



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 107870336 B

(45)授权公告日 2019.09.10

(21)申请号 201711017755.2

G01S 7/48(2006.01)

(22)申请日 2017.10.26

(56)对比文件

(65)同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 107870336 A

CN 105988124 A,2016.10.05,
CN 103175759 A,2013.06.26,
CN 103268632 A,2013.08.28,

(43)申请公布日 2018.04.03

Wei Wang et al..An Improved Iterative Fitting Method to Estimate Nocturnal Residual Layer Height.《Atmosphere》.2016,第7卷(第106期),

(73)专利权人 武汉大学
地址 430072 湖北省武汉市武昌区珞珈山
武汉大学

吕立蕾等.地物反射率探测激光雷达回波信号的小波去噪.《武汉大学学报·信息科学版》.2011,第36卷(第1期),

(72)发明人 毛飞跃 王威 臧琳 潘增新
龚威

钟良.LiDAR同机影像辅助点云分类相关技术研究.《中国博士学位论文全文数据库 信息科技辑》.2015,(第5期),

(74)专利代理机构 武汉科皓知识产权代理事务
所(特殊普通合伙) 42222
代理人 赵丽影 代文成

审查员 杨喆

(51)Int.Cl.
G01S 17/95(2006.01)

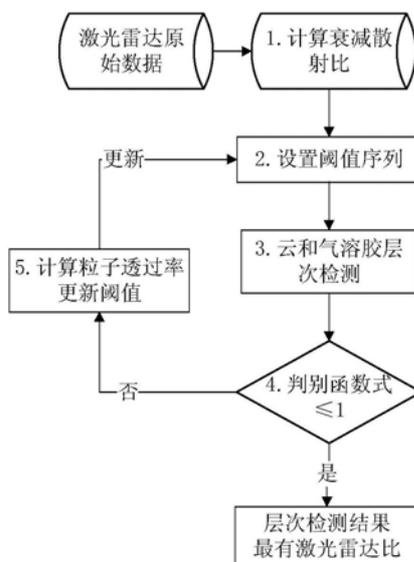
权利要求书3页 说明书8页 附图3页

(54)发明名称

一种星载激光雷达的可穿透层层底迭代检测方法

(57)摘要

本发明提供一种星载激光雷达的可穿透层层底迭代检测方法,根据激光雷达比和穿透率之间的关系,将基于层底-层顶信号计算得的衰减散射比与基于廓线扫描获取的衰减散射比是否相等作为物理约束,通过迭代算法优化层底检测。该方法可以通过迭代精确确定可穿透层的激光雷达比与层底高。



1. 一种星载激光雷达的可穿透层层底迭代检测方法,其特征在于:在吸收阈值法优点的基础上,通过利用激光雷达比和穿透率之间的关系,将基于层底-层顶信号计算得的透过率与基于信号积分得到的透过率是否相等作为物理约束,通过迭代算法优化层底检测;具体包括以下步骤:

步骤1、基于星载激光雷达的观测数据,计算得到衰减散射比;

步骤2、设置初次检测阈值;

步骤3、基于阈值法原理进行云和气溶胶层顶和层底的初步检测;

步骤4、建立判别函数模型;

当判别函数满足判别条件时,转步骤6;当判别函数不满足判别条件时,需要对阈值进行调整,转步骤5;

步骤5、阈值序列更新,更新后执行步骤2-4;

步骤6、输出最优激光雷达比与层底高优化结果,结束检测过程;

所述步骤4,建立判别函数模型具体包括以下过程:

定义判别函数Fun,当该函数等于或近似等于1时所对应的层底高即为最终检测结果;

判别函数定义如下:

$$Fun = \frac{\sum_{z_{next-top}}^{z_{base}} K_{Threshold}(z)}{\sum_{z_{next-top}}^{z_{base}} R'(z)} \quad (6)$$

式中, $\sum_{z_{next-top}}^{z_{base}} R'(z)$ 为层底到下一个层顶之间所有洁净大气的 $R'(z)$ 的平均,其中base代表当前待检测层的层底,next-top代表下一个可穿透层的层顶; $K_{Threshold}$ 初始值为1;

当判别函数满足判别条件时,输出此时的雷达激光比与层底位置,结束检测过程;当判别函数不满足判别条件时,证明此时检测的层底高不准确,需要对阈值进行调整,即应当考虑大气中粒子对光束的衰减作用;

所述步骤5,阈值序列更新具体过程如下:

考虑粒子的衰减作用,阈值序列更新如下:

$$K_{Threshold}^{updated}(z) = K_{Threshold}^{previous}(z) \cdot T_p^2(z) \quad (7)$$

式中, $K_{Threshold}^{updated}$ 为更新后的阈值; $K_{Threshold}^{previous}$ 为上一步参与层次检测的阈值, T_p^2 为粒子双层透过率;

采用以下方法计算透过率:

定义层次积分的后向散射衰减积分值 $\gamma'_{layer} = \int_{base}^{top} \beta_p(z) T_p^2(z) dz$, 式中 z_{top} 和 z_{base} 分别代表

层次的层顶和层底海拔高度;采用 γ' 计算得到粒子双层透过率 $T_p^2(z)$;

$$T_p^2 = 1 - 2 \cdot \gamma'_{layer} \cdot S \quad (8)$$

采用以下方法对 γ' 执行估算:

$$\gamma'_{layer} = g - \frac{1}{2} \cdot (z_{top} - z_{base}) \cdot (\mathfrak{R}_{top} + \mathfrak{R}_{base}) \quad (9)$$

$$\mathfrak{R}_k = \beta_m(z_k) \cdot R'(z_k) \quad (10)$$

$$g = \frac{1}{2} \cdot \sum_{k=base}^{top+1} (z_{k-1} - z_k) \cdot (\mathfrak{R}_{k-1} + \mathfrak{R}_k) \quad (11)$$

式中, k 为不同海拔高度的索引值,当 k 位于层顶和层底位置时计算得到的 \mathfrak{R}_k 分别为 \mathfrak{R}_{top} , \mathfrak{R}_{base} ; z_k 和 z_{k-1} 分别代表索引为 k 和 $k-1$ 时的海拔高度;

激光雷达比 S 由微粒的微物理和化学结构决定,其变化范围为1-120sr;可根据层次的观测数据进行估计,步骤如下:

在反演过程中将激光雷达比 S_i 取步长为1sr参与迭代过程, $i=1, \dots, n$, n 为迭代的次数,每个 S_i 都可以反演得到粒子双向透过率;

从而,基于以上计算结果实现阈值序列更新,转步骤6。

2. 根据权利要求1所述的一种星载激光雷达的可穿透层层底迭代检测方法,其特征在于:所述步骤1,基于星载激光雷达的观测数据,计算得到衰减散射比,具体包括以下过程:

廓线扫描所用到的衰减散射比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,如下式所示:

$$R'(z) = \frac{\beta'_{total}(z)}{\beta'_{air}(z)} \quad (1)$$

式中, z 为海拔高度; β'_{total} 为总的后向衰减散射数据,该数据可由星载激光雷达获得, β'_{air} 为清洁大气后向散射衰减数据,可由气象数据中大气分子和臭氧的分子数密度廓线等数据计算获得;总的后向散射数据与清洁大气后向散射数据定义如下:

$$\beta'_{total}(z) = [\beta_m(z) + \beta_p(z)] \cdot T_m^2(z) \cdot T_{O_3}^2(z) \cdot T_p^2(z) \quad (2)$$

$$\beta'_{air}(z) = \beta_m(z) \cdot T_m^2(z) \cdot T_{O_3}^2(z) \quad (3)$$

式中, β_m 和 β_p 分别代表大气分子、粒子后向散射数据; $T_p(z)$ 、 $T_{O_3}(z)$ 和 $T_m(z)$ 分别代表粒子、臭氧和大气分子的单程透过率;由公式(1)、(2)、(3)可得:

$$R'(z) = \left[1 + \frac{\beta_p(z)}{\beta_m(z)} \right] \cdot T_p^2(z) \quad (4)。$$

3. 根据权利要求2所述的一种星载激光雷达的可穿透层层底迭代检测方法,其特征在于:所述步骤2,设置初次检测阈值具体包括以下过程:

初次检测时假设待检测大气为清洁大气,根据公式(4),此时 β_p 为0, $T_p(z)$ 等于1,从而理论衰减散射比 $R'(z)$ 等于1,因此将初始阈值设置为1,即:

$$K_{Threshold}(z) = 1 \quad (5)。$$

4. 根据权利要求3所述的一种星载激光雷达的可穿透层层底迭代检测方法,其特征在于:所述步骤3,基于阈值法原理进行云和气溶胶层顶和层底的初步检测,具体包括以下过程:

阈值法层次检测过程中,当衰减散射比信号存在异常凸起时,衰减散射比大于等于阈值时,信号所在位置被判定为层顶;随着高度下降,当首次出现衰减散射比小于阈值的情况时,信号所在位置即被判定为该层次层底。

5.根据权利要求4所述的一种星载激光雷达的可穿透层层底迭代检测方法,其特征在于:所述步骤6,利用更新的阈值序列再次执行层次检测过程,当满足判别条件时,输出此时的雷达激光比与层底位置,否则继续更新阈值序列,直至判别条件满足。

一种星载激光雷达的可穿透层层底迭代检测方法

技术领域

[0001] 本发明属于激光雷达系统在气象领域应用中的算法研究,特别涉及一种星载激光雷达的可穿透层层底迭代检测方法。

背景技术

[0002] 气溶胶是由分散并悬浮在气体中的固液体小质点所形成的胶体分散体系,是大气成分的重要组成部分,是影响大气环境的主要不确定因素之一。除吸收和散射太阳光外,大气边界层中的气溶胶可以直接或通过影响平流层中臭氧的形成来改变空气质量。气溶胶对于全球辐射影响的不确定性因素主要与气溶胶的空间分布变化以及气溶胶的光学和微物理特性有关,而光学和微物理特性与气溶胶的生命周期和气溶胶类型有关。要减少这些不确定因素的影响,需要对全球气溶胶进行高分辨率水平和垂直的持续观测。

[0003] 当前气溶胶的观测手段主要包括地基观测和空基观测。在众多地基观测系统中,由美国NASA和法国LOA-PHOTONS (CNRS) 建立的全球气溶胶观测网络(AERONET)是典型的气溶胶地基观测系统,该网络现已经覆盖了全球主要区域,利用CIMEL自动太阳光度计(SPAM)作为基本观测仪器,大部分站实现了每天的数据采集。但是AERONET基站覆盖范围小,而且在非美洲地区的覆盖密度低,难以实现对目标区域的有效监测。空基观测又分为机载观测和星载观测。机载观测方法对于气溶胶研究是可行的,但是观测成本高,缺少对气溶胶全球大范围的持续观测和时空覆盖。星载观测系统则可以实现对气溶胶全球范围内高时空分辨率的持续观测。自20世纪70年代以来,针对星载观测系统的气溶胶反演研究从未停止。被动遥感技术虽然实现了对气溶胶的连续时空检测,但是不能提供气溶胶的垂直特性,而星载激光雷达技术则有效的弥补了这一不足。

[0004] 美国是星载激光雷达的先行者,曾在1994年进行了激光雷达空间技术试验(Lidar In-space Technology Experiments,LITE),证明了空间激光雷达在研究气溶胶和云方面的潜力。1998年,美国NASA与法国国家航天中心(CNES)合作开始实施“云-气溶胶激光雷达和红外探测器卫星观测”(Cloud-Aerosols Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations,CALIPSO)计划,于2006年成功发射CALIPSO卫星,而正交偏振云-气溶胶激光雷达(Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization,CALIOP)则是CALIPSO卫星的主要有效载荷之一,CALIOP具备识别气溶胶、沙尘、烟尘以及卷云的能力,它成为世界上首个应用型的星载云和气溶胶激光雷达,其观测能力优异。CALIOP总共有三个接收通道两个波段,即1064nm通道、532nm垂直通道和532nm平行通道。CALIOP所探测到的数据包括532nm波段总的后向衰减散射数据和532nm垂直偏振后向衰减散射数据以及1064nm后向衰减散射数据。当前CALIOP提供Level 1B、Level 2和Level 3三级产品。

[0005] 相比于其他传感器,CALIOP激光雷达的优势在于可以获取大气的垂直剖面信息,Level 2气溶胶层数据可以提供大气气溶胶的层顶和层底高度信息,其廓线扫描采用的是532nm波段后向衰减散射比数据,层顶探测采用阈值法,精度较高,层底评估采用斜率法,精度有待进一步改进。云和气溶胶层次边界高精度探测与自动反演对于提升星载激光雷达的

全球大气探测能力和应用潜力具有重要意义。

[0006] 目前基于星载激光雷达的气溶胶层次检测方法主要包括微分零交叉法,小波模极大值法、简单多尺度法和阈值法等算法。其中:

[0007] 微分零交叉法的基本原理是通过计算雷达回波信号与观测距离的微分零点,结合回波信号的波形特征从而识别层顶和层底,该算法数理机制明确,然而微分零交叉法对激光雷达回波信号的信噪比要求较高。

[0008] 小波模极大值法以小波变换理论为核心,通过寻找小波变换系数模的局部极大值点以识别信号边缘,从而确定气溶胶层次变化的数据边界,然后现实情况下,层次探测过程受误差影响,小波模极大值处所对应的数据点并不是严格的边界层。

[0009] 简单多尺度模型是一种基于自定义指数函数的层次检测与分类算法,该算法基于给定的阈值约束,结合“变动窗”实现特征区云层和气溶胶的分类与定位,该算法原理相对简单,顶层探测效果优于层底探测的结果。

[0010] 阈值法是一种应用广泛的层次检测算法,如CALIPSO气溶胶层反演所采用的算法即为阈值法。阈值法是一种基于光束衰减散射比的云层-气溶胶探测方法,采用的阈值设定方式为自适应阈值设定,该方法可以较好的探测层顶,但是在层底探测的研究中应用受限。当前层底探测还是主要依赖于斜率法,与阈值法不同,斜率法基于原始回波信号,反演过程中难以区分洁净大气和污染层次的斜率变化,即在斜率小的区域很可能对应大的消光系数,而且该算法忽略了层次衰减对信号的影响,从而引入较大误差。

[0011] 以往基于星载激光雷达数据探测气溶胶层的算法精度低,尤其是针对层底的反演误差较大。目前基于星载激光雷达数据的气溶胶层次检测方法主要包括微分零交叉法,小波模极大值法、简单多尺度方法和阈值法等,尽管上述算法在现实生产与学术研究中均得到了不同程度的应用,但是由于激光雷达数据中的误差影响以及算法本身的限制,其使用结果并不理想。具体而言:

[0012] 微分零交叉法数理机制明确,通过计算雷达回波信号微分零点,结合其波形特征判断层顶和层底位置,然而该算法对激光雷达回波信号的信噪比要求较高,然而实际上星载激光雷达是强激光发射弱信号检测的过程,其信号的信噪比极低,该算法在现实应用中存在较为严重的误判现象。

[0013] 小波模极大值法的理论核心是小波变换,是小波变换模的局部极值点对应信号的突变点,利用小波变换系数模的局部极大值点以识别信号边缘,从而确定气溶胶层次变化的数据边界,然后现实情况下,层次探测过程受误差的影响,基于该方法所探测的结果并不是严格意义上的边界层。

[0014] 简单多尺度模型是一种基于自定义函数的层次检测与分类算法,该算法基于给定的阈值约束,实现云层和气溶胶的分类与定位,算法原理相对简单,然而由于缺乏对层次衰减物理特性的考虑,基于该算法的层底定位存在偏差。

[0015] 阈值法是一种基于衰减散射比的云-气溶胶层次检测方法,该方法可以较好的探测层顶,但是在层底探测的研究中应用受限。当前层底探测主要依赖于斜率法,该方法基于原始回波信号,不能区分洁净大气和污染层次的斜率变化,同时忽略了层次衰减对信号的影响,反演结果精度较低。尽管如此,阈值法仍然是当前应用广泛的算法,CALIPSO气溶胶层反演正是采用此算法。

[0016] 综上,当前基于星载激光雷达数据探测气溶胶层的算法精度低,尤其是针对层底的反演误差较大,在一定程度上限制了星载激光雷达的应用。

发明内容

[0017] 为了解决上述问题和矛盾,建立更加精确的云和气溶胶层次检测反演方法与理论体系,本发明在吸收经典阈值法(CALIPSO气溶胶层反演所采用的算法)优点的基础上,根据激光雷达比和穿透率之间的关系,将基于层底-层顶信号计算得的衰减散射比与基于廓线扫描获取的衰减散射比是否相等作为物理约束,通过迭代算法优化层底检测。

[0018] 本发明采用如下技术方案实现:

[0019] 一种星载激光雷达的可穿透层层底迭代检测方法,在吸收阈值法优点的基础上,通过利用激光雷达比和穿透率之间的关系,将基于层底-层顶信号计算得的透过率与基于信号积分得到的透过率是否相等作为物理约束,通过迭代算法优化层底检测;具体包括以下步骤:

[0020] 步骤1、基于星载激光雷达的观测数据,计算得到衰减散射比;

[0021] 步骤2、设置初次检测阈值;

[0022] 步骤3、基于阈值法原理进行云和气溶胶层顶和层底的初步检测;

[0023] 步骤4、建立判别函数模型;

[0024] 当判别函数满足判别条件时,转步骤6;当判别函数不满足判别条件时,需要对阈值进行调整,转步骤5;

[0025] 步骤5、阈值序列更新,更新后执行步骤2-4;

[0026] 步骤6、输出最优激光雷达比与层底高优化结果,结束检测过程。

[0027] 所述步骤1,基于星载激光雷达的观测数据,计算得到衰减散射比,具体包括以下过程:

[0028] 廓线扫描所用到的衰减散射比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,如下式所示:

$$[0029] \quad R'(z) = \frac{\beta'_{total}(z)}{\beta'_{air}(z)} \quad (1)$$

[0030] 式中, z 为海拔高度; β'_{total} 为总的后向衰减散射数据,该数据可由星载激光雷达获得, β'_{air} 为清洁大气后向散射衰减数据,可由气象数据中大气分子和臭氧的分子数密度廓线等数据计算获得;总的后向散射数据与清洁大气后向散射数据定义如下:

$$[0031] \quad \beta'_{total}(z) = [\beta_m(z) + \beta_p(z)] \cdot T_m^2(z) \cdot T_{O_3}^2(z) \cdot T_p^2(z) \quad (2)$$

$$[0032] \quad \beta'_{air}(z) = \beta_m(z) \cdot T_m^2(z) \cdot T_{O_3}^2(z) \quad (3)$$

[0033] 式中, β_m 和 β_p 分别代表大气分子、粒子后向散射数据; $T_p(z)$ 、 $T_{O_3}(z)$ 和 $T_m(z)$ 分别代表粒子、臭氧和大气分子的单程透过率;由公式(1)、(2)、(3)可得:

$$[0034] \quad R'(z) = \left[1 + \frac{\beta_p(z)}{\beta_m(z)} \right] \cdot T_p^2(z) \quad (4)。$$

[0035] 所述步骤2,设置初次检测阈值具体包括以下过程:

[0036] 初次检测时假设待检测大气为清洁大气,根据公式(4),此时 β_p 为0, $T_p(z)$ 等于1,从而理论衰减散射比 $R'(z)$ 等于1,因此将初始阈值设置为1,即:

[0037] $K_{Threshold}(z) = 1$ (5)。

[0038] 所述步骤3,基于阈值法原理进行云和气溶胶层顶和层底的初步检测,具体包括以下过程:

[0039] 阈值法层次检测过程中,当衰减散射比信号存在异常凸起时,衰减散射比大于等于阈值时,信号所在位置被判定为层顶;随着高度下降,当首次出现衰减散射比小于阈值的情况时,信号所在位置即被判定为该层次层底。

[0040] 所述步骤4,建立判别函数模型具体包括以下过程:

[0041] 定义判别函数 Fun ,当该函数等于或近似等于1时所对应的层底高即为最终检测结果;

[0042] 判别函数定义如下:

$$[0043] \quad Fun = \frac{\sum_{z_{next-top}}^{z_{base}} K_{Threshold}(z)}{\sum_{z_{next-top}}^{z_{base}} R'(z)} \quad (6)$$

[0044] 式中, $\sum_{z_{next-top}}^{z_{base}} R'(z)$ 为层底到下一个层顶之间所有洁净大气的 $R'(z)$ 的平均,其中

base代表当前待检测层的层底,next-top代表下一个可穿透层的层顶,z为海拔高度; $K_{Threshold}$ 初始值为1;

[0045] 当判别函数满足判别条件时,输出此时的雷达激光比与层底位置,结束检测过程;当判别函数不满足判别条件时,证明此时检测的层底高不准确,需要对阈值进行调整,即应当考虑大气中粒子对光束的衰减作用。

[0046] 所述步骤5,阈值序列更新具体过程如下:

[0047] 考虑粒子的衰减作用,阈值序列更新如下:

$$[0048] \quad K_{Threshold}^{updated}(z) = K_{Threshold}^{previous}(z) \cdot T_p^2(z) \quad (7)$$

[0049] 式中, $K_{Threshold}^{updated}$ 为更新后的阈值; $K_{Threshold}^{previous}$ 为上一步参与层次检测的阈值, T_p^2 为粒子双层透过率;

[0050] 采用以下方法计算透过率:

[0051] 定义层次积分的后向散射衰减积分值 $\gamma'_{layer} = \int_{z_{base}}^{z_{top}} \beta_p(z) T_p^2(z) dz$,式中 z_{top} 和 z_{base} 分

别代表层次的层顶和层底海拔高度;采用 γ' 计算得到粒子双层透过率

[0052] $T_p^2(z)$;

$$[0053] \quad T_p^2 = 1 - 2 \cdot \gamma'_{layer} \cdot S \quad (8)$$

[0054] 采用以下方法对 γ' 执行估算:

$$[0055] \quad \gamma'_{layer} = g - \frac{1}{2} \cdot (z_{top} - z_{base}) \cdot (\mathfrak{R}_{top} + \mathfrak{R}_{base}) \quad (9)$$

$$[0056] \quad \mathfrak{R}_k = \beta_m(z_k) \cdot R'(z_k) \quad (10)$$

$$[0057] \quad g = \frac{1}{2} \cdot \sum_{k=base}^{top+1} (z_{k-1} - z_k) \cdot (\mathfrak{R}_{k-1} + \mathfrak{R}_k) \quad (11)$$

[0058] 式中,k为不同海拔高度的索引值,当k位于层顶和层底位置时计算得到的 \mathfrak{R}_k 分别为 \mathfrak{R}_{top} , \mathfrak{R}_{base} ; z_k 和 z_{k-1} 分别代表索引为k和k-1时的海拔高度; Z_{top} 和 Z_{base} 分别代表层次的层顶和层底的海拔高度;

[0059] 激光雷达比S由微粒的微物理和化学结构决定,其变化范围为1-120sr。可根据层次的观测数据进行估计,步骤如下:

[0060] 在反演过程中将激光雷达比 S_i 取步长为1sr参与迭代过程, $i=1, \dots, n$,n为迭代的次数,每个 S_i 都可以反演得到粒子双向透过率;

[0061] 从而,基于以上计算结果实现阈值序列更新,转步骤6。

[0062] 所述步骤6,利用更新的阈值序列再次执行层次检测过程,当满足判别条件时,输出此时的雷达激光比与层底位置,否则继续更新阈值序列,直至判别条件满足。

[0063] 本发明具有的优点和有益效果:

[0064] 本发明可以通过迭代精确确定可穿透层的层底高,并且同时获得最优激光雷达比。云层较薄时,信号衰减较小,信噪比弱,基于回波信号变化特征的斜率法难以区分洁净大气和污染层次的斜率变化,从而确定的云底高存在明显偏差,而本发明所提出的迭代法能够更加准确的确定云底高度,如在实际案例应用中迭代法所确定的云底高相较于斜率法降低了500m;云层较厚时,信号衰减强烈,呈现明显的梯度,斜率法能较好的获取后向散射比的拐点,此时基于迭代法与斜率法所确定的云底高度保持一致。大量的实测和模拟实验分析,本专利所提出的可穿透层层底检测的迭代方法所确定的层底高的偏差约为50m。因此,本发明能够有效的弥补斜率法在噪声较大时的应用缺陷,更加精确地确定可穿透层层底高度。此外,本方法自定义的判别函数式能够给出相应云层状态下的最优激光雷达比,可以为后续云光学特性的反演提供较好的数据支撑。

附图说明

[0065] 图1是星载激光雷达的可穿透层层底检测的迭代方法流程图;

[0066] 图2是星载激光雷达的层次检测阈值法流程图;

[0067] 图3是基于阈值法的CALIPSO层次检测图;

[0068] 图4星载激光雷达的可穿透层层底检测的迭代方法案例应用分析图:(a)为2009年1月26日18:30:20(薄云), (b)为2009年1月26日18:30:20(厚云);

[0069] 图5星载激光雷达的可穿透层层底检测的迭代方法应用分析图。

具体实施方式

[0070] 下面结合附图及实施例对本发明的技术方案作进一步说明。

[0071] 一、如图1所示,本发明包括以下步骤:

[0072] 步骤1、基于星载激光雷达的观测数据,计算得到衰减散射比:

[0073] 本步骤中廓线扫描所用到的衰减散射比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,如下式所示:

$$[0074] \quad R'(z) = \frac{\beta'_{total}(z)}{\beta'_{air}(z)} \quad (1)$$

[0075] 式中, z 为海拔高度; β'_{total} 为总的后向衰减散射数据,该数据可由星载激光雷达获得, β'_{air} 为清洁大气后向散射衰减数据,可由气象数据中大气分子和臭氧的分子数密度廓线等数据计算获得。总的后向散射数据与清洁大气后向散射数据定义如下:

$$[0076] \quad \beta'_{total}(z) = [\beta_m(z) + \beta_p(z)] \cdot T_m^2(z) \cdot T_{O_3}^2(z) \cdot T_p^2(z) \quad (2)$$

$$[0077] \quad \beta'_{air}(z) = \beta_m(z) \cdot T_m^2(z) \cdot T_{O_3}^2(z) \quad (3)$$

[0078] 式中, β_m 和 β_p 分别代表大气分子、粒子后向散射数据; $T_p(z)$ 、 $T_{O_3}(z)$ 和 $T_m(z)$ 分别代表粒子、臭氧和大气分子的单程透过率。由公式(1)、(2)、(3)可得:

$$[0079] \quad R'(z) = \left[1 + \frac{\beta_p(z)}{\beta_m(z)} \right] \cdot T_p^2(z) \quad (4)$$

[0080] 步骤2、设置初次检测阈值:

[0081] 初次检测时假设待检测大气为清洁大气,根据公式(4),此时 β_p 为0, $T_p(z)$ 等于1,从而理论衰减散射比 $R'(z)$ 等于1,因此将初始阈值设置为1,即:

$$[0082] \quad K_{Threshold}(z) = 1 \quad (5)$$

[0083] 步骤3、基于阈值法原理进行云和气溶胶层顶和层底的初步检测:

[0084] 阈值法层次检测过程中,当衰减散射比信号存在异常凸起时,衰减散射比大于等于阈值时,信号所在位置被判定为层顶;随着高度下降,当首次出现衰减散射比小于阈值的情况时,信号所在位置即被判定为该层次层底。

[0085] 步骤4、建立判别函数模型:

[0086] 阈值法可以较好的探测层顶,但是层底的探测结果存在误差。为了判断检测的层底高是否正确,本发明定义了判别函数 Fun ,当该函数等于或近似等于1时所对应的层底高即为最终检测结果。

[0087] 判别函数定义如下:

$$[0088] \quad Fun = \frac{\sum_{z_{next-top}}^{z_{base}} K_{Threshold}(z)}{\sum_{z_{next-top}}^{z_{base}} R'(z)} \quad (6)$$

[0089] 式中, $\sum_{z_{next-top}}^{z_{base}} R'(z)$ 为层底到下一个层顶之间所有洁净大气的 $R'(z)$ 的平均,,其中

base代表当前待检测层的层底,next-top代表下一个可穿透层的层顶; $K_{Threshold}$ 初始值为1。

[0090] 当判别函数不满足判别条件时,证明此时检测的层底高不准确,需要对阈值进行调整,即应当考虑粒子对光束的衰减作用。

[0091] 步骤5、阈值序列更新:

[0092] 考虑粒子的衰减作用,阈值序列更新如下:

$$[0093] \quad K_{Threshold}^{updated}(z) = K_{Threshold}^{previous}(z) \cdot T_p^2(z) \quad (7)$$

[0094] 式中, $K_{Threshold}^{updated}$ 为更新后的阈值; $K_{Threshold}^{previous}$ 为上一步参与层次检测的阈值, T_p^2 为粒子双层透过率。然而粒子双层透过率不能由卫星数据直接获得, 本步骤中采用以下方法计算透过率:

[0095] 定义层次积分的后向散射衰减积分值 $\gamma'_{layer} = \int_{base}^{top} \beta_p(z) T_p^2(z) dz$, 式中 Z_{top} 和 Z_{base} 分别代表层次的层顶和层底海拔高度。那么采用 γ' 可以计算得到粒子双层透过率 $T_p^2(z)$:

$$[0096] \quad T_p^2 = 1 - 2 \cdot \gamma'_{layer} \cdot S \quad (8)$$

[0097] 由上式可知, γ'_{layer} 和 S (激光雷达比) 是计算粒子双层透过率的关键。其中, 只有利用消光系数值才能计算得到 γ' 的精确值, 因此在没有消光系数值时采用以下方法对 γ' 执行估算:

$$[0098] \quad \gamma'_{layer} = g - \frac{1}{2} \cdot (z_{top} - z_{base}) \cdot (\mathfrak{R}_{top} + \mathfrak{R}_{base}) \quad (9)$$

$$[0099] \quad \mathfrak{R}_k = \beta_m(z_k) \cdot R'(z_k) \quad (10)$$

$$[0100] \quad g = \frac{1}{2} \cdot \sum_{k=base}^{top+1} (z_{k-1} - z_k) \cdot (\mathfrak{R}_{k-1} + \mathfrak{R}_k) \quad (11)$$

[0101] 式中, k 为不同海拔高度的索引值, 当 k 位于层顶和层底位置时计算得到的 \mathfrak{R}_k 分别为 \mathfrak{R}_{top} , \mathfrak{R}_{base} ; z_k 和 z_{k-1} 分别代表索引为 k 和 $k-1$ 时的海拔高度; Z_{top} 和 Z_{base} 分别代表层次的层顶和层底的海拔高度;

[0102] 激光雷达比 S 由微粒的微物理和化学结构决定, 其变化范围为 $1-120$ sr。可根据层次的观测数据进行估计, 步骤如下:

[0103] 在反演过程中将激光雷达比 S_i 取步长为 1 sr 参与迭代过程, $i=1, \dots, n$, n 为迭代的次数, 每个 S_i 都可以反演得到粒子双向透过率;

[0104] 从而, 基于以上计算结果实现阈值序列更新。

[0105] 步骤6、输出最优激光雷达比与层底高优化结果:

[0106] 利用更新的阈值序列再次执行层次检测过程, 当满足判别条件时, 输出此时的雷达激光比与层底位置, 否则继续更新阈值序列, 直至判别条件满足。

[0107] 二、(1) 阈值法原理说明

[0108] 与本发明不同的是, 阈值法的阈值计算为一次计算结果, 公式如下:

$$[0109] \quad K_{Threshold}(z) = 1 + \frac{T_0 \cdot MBV(z) + T_1 \cdot RBV(z)}{\beta'_{air}} \quad (12)$$

[0110] 式中, MBV 代表实测后向散射变化, 计算时取 $30 \sim 40$ km 之间的衰减后向散射系数的标准偏差; RBV 代表相对后向散射变化, 单位 ($\text{km}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$), 见公式 (5); z 为海拔高度; T_0, T_1 分别取值 $1.5, 2.5$ 。

$$[0111] \quad RBV(z) = \sqrt{\beta'_{air}(z) \cdot \beta'_{air}(z_{max})} \quad (13)$$

[0112] 基于阈值法的大气层次检测流程如图2所示,阈值法获取的层底较为粗略,相较于实际的层底,阈值法检测结果往往偏高,如图3所示。因此该方法需要进一步优化。

[0113] (2) 迭代法实例分析

[0114] 图4的案例展示了迭代算法获取可穿透层层底的过程。图4显示了同一轨迹上的两个案例,其云层厚度存在差异。具体而言,(a)显示的案例中,云层较薄,其对CALIPSO信号的衰减较小;(b)代表了云层较厚的案例,CALIPSO由于经过厚云层,信号衰减强烈,呈现明显的梯度。图中波动较剧烈的实线为随高度变化的CALIPSO消光散射比曲线,虚线为初始的阈值线。通过初始阈值线,可以很容易获取云层层次的层顶高度以及层底的初始高度(阈值线与气溶胶后向散射比的交点)。

[0115] 图5展示了层底检测的迭代方法在长时间信号探测中的应用。图5中的Case (a)和Case (b)分别对应于图中的两个案例分析。从图5中可以看出,在云层较厚,CALIPSO后向散射信号很强的情况下,本发明的方法和斜率法的结果基本保持一致。主要是由于云层较厚,对CALIPSO信号衰减强烈,斜率法能较好的获取后向散射比的拐点。但是在云层较弱,信噪比较低的情况下,斜率法很难反应层底高的变化,如图中114.5E,31.3N附近斜率法所确定的云层层底高的变化。这主要是因为由斜率法拟合得到的斜率难以区分洁净大气和污染层次的斜率变化,在斜率很小的区域可能对应于很大的消光系数(薄云层),容易引起层底的误判。

[0116] 图5中展示了通过层底检测迭代方法所确定的云层激光雷达比(实线)和这种方法确定的层底高与斜率法确定的层底高之间的相对偏差(虚线)。反演的云层激光雷达比范围变化为10sr-20sr变化,这是合理的云层的激光雷达比值变化范围,说明本方法可以有效的获取云层的激光雷达比值。而这两种方法所确定的层底高偏差变化范围为0-500m。通过大量的实测和模拟实验分析,可穿透层层底检测的迭代方法所确定的层底高的偏差约为50m。

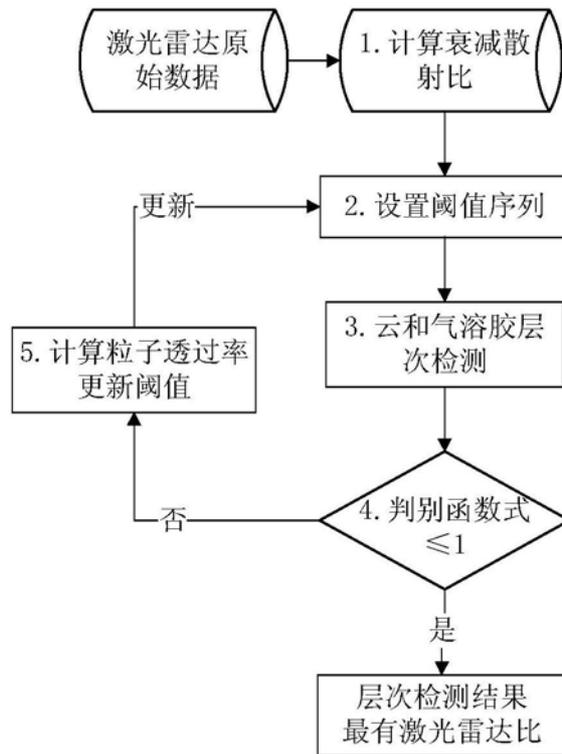


图1

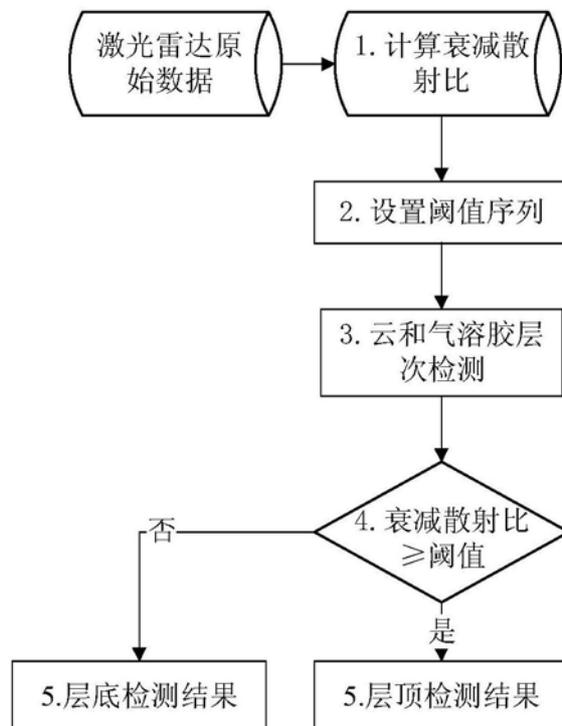


图2

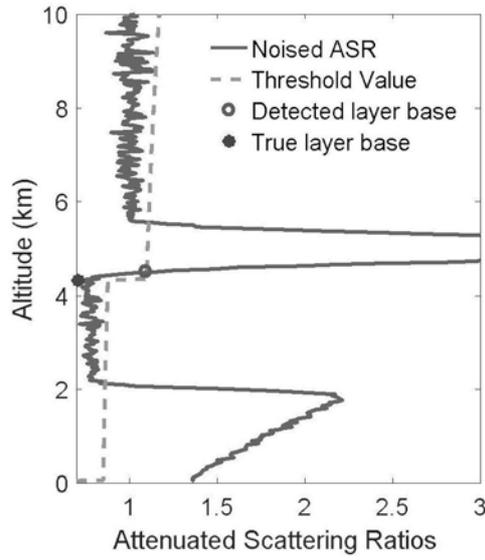


图3

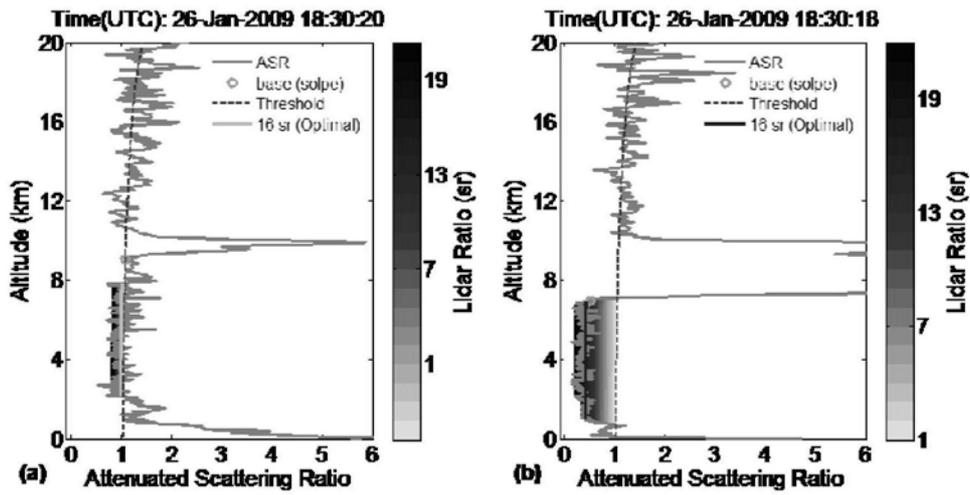


图4

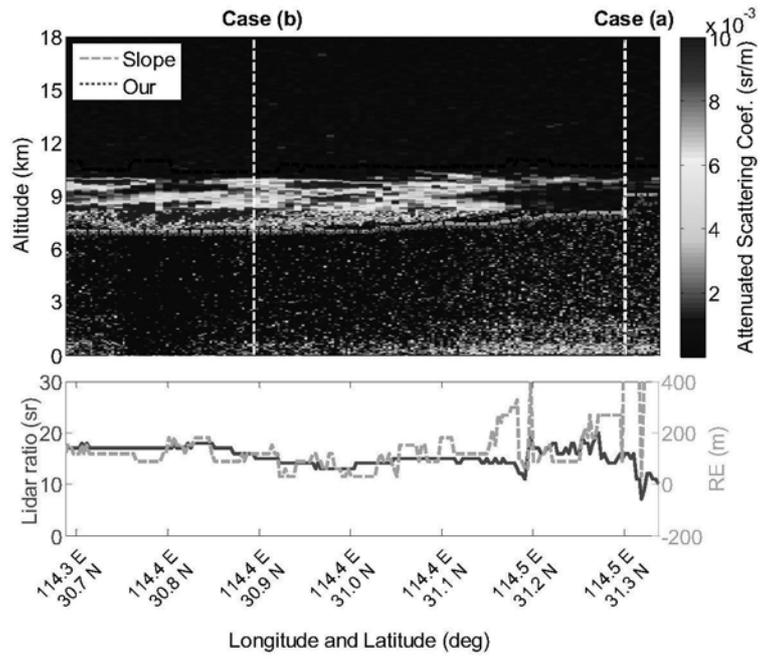


图5