行调整。为了更新阈值序列需要估算层次的双向透过率 $\mathbf{T}_{\mathbf{p}}^{2}$。在清洁大气条件下,假设粒子的双向透过率 $\mathbf{T}_{\mathbf{p}}^{2}=1$;当廓线从上向下扫描到第一个层次时,$\mathbf{T}_{\mathbf{p}}^{2}$ 小于 1。将已查找层次以下的最小清洁大气距离内回波信号的平均衰减散射比$\overline{\mathbf{R}'(\mathbf{z})}$作为层次的双向透过率。在层次下方的"清洁大气"区域内假定$\overline{\mathbf{R}'(\mathbf{z})}\approx\mathbf{T}'_{feature}$。当$\overline{\mathbf{R}'(\mathbf{z})}\geqslant1$或$\overline{\mathbf{R}'(\mathbf{z})}\leqslant0$ 时,阈值序列无需改动;当 $0<\overline{\mathbf{R}'(\mathbf{z})}<1$ 时,将阈值序列乘以$\overline{\mathbf{R}'(\mathbf{z})}$进行调整。继续查找下方的层次。由于星载激光雷达回波信号中随机噪声的影响很大,为了避免对层次的错误识别,CALIOP 引入了层次积分的衰减后向散射系数 γ':

$$\gamma'=\int_{top}^{base}\beta_{\mathbf{p}}(\mathbf{z})\cdot\mathbf{T}_{\mathbf{p}}^{2}(\mathbf{z})\mathrm{d}\mathbf{z} \tag{18}$$

在进行廓线扫描时,γ'可以通过估算得到,估算方法如下:

$$\mathrm{R}_{\mathbf{k}}=\beta_{\mathbf{m}}(\mathbf{z}_{\mathbf{k}})\cdot\mathbf{R}'(\mathbf{z}_{\mathbf{k}}) \tag{19}$$

$$\mathbf{g}=\frac{1}{2}\cdot\sum_{\mathbf{k}=\mathbf{top}+1}^{\mathbf{base}}(\mathbf{z}_{\mathbf{k}-1}-\mathbf{z}_{\mathbf{k}})(\mathrm{R}_{\mathbf{k}-1}+\mathrm{R}_{\mathbf{k}}) \tag{20}$$

$$\gamma'=\mathbf{g}-\left(\frac{1}{2}\cdot(\mathbf{z}_{top}-\mathbf{z}_{base})\cdot(\mathrm{R}_{top}+\mathrm{R}_{base})\right) \tag{21}$$

γ'与层次光学厚度 τ 和雷达比 $\mathbf{S}$ 的关系如下:

$$\gamma'=\left(\frac{1}{2\cdot\mathbf{S}}\right)\cdot(1-\exp(2\tau))=\left(\frac{1}{2\cdot\mathbf{S}}\right)\cdot(1-\mathbf{T}^2) \tag{22}$$

确定层底位置后，根据层次的位置选择合适的雷达比 **S** 可得：

$$\mathbf{T}^2 \approx 1-2\cdot\gamma'\cdot\mathbf{S} \tag{23}$$

最后选择$\overline{\mathbf{R}'(z)}$和 $\mathbf{T}^2$ 中较大的值，与原有的阈值序列相乘，完成对阈值的更新。单廓线层次识别的算法流程如图 3 所示。

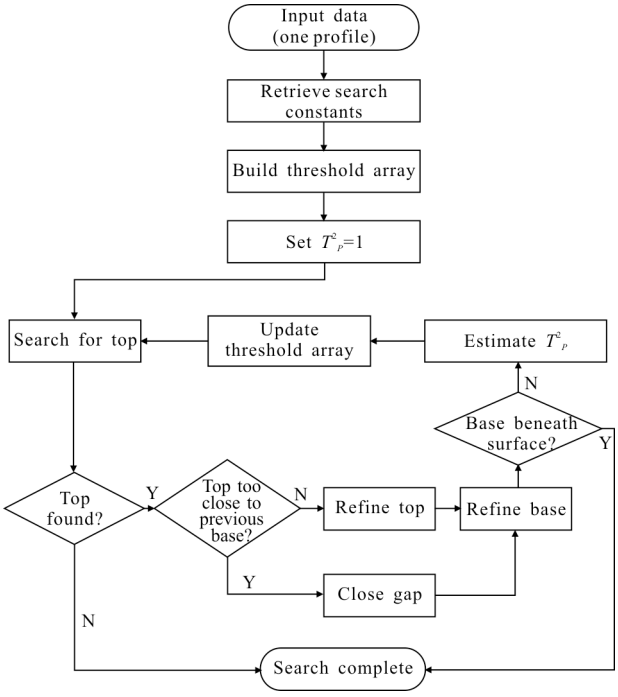

图 3 单廓线层次识别流程图

Fig.3 Single profile layer detection flowchart

3.1.2 弱层次查找

星载激光雷达的垂向探测距离覆盖了平流层和对流层内几十千米的范围，云和气溶胶的回波信号的强度相差几个数量级。通常积云和层云的强回波信号在单廓线内即可识别出来。但对于如卷云和气溶胶等较弱的层次需要进行多条廓线平均来提高信噪比，才能查找到层次的边界高度。为了尽可能多地识别各类层次，CALIOP 提出了选择性边界定位算法[22]。该算法定义水平 80 km(16 条 5 km 分辨率的廓线)为一个场景，通过多次重复地在不同分辨率下扫描同一场景进行层次识别。

SIBYL 的处理流程如图 4 所示，在高分辨率条件下首先查找到强回波信号的云层，然后利用清洁大气代替相应高度上的层次，并对层次下方的回波信号进行衰减校正。继续对廓线进行平均，降低分辨率，再识别弱信号层次。

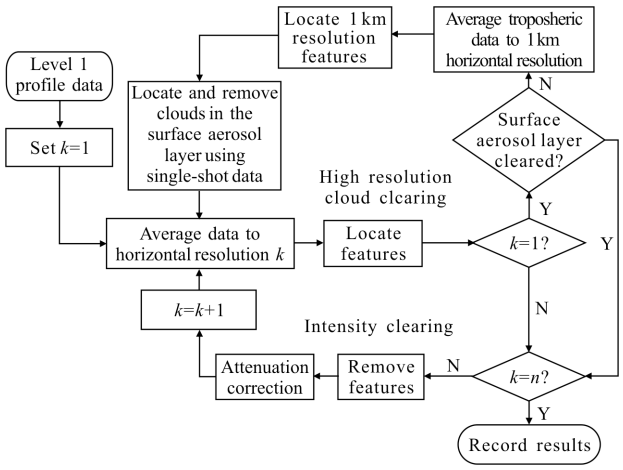

图 4 选择性边界定位算法流程

Fig.4 Flowchart of SIBYL

3.2 层次分类

CALIOP 层次分类的一个主要目的是为粒子光学特性反演选择合适的雷达比。层次分类所用的场景分类算法(SCA)基于气溶胶和云的不同光学和物理特征，区分云和气溶胶，并将云分为冰云和水云两类，将气溶胶分为沙尘气溶胶、烟尘气溶胶等六类[23-24]。

3.2.1 云和气溶胶的分类

云和气溶胶的分类 (Cloud and Aerosol Discrimination，CAD)是场景分类算法的第一步，对后续的分类和反演起着至关重要的作用。由于微小尺寸的云粒子容易混在边界层气溶胶内，为了避免气溶胶特性反演时受到云层的干扰，在 SIBYL 算法识别低层大气的层次时需要先将云层去除。边界层内云的后向散射要明显高于其周围的气溶胶，为了增强两者之间的对比，利用 1 064 nm 的后向散射系数识别边界层云。除此之外，其他层次的分类都由场景分类算法完成。

云和气溶胶的分类基于两者在光学特性和空间分布的统计差异，利用多维概率密度分布函数进行分类[24]。根据前期的观测样本模拟气溶胶和云不同特征属性的概率密度函数(PDF)，将层次的各属性值带入对应的概率密度分布函数中计算概率，并带入如公式(24)所示的置信函数 f，当 f 大于零时，分类结果为气溶胶，反之则为云。

$$f=(\mathbf{P}_{aerosol}-\mathbf{P}_{cloud})/(\mathbf{P}_{aerosol}+\mathbf{P}_{cloud}) \tag{24}$$

置信函数 f 是取值在-1~1 之间的归一化差分概率，CALIOP level 2 产品中的 CAD 值是百分率的 f，取值在-100~100 之间，CAD 的绝对值代表分类的可信度。

NASA 根据云、气溶胶光学特性软件 OPAC[25]的气溶胶特性模拟结果和 LITE 的观测数据得到，云的后向散射系数和色比都高于气溶胶，并且容易与边界

层气溶胶混合的云大多分布在气溶胶的上方[24]。因此,CALIOP 版本 2 产品中利用 532 nm 后向衰减散射系数 β_{532}'、积分衰减色比 $\chi'_{feature}$ 和层次中心高度等特征参数构成的三维概率密度函数区分云和气溶胶[26]。

$$\chi'_{feature}=\langle\beta'_{1064}\rangle/\langle\beta'_{532}\rangle \tag{25}$$

但由于在三维概率密度函数中，浓厚的沙尘和烟尘气溶胶容易与稀薄的云层混淆，单独用三维的 PDF 易造成误判[27]。CALIOP 版本 3 数据中,加入了层次的体退偏比 δ' 和纬度信息构成五维概率密度函数，可以有效地区分低纬度较浓厚的沙尘气溶胶和卷云;减少水平定向冰云和其他类型云的混合[27]。

对图 2 中 Level 1 数据的场景,按照上述层次识别和分类的流程进行分析，得到气溶胶和云层次的空间分布以及分类结果如图 5 所示，七种不同颜色代表不同的层次类别,符号 L 表示分类置信度 CAD 的绝对值低于 50。

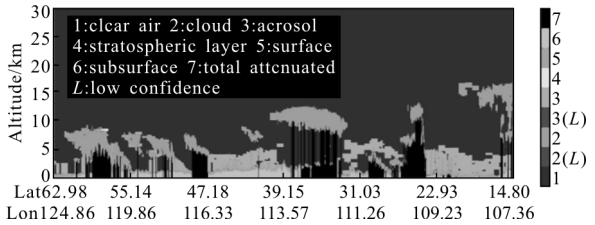

图 5 气溶胶和云层次分类结果

Fig.5 Classification results of aerosol-cloud layer

3.2.2 气溶胶分类和雷达比

大气中的气溶胶层是多种粒子的混合物，其粒子成分复杂、来源不一。定义一个层次内占优势的气溶胶粒子为该层次的类型。雷达比 $S_a=\alpha_a/\beta_a$ 是气溶胶的固有特性,与气溶胶的类型息息相关,也是消光系数反演环节的重要参数。对气溶胶进行分类不仅可以获得消光特性反演所需的雷达比，还有利于分析气溶胶的来源及其辐射强迫作用[2]。

气溶胶的类型取决于粒子的形态、尺寸、折射率和粒径分布等，这些特性体现在激光雷达信号中的后向散射系数和退偏比中。CALIOP 利用层次积分后向散射系数 γ'、体退偏比 δ 和下垫面类型这三个特征属性,将气溶胶分为沙尘气溶胶、烟尘气溶胶、污染的沙尘气溶胶、海洋气溶胶、大陆气溶胶和污染的大陆气溶胶等六类。在这六类气溶胶模型中,其中烟尘、污染的大陆和污染的沙尘这三类气溶胶模型来自于气溶胶自动观测网(Aerosol Robotic Network, AERONET)的聚类分析[28-29];海洋气溶胶模型来自于海岸线周围气溶胶研究 (Shoreline Environmental Aerosol Study, SEAS) 的实验结果[30];沙尘气溶胶模型来自于 Kalashnikova 等人[31]的理论计算;大陆气溶胶也称为背景气溶胶,CALIOP 根据长距离传输测量结果[32]来拟合尺度分布和折射率指数而获得了该气溶胶的模型。分类流程如图 6 所示[33]。下垫面类型来自国际

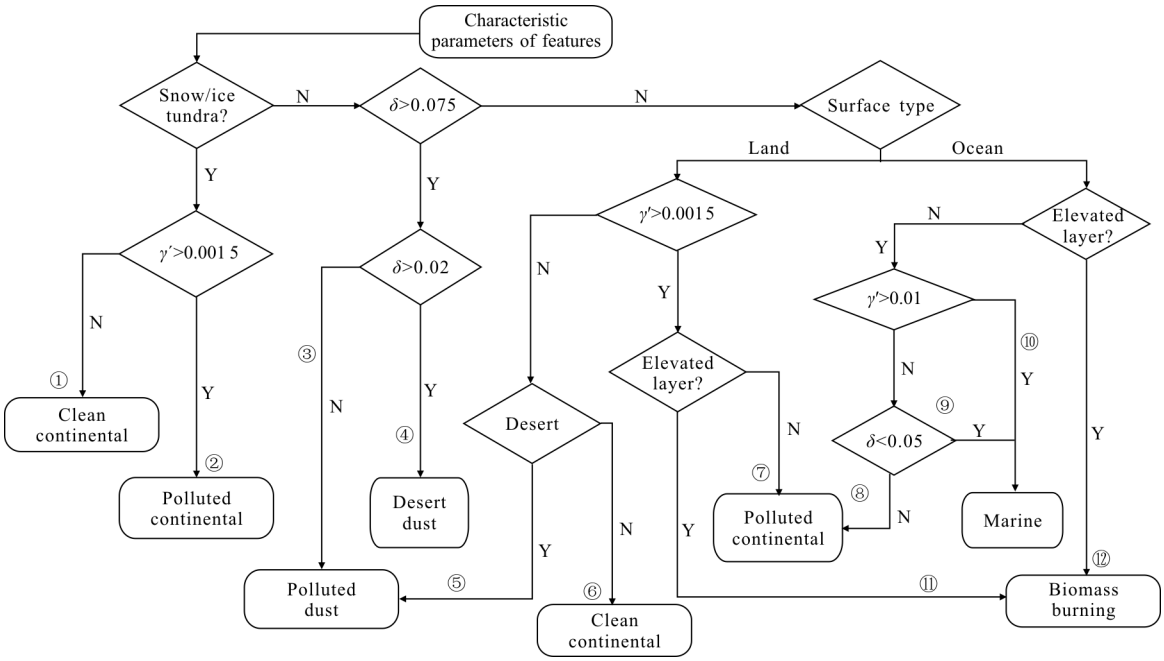

图 6 气溶胶分类流程

Fig.6 Flowchart of aerosol type classification

岩石圈——生物圈项目 (International Geosphere-Biosphere Programme,IGBP)[33]。γ'和 δ 的分类阈值来自于 LITE 的观测结果;在考虑偏振的情况下,分类阈值来源于早期的观测结果和理论模型[34-38]。

如果一个气溶胶层次的上下都为清洁大气,则认为其为被抬高的层次,此种层次的双向透过率 $\mathbf{T}^2$ 可以通过清洁大气获得,则雷达比 **S** 可根据公式(23)和(24)得到[33]。其他层次的雷达比则由分类结果所对应的气溶胶类型决定。

根据 AERONET 的气溶胶模型,不同类型的气溶胶其雷达比有明显的差别。表 3 为六种气溶胶在 532 nm 和 1 064 nm 波长下的雷达比[33]。

表 3 CALIOP 气溶胶类型和雷达比 S_a

Tab.3 CALIOP aerosol types and lidar ratios S_a

Lidar ratio	Desert dust	Polluted dust	Biomass burning
S_a@532 nm	40	65	70
S_a@1 064 nm	30	30	40
Lidar ratio	**Clean continental**	**Polluted continental**	**Marine aerosol**
S_a@532 nm	35	70	20
S_a@1 064 nm	30	30	45

3.2.3 云相态分类

大气中的云,根据所含水分的结晶情况分为冰云、水云和混合相态三种,其中水平取向的冰云因其独特的性质也能够与随机取向的冰云区分开。Hu 等人通过蒙特卡洛理论仿真[39-41]和实际观测结果统计[42]提出了利用层次积分衰减散射后向散射系数 γ' 和退偏比 δ 之间的关系来区分冰云和水云。

水云粒子的单次散射不会改变入射光的偏振度,但是水云内部发生的多次散射会改变后向散射光的偏振度,所以水云的退偏比会随着探测深度和后向散射的增加而变大。Hu 等人[43-44]利用多次散射的蒙特卡洛模型模拟水云的退偏比,得出了层次积分后向散射系数和退偏比之间有以下简单关系:

$$\gamma' \approx 0.0265\left(\frac{1+\delta}{1-\delta}\right)^2 \tag{26}$$

水平取向的冰云由于其片状晶体的镜面反射不会改变入射光的偏振性质,因此其退偏比较小,但其后向散射很强。而随机取向的冰云前向散射强,后向散射弱,由前向多次散射造成的退偏严重,通常在 0.3~0.5 之间。因此这三种相态的云,在 γ'-δ 关系上具有不同的分布规律。Hu 等人[39]根据以上规律总结出了区分三者的阈值,利用该阈值可对云相态进行初步分类。

但在实际情况下,随机取向的冰云往往和水平取向的冰云混合在一起,造成退偏比不能完全分离,此时单一的 γ'-δ 关系则不足以作为分类的依据。并且 Hu 等人[42]对层顶温度的统计表明:少数层顶温度低于-40 ℃的冰云,在单一 γ'-δ 关系中会被当做水云。因此,CALIOP 在做云相态分类时,把层顶温度也作为一个重要的分类依据。根据前人的观测结果[42,45]可知,水云的层顶温度大多分布在 0~-25℃之间;水平取向的冰云在层顶温度 0~-20 ℃的区间内分布最密集,0 ℃以上几乎不存在;层顶温度低于-25 ℃时,绝大部分为随机取向的冰云,只有少量为片状的水平取向冰云;当温度低-45 ℃时,大气中的云全部为随机取向的冰云。

3.3 消光反演

由于大气成分的多样性和大气状态变化的复杂性,从激光雷达方程中反演出气溶胶的消光系数是一个较为复杂的过程。前人在对激光雷达方程和相关参数进行假设的基础上,先后提出了多种反演算法,如斜率法[46]、Klett 反演法[47]和 Fernald 分析法[48]等。Fernald 分析法是目前发展最成熟的反演方法,该方法的优点在于不仅将大气分子和气溶胶粒子分开考虑,还根据雷达的位置发展出前向和后向两种不同的反演方法。地基激光雷达因为其远场信号是洁净的高空大气,容易得到一个简单稳定的消光系数值,可以采用后向反演法。但是星载激光雷达的远场是近地表,气溶胶来源及分布复杂,难以获得消光系数的边界值,因此 CALIOP 的混合消光反演算法采用 Fernald 的前向反演法。

混合消光反演算法(HERA)是一种灵活稳定的迭代反演法[2],它利用 SIBYL 的层次位置信息和 SCA 的层次分类结果反演粒子的后向散射系数和消光系数。

反演未知的后向散射系数和消光系数需要层次的雷达比或双向透过率作为边界条件。HERA 以 80 km 的场景为单位,将不同分辨率下查找到的层次分为简单层次、复杂层次和嵌套层次三种[49]。简单层次被清洁大气包围,可利用双向透过率约束反演简单层次的消光系数。复杂层次由垂直方向上相临近

的类型不同的简单层次组成，其不同的区域雷达比不同。嵌套层次是指该层次在水平和垂直方向都完全被另外一个不同分辨率不同类型的层次所包裹，嵌套层次的透过率不能脱离其周围层次得到。复杂层次和嵌套层次的透过率无法直接获得，因此需要使用雷达比作为边界条件。在版本 2 数据中，气溶胶的雷达比来自于 SCA 的分类模型，冰云的雷达比为 25 sr，水云的雷达比为 18 sr。

雷达比会在一定程度上约束反演算法，但如果初始雷达比过大，反演得到的后向散射系数过大，迭代过程会不稳定发生发散。而当雷达比过小的时候，反演到的后向散射系数会出现负值。层次的光学厚度越大，雷达比对反演精度的影响就越大。对于复杂层次，上层雷达比的选择会影响下层信号的透过率校正，成为反演中主要的误差来源。为了较小雷达比在反演中造成的误差，HERA 中包含了自动调整雷达比的算法。Young 等人[50]给出了具体的调整过程。

另外由于大气悬浮层中的云和气溶胶差别较大，因此消光反演算法需要同时实现对强弱回波信号层次的反演。同时由于星载激光雷达的激光发射源位于高空，距离要探测的云和气溶胶层高达 500~700 km 之远，粒子的多次散射会导致到达接收系统的光子数增多、信号退偏或脉冲延迟等现象，因此星载激光雷达的消光特性反演必须考虑多次散射的影响，在雷达方程中引入多次散射因子 $\eta(r)$ 得到：

$$\mathbf{T}_p^2(r)=\exp(-2\eta(r)\int_0^r \sigma_p(r')dr')=$$

$$\exp(-2\eta(r)\mathbf{S}_a\int_0^r \beta_p(r')dr') \tag{27}$$

$\eta(r)$ 随高度的变化而改变，但在 CALIOP 消光特性反演中目前认为层次的多次散射系数为常数。对于 CALIOP 来说，气溶胶内的多次散射效应通常比较小可以忽略不计；冰云内的多次散射效应很强，取 $\eta(r)$ 为 0.6[49]；尽管 CALIOP 版本 2 廓线产品中包含水云的消光系数，但由于算法中未考虑水云内的多次散射效应，所以水云的消光系数和光学厚度数据是不准确的[2]。

4 Level 3 数据筛选算法

CALIOP Level 3 产品是在 Level 2 的基础上得到的月平均消光系数廓线产品，每个月的数据产品根据天空状态和照明条件分为八个文件，天空状态包括无云、透明云层、不透明云层和全天空四种，照明条件包括白天和夜晚两种。空间分辨率为纬度 2°，经度 5°，垂直 60 m；高度范围为海拔 -0.5~12 km。Level 3 数据产品即为气溶胶消光特性在三维空间内的反映。为了得到可靠的 Level 3 数据，CALIOP 选取数据样本时对 Level 2 产品进行了筛选，去除掉置信度低的层次分类和消光反演数据，留下质量高的数据。 Level 3 算法中所使用的数据筛选过滤器有以下几种[51]。

CAD 值过滤器：CAD 值在 -20~20 之间代表气溶胶分类结果的置信度只有 20%，这种低置信度的分类结果往往是由低信噪比导致的误判。为了提高数据的准确度，Level 3 只使用 CAD 值在 -100~-20 之间的 Level 2 气溶胶产品作为样本数据。

消光系数 QC 标志过滤器：Level 2 消光廓线产品中 QC 标志是一个 16 位的二进制整数，不同的数值代表不同的反演方式。在 Level 3 只使用中 QC 值为 0、1、16 或 18 的数据，因为其他 QC 值的消光产品相比于这四种来说准确性要低很多。

气溶胶消光不确定性过滤器：只使用消光不确定性小于 99.9 km^{-1} 的气溶胶数据。不确定性 99.9 这个值是由反演算法决定的，在廓线向下迭代的过程中，当反演算法开始发散的时候，不确定值为 99.9。这种情况下的反演结果是不可信的，因此去除掉消光不确定值为 99.9 的气溶胶层以及同廓线中该层次以下的气溶胶层。

80 km 分辨率简单层次过滤器：Level 2 层次识别算法中对廓线进行 80 km 平均的主要目的是为了消除由于高能粒子撞击探测器造成的尖峰噪声。Level 3 数据质量筛选算法去除了水平分辨率为 80 km 的简单气溶胶层次。这种类型的气溶胶一般分布在高空中，并且消光系数很低。去除掉这些气溶胶可以排除高空中零星存在的消光系数，但对气溶胶的柱光学厚度并无太大影响。

误识别的卷云过滤器：在云和气溶胶分类算法中有时会将稀薄的卷云误识别为气溶胶。这种稀薄卷云经常出现在水平分辨率为 80 km 的层次中，而且由于噪声的存在易表现出气溶胶的性质。为了将这种误识别的层次筛除，Level 3 算法认为高度在 4 km

以上并且与层顶温度 0 ℃以下的冰云邻近的气溶胶为未识别出来的卷云。由于这种稀薄卷云与冰云邻近的概率比较大,所以暂不考虑邻近水云的情况。

与气溶胶层底相连的未识别出的地面过滤器：通常情况下的气溶胶的层底位于地面以上 30~90 m 之间。在调用气溶胶底部延长算法的时候,默认气溶胶的底部位于地面以上 90 m 的位置。这导致地面附近的平均消光系数廓线的偏差比较低 (因为清洁大气的消光系数假定为 0 km^{-1}),在 90 m 以下消光系数非零的气溶胶层次不易被识别出来。为了避免Level 3 产品中气溶胶消光系数偏低，如果清洁大气位于气溶胶层次以下，并且该气溶胶层的层底高度低于 250 m,则将 Level 2 样本中该清洁大气的数据忽略。

异常负数信号过滤器：Level 1B 产品中地面或浓厚云层等强散射目标的衰减后向散射系数位置有时会异常地小于零。当消光反演算法中出现异常的负后向散射系数时,消光系数也会小于零。这会导致 Level 3 平均消光系数在靠近地面时较小,出现负数异常现象。为了减少此类异常的干扰,CALIOP 将 Level 2 中地面以上 60 m 以内的气溶胶消光数据不作为 Level 3 的样本。

近地面较大负消光系数过滤器：如果气溶胶信号与地面信号相混杂，则消光产品中会在靠近地面位置出现较大的负值。为了减少这种地面混杂信号，CALIOP 忽略了 Level 2 消光产品中的所有邻近地面且小于-0.2 km^{-1} 的值。

与地面相连的非透明层次以下的地面混杂过滤器:当不透明层次与地面相连的时候,层次识别算法会将 CALIOP 雷达高度矩阵中最接近数字高程图 (Digital Elevation Map,DEM) 中地面高度的值认为是层底位置，如果此时的层底位置低于实际地面高度,那么消光信号中就会出现地面混杂的现象。为了去除这些混杂的地面信号,CALIOP Level 3 算法将消光系数大于 2 km^{-1} 并且在最大 DEM 地面高度以下的非透明气溶胶层排除在外。

5 结束语

CALIOP 是星载激光雷达探测大气成分的先驱，其多波长偏振探测通道为研究云和气溶胶提供了更多的信息。CALIOP 数据产品内容丰富,包含了连续 10 多年的全球云、气溶胶的光学特性和空间分布信息，这些数据产品的产生得益于有效的处理算法，为了充分利用 CALIOP 的原始观测数据,NASA 创新性地提出了多空间分辨率的识别和反演方法，有效地平衡了信噪比和空间分辨率之间的矛盾;应用场景类算法实现了气溶胶和云相态的分类，这对示踪污染物传输、分析气溶胶和云的相互作用、认识云和气溶胶的微物理特性等有着重要的作用。随着数据应用的深入，人们对气溶胶和云的认识日渐加强,CALIOP 的算法和数据产品也在不断地完善和更新,目前最新的数据为版本 4。CALIOP 作为最成功的星载云、气溶胶探测激光雷达,其数据的成功开发和应用，为各国今后发展新的星载探测技术提供了宝贵的经验。

未来国内也会在星载激光雷达领域进行更深远的研究，高光谱分辨率激光雷达 (High Spectral Resolution Lidar,HSRL)、多视场激光雷达、多波长 (355、532 和 1 064 nm)和偏振等技术将在很大程度上提高对大气物理、光学特性的认识,提高数据反演的精度；主被动多源数据融合和多平台协同观测等遥感手段的进步也将拓展数据产品的应用领域。未来星载大气激光雷达探测技术和反演方法将会得到更进一步的提升。

参考文献：

[1] Shi Guangyu, Wang Biao, Zhang Hua, et al. The radiative and climatic effects of atmospheric aerosols [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2008, 32(4): 826-840. (in Chinese)
石广玉, 王标, 张华, 等. 大气气溶胶的辐射和气候效应[J]. 大气科学, 2008, 32(4): 826-840.

[2] Winker D M, Vaughan M A, Omar A, et al. Overview of the CALIPSO mission and CALIOP data processing algorithms [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2009, 26(11): 2310-2323.

[3] Lu Naimeng, Min Min, Dong Lixin, et al. Development and prospect of spaceborne LiDAR for atmospheric detection[J]. Journal of Remote Sensing, 2016, 20(1): 1—10. (in Chinese)
卢乃锰, 闵敏, 董立新, 等. 星载大气探测激光雷达发展与展望[J]. 遥感学报, 2016, 20(1): 1—10.

[4] Illingworth A J, Barker H W, Beljaars A, et al. The EarthCARE Satellite: the next step forward in global measurements of clouds, aerosols, precipitation, and radiation

[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2015, 96(8): 1311-1332.

[5] National Aeronautics and Space Administration, Goddard Space Flight Center. Aerosol/Cloud/Ecosystems Mission[FB/OL]. (2016-06-10). http://acemission.gsfc.nasa.gov/payload.html.

[6] Chen Weibiao, Liu Jiqiao. Concept design of spaceborne atmospheric aerosol and carbon lidar [C]//The 4th International Symposium on Atmospheric Light Scattering and Remote Sensing (ISALSaRS'15), 2015.

[7] Zheng Shaoqing, Xu Jun, He Youjiang, et al. Satellite Cloud-Aerosol Lidar-CALIOP: capability, product and its applications [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2014, 4(4): 313-320. (in Chinese)
郑韶青, 徐峻, 何友江, 等. 星载激光雷达 CALIOP 功能、产品和应用[J]. 环境工程技术学报, 2014, 4(4): 313-320.

[8] Hunt W H, Winker D M, Vaughan M A, et al. CALIPSO lidar description and performance assessment [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2009, 26(7): 1214-1228.

[9] Liu Gang, Shi Weizhe, You Rui. Cloud-aerosol lidar of America [J]. Spacecraft Engineering, 2008, 17(1): 78-84. (in Chinese)
刘刚, 史伟哲, 尤睿. 美国云和气溶胶星载激光雷达综述[J]. 航天器工程, 2008, 17(1): 78-84.

[10] Winker D M, Hostetler C A, Vaughan M A, et al. CALIOP algorithm theoretical basis document part 1: CALIOP instrument, and algorithms overview, PC-SCI-202 Part 1, 2.0 [R]. Hampton, VA: NASA Langley Research Center, 2006.

[11] Hostetler C A, Liu Z, Reagan J. CALIOP algorithm theoretical basis document calibration and Level 1 data products. CALIOP Instrument, and Algorithm Overview, PC-SCI-202, 1.0 [R]. Hampton, VA: NASA Langley Research Center, 2006.

[12] Reagan M J, Wang X, Osborn M J. Spaceborne lidar calibration from cirrus and molecular backscatter returns[J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 2002, 40: 2285-2290.

[13] Vernier J P, Pommereau J P, Garnier A, et al. Tropical stratospheric aerosol layer from CALIPSO lidar observations [J]. J Geophys Res, 2009, 114(D4):144-153.

[14] Powell K A, Hostetler C A, Liu Z, et al. CALIPSO lidar calibration algorithms. part I: nighttime 532-nm parallel channel and 532-nm perpendicular channel [J]. Journal of Atmospheric & Oceanic Technology, 2009, 26(10): 2015-2033.

[15] Vaughan M A, Liu Z, Mcgill M J, et al. On the spectral dependence of backscatter from cirrus clouds: Assessing CALIOP's 1 064 nm calibration assumptions using cloud physics lidar measurements [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2010, 115: D14: 1-17.

[16] Vaughan M, Garnier A, Liu Z, et al. Chaos, consternation and CALIPSO calibration: new strategies for calibrating the CALIOP 1064 nm channel [C]//Proceedings of the 26th International Laser Radar Conference(ILRC), 2012.

[17] Powell K A, Vaughan M A, Rogers R R, et al. The CALIOP 532-nm channel daytime calibration: Version 3 algorithm [C]//Proceedings of the 25th International Laser Radar Conference (ILRC), 2010: 1367-1370.

[18] Winker D M, Couch R H, McCormick M P. An overview of LITE: NASA's lidar in-space technology experiment [J]. Proceedings of the IEEE, 1996, 84(2): 164-180.

[19] 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): 3.

[20] Vaughan M A, Winker D M, Powell K A. CALIOP algorithm theoretical basis document-part 2: detection and layer properties algorithms, PC-SCI-202 Part 2, 1.0[R]. Hampton, VA: NASA Langley Research Center, 2005.

[21] Yu Nana. Cloud-aerosol satellite borne lidar data retrieval algorithm preliminary study [D]. Qingdao: Ocean University of China.2012. (in Chinese)
于娜娜. 气溶胶/云星载激光雷达数据反演算法初步研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.

[22] Vaughan M A, Powell K A, Kuehn R E. Fully automated detection of cloud and aerosol layers in the CALIPSO lidar measurements [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2009, 26(10): 2034-2050.

[23] Liu Z, Omar A H, Hu Y. CALIOP algorithm theoretical basis document-part3: scene classification algorithms, PC-SCI-202 Part 3, 1.0[R]. Hampton, VA: NASA Langley Research Center, 2005.

[24] Liu Z, Vaughan M A, Winker D M, et al. Use of probability distribution functions for discriminating between cloud and aerosol in lidar backscatter data [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2004, 109(15): 1255-1263.

[25] Hess M, Koepke P, Schult I. Optical properties of aerosols and clouds: the software package OPAC [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1998, 79(5): 831-844.

[26] Liu Z, Vaughan M, Winker D, et al. The CALIPSO lidar cloud and aerosol discrimination: version 2 algorithm and initial assessment of performance[J]. Journal of Atmospheric & Oceanic Technology, 2008, 26(7): 1198-1213.

[27] Liu Z, Kuehn R, Vaughan M, et al. The CALIPSO cloud and aerosol discrimination version3 algorithm and test results

[C]//Proceedings of the 25th International Laser Radar Conference(ILRC), 2010: 5-9.

[28] Omar A H, Jae-Gwang W, Winker D M, et al. Development of global aerosol models using cluster analysis of aerosol robotic network (AERONET) measurements [J]. J Geophys Res, 2005, 110(10): 10-14.

[29] Dubovik O, King M D. A flexible inversion algorithm for retrieval of aerosol optical properties from Sun and sky radiance measurements[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2000, 105(D16): 20673-20696.

[30] Masonis S J, Anderson T L, Covert D S, et al. A study of the extinction-to-backscatter ratio of marine aerosol during the shoreline environment aerosol study[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2003, 20(10): 1388-1402.

[31] Kalashnikova O V, Sokolik I N. Importance of shapes and compositions of wind-blown dust particles for remote sensing at solar wavelengths[J]. Geophysical Research Letters, 2002, 29(10): 38-1-38-4.

[32] Anderson T L, Masonis S J, Covert D S, et al. In situ measurement of the aerosol extinction-to-backscatter ratio at a polluted continental site [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2000, 105(D22): 26907-26915.

[33] Omar A H, Winker D M, Kittaka C, et al. The CALIPSO automated aerosol classification and lidar ratio selection algorithm [J]. Journal of Atmospheric & Oceanic Technology, 2009, 26(10): 1994-2014.

[34] Toshiyuki M, Hajime O, Naoki K, et al. Application of lidar depolarization measurement in the atmospheric boundary layer: Effects of dust and sea-salt particles[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 1999, 104(D24): 31781-31792.

[35] Gobbi G P, Barnaba F, Giorgi R, et al. Altitude-resolved properties of a saharan dust event over the mediterranean[J]. Atmospheric Environment, 2000, 34(29-30): 5119-5127.

[36] Tetsu S, Takashi S, Keiichiro H, et al. Raman lidar and aircraft measurements of tropospheric aerosol particles during the Asian dust event over central Japan: Case study on 23 April 1996 [J]. Journal of Geophysical Research, 2003, 108 (D12): DOI10.1029/2002JD003150.

[37] Barnaba F, Gobbi G P. Modeling the aerosol extinction versus backscatter relationship for lidar applications: maritime and continental conditions [J]. Journal of Atmospheric & Oceanic Technology, 2004, 21(3): 428-442.

[38] Reagan J A, Thome K J, Powell D M. Lidar aerosol ratio: measurements and models [C]//Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2001. IGARSS' 01. IEEE 2001 International, 2001: 84-87.

[39] Hu Y. Depolarization ratio-effective lidar ratio relation: Theoretical basis for space lidar cloud phase discrimination [J]. Geophysical Research Letters, 2007, 34(11):224-238.

[40] Hu Y, Liu Z, Winker D, et al. Simple relation between lidar multiple scattering and depolarization for water clouds [J]. Optics Letters, 2006, 31(12): 1809-1811.

[41] Hu Y, Vaughan M, Liu Z, et al. The depolarization-attenuated backscatter relation: CALIPSO lidar measurements vs. theory[J]. Optics Express, 2007, 15(9): 5327-5332.

[42] Hu Y, Winker D, Vaughan M. CALIPSO/CALIOP cloud phase discrimination algorithm [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2009, 26(10): 2293-2309.

[43] Hu Y X, Winker D, Yang P, et al. Identification of cloud phase from PICASSO-CENA lidar depolarization: a multiple scattering sensitivity study [J]. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 2001, 70(4-6): 569-579.

[44] Hu Y, Hosteler L. Using backscattered circular component for shape determination: A theoretical study [J]. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 2003, 79:757.

[45] Lu Xiaomei, Jiang Yuesong. Statistical properties of clouds over Beijing derived from CALIPSO lidar measurements[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2011, 54(10): 2487-2494. (in Chinese)
路小梅, 江月松. 偏振激光雷达探测的北京地区云的统计特性分析[J]. 地球物理学报, 2011, 54(10): 2487-2494.

[46] Collis R T H, Russell P B. Lidar Measurement of Particles and Gases by Elastic Backscattering and Differential Absorption [M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 1976: 71-151.

[47] Klett J D. Stable analytical inversion solution for processing lidar returns[J]. Applied Optics, 1981, 20(2): 211-220.

[48] Fernald F G. Analysis of atmospheric lidar observations: some comments[J]. Applied Optics, 1984, 23(5): 652-653.

[49] Young S A, Vaughan M A, Kuehn R E, et al. CALIOP algorithm theoretical basis document-part4: extinction retrieval Algorithms, PC-SCI-202 Part 4, 1.0 [R]. Hampton, VA: NASA Langley Research Center, 2008.

[50] Young S A, Vaughan M A. The retrieval of profiles of particulate extinction from Cloud-Aerosol Lidar Infrared Pathfinder Satellite Observations (CALIPSO) data: algorithm description [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2009, 26(6): 1105-1119.

[51] National Aeronautics and Space Administratio. CALIPSO: data user's guide-data product descriptions-lidar Level 3 aerosol profile monthly product[EB/OL].[2017-08-27].https://www-calipso.larc.nasa.gov/resources/calipso_users_guide/data summaries/l3/index.php.