(19)中华人民共和国国家知识产权局

(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 111458726 A
(43)申请公布日 2020.07.28

(21)申请号 202010309069.8

(22)申请日 2020.04.19

(71)申请人 青岛镭测创芯科技有限公司
地址 266100 山东省青岛市崂山区科苑纬一路1号D2楼8层

(72)发明人 秦胜光 尹嘉萍 王希涛 李荣忠 宋小全 吴松华

(74)专利代理机构 青岛海昊知识产权事务所有限公司 37201
代理人 邱岳

(51)Int.Cl.
G01S 17/95(2006.01)
G01S 7/48(2006.01)
G01N 21/27(2006.01)

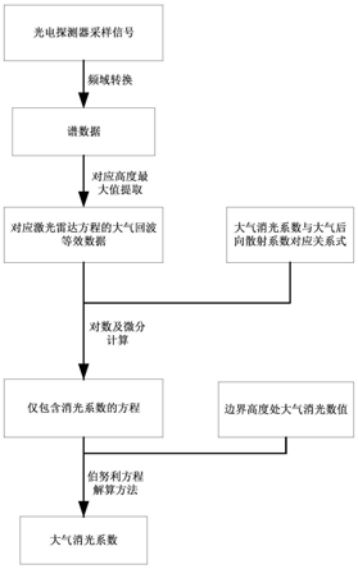
权利要求书1页 说明书5页 附图2页

(54)发明名称

基于相干激光雷达谱强度数据的大气气溶胶分析方法

(57)摘要

基于相干激光雷达谱强度数据的大气气溶胶分析方法，根据相干激光雷达的信号探测流程分析，其不同距离门谱数据最大强度包含大气回波信息。提取出对应高度的谱强度数据，可对应包含大气消光系数与后向散射系数大气激光雷达方程。利用大气后向散射系数同大气消光系数之间的计算关系，反演出大气消光系数。相干激光雷达进行气溶胶探测，扩展了相干雷达的应用功能，提高了相干系统的数据利用率。相比传统的气溶胶激光雷达探测，谱强度数据信噪比较大，探测距离及精度有明显优势。并且相干激光雷达结构紧凑，光学部件稳定可靠，使用的环境可靠性相比传统气溶胶雷达更有优势。



CN 111458726 A

1.一种基于相干激光雷达谱强度数据的大气气溶胶分析方法，其特征在于包括以下步骤：

步骤1，对相干激光雷达的光电探测器采样信号进行变换，获得对应于不同高度的谱数据；

步骤2，对不同高度的谱数据进行强度检测，得出不同高度处最大谱强度数据F(h)，最大谱强度数据包含大气信息，其中h为高度；

步骤3，将谱强度数据等效至激光雷达方程，同时也进行了距离校正：

$X(h)=F(h)\cdot h^2=AK\beta(h)\exp[-2\int_0^h\alpha(\xi)d\xi]$

其中，A为谱强度数据同回波强度转换的比例关系，为定值；K为系统常数；h为对应高度；β(h)为大气总后向散射系数，α(ξ)是关于高度ξ的大气总消光系数；

步骤4，利用大气消光系数与大气后向散射系数之间的对应关系，将大气总后向散射系数由大气总消光系数代替：$\beta(h)=\alpha^k(h)/S_1$，

S_1为消光后向散射比，k与激光发射波长、气溶胶离子特性相关，0.67≤k≤1，

对步骤3所得公式进行对数与微分处理，得到结果：

$$\frac{d[lnX(h)]}{dh}=\frac{k}{\alpha(h)}\cdot\frac{d\alpha(h)}{dh}-2\alpha(h)$$

$$lnX(h)=\ln\left(\frac{AK}{S_1}\right)+\ln\left(\alpha^k(h)\right)-2\int_0^h\alpha(\xi)\,d\xi$$

其中，步骤3公式的常数项做对数变为单独常数项，再微分计算时常数为0；

步骤5，结合伯努利方程解法，计算步骤4公式的未知函数α(h)，而α(h)可结合边界条件分为下面两种表达公式：

$$\alpha_f(h)=\frac{exp\{[lnX(h)-lnX(h_f)]/k\}}{\frac{1}{\alpha(h_f)}+\frac{2}{k}\int_{h_f}^{h}exp\{[lnX(h')-lnX(h_f)]/k\}dh'}$$

$$\alpha_b(h)=\frac{exp\{[lnX(h)-lnX(h_b)]/k\}}{\frac{1}{\alpha(h_b)}-\frac{2}{k}\int_{h_b}^{h}exp\{[lnX(h')-lnX(h_b)]/k\}dh'}$$

$\alpha_f(h)$为后向大气消光系数，即高度大于h_f时的大气消光系数结果，$\alpha(h_f)$为其边界条件；

$\alpha_b(h)$为前向大气消光系数，即高度小于h_b时的大气消光系数结果，$\alpha(h_b)$为其边界条件；

h_f及h_b分别为边界条件对应的高度值；

当高度大于等于h_f时，大气消光系数α(h)计算结果取$\alpha_f(h)$；

当高度小于h_b时，大气消光系数α(h)计算结果取$\alpha_b(h)$。

2.如权利要求1所述的基于相干激光雷达谱强度数据的大气气溶胶分析方法，其特征在于所述步骤4中，与激光发射波长、气溶胶离子特性相关的参数k，不失一般性，可以取k＝1。

基于相干激光雷达谱强度数据的大气气溶胶分析方法

技术领域

[0001] 本发明涉及一种利用激光雷达进行气溶胶分析的方法，具体涉及一种基于相干激光雷达谱强度数据测量大气气溶胶信息。

背景技术

[0002] 大气信息，如风速，温度，湿度，气溶胶，云等信息具有十分重要的作用。无论对天气预报，机场安全高效运行，大气污染物的监测，还是在军事方面的用途，都有十分重要的作用。

[0003] 激光雷达的测量信息时空分辨率高，能够连续测量，相比传统的大气探测方式而言优势明显。相干激光雷达系统目前已有成熟的应用，但主要用来进行大气风场测量。相干激光雷达中，将回波强度通过傅里叶变换等方法将采样信号转换为谱数据。谱数据信息包含两个方面，频率变化信息及谱强度信息。

[0004] 由于大气回波的多普勒效应，谱数据的频率变化信息可用于反演大气风速；谱强度信息中蕴含大气消光信息，可基于谱强度信息进行大气气溶胶探测。

[0005] 常规的相干激光雷达的测量中，仅使用谱数据的频率波动信息，反演大气；而谱数据的强度则不作考虑，限制了相干雷达的应用范围。而常规的大气测量中，大气风场及大气气溶胶作为两个大气的基本参数，存在共同测量的需要。因此，通常在配备一台相干激光雷达测量大气风场时，还需同时配备气溶胶雷达，来同步获取大气气溶胶信息。而且现有的气溶胶激光雷达，利用传统的脉冲能量探测的方式，需要较大的脉冲能量，系统功耗、体积及系统复杂度相比相干雷达系统再应用性上均有不足；同时，大部分气溶胶激光雷达均使用可见光或近红外光波作为探测波长，对人眼安全构成威胁。相比之下，相干激光雷达内部使用集成度及稳定性较高的光纤激光器，结构简单运行稳定；相干系统使用中红外波段，实际使用中可确保人眼安全。同时基于相干系统通过本振光对系统信噪比进行增强的原理方式，更容易获取更远的探测范围。

[0006] 目前尚未出现利用相干激光雷达进行大气气溶胶分析的应用。本发明提出的利用相干激光雷达进行气溶胶探测的方法，不仅扩展了相干激光雷达的应用领域，相比传统气溶胶激光雷达还具有更好的探测性能及使用性能。

发明内容

[0007] 本发明的目的是提供一种基于相干激光雷达谱强度数据的大气气溶胶分析方法，该方法利用相干激光雷达探测数据，将不同高度处谱强度信息对应激光雷达方程，进行谱数据强度分析，从而反演大气气溶胶信息。

[0008] .一种基于相干激光雷达谱强度数据的大气气溶胶分析方法，其特征在于包括以下步骤：

[0009] 步骤1，对相干激光雷达的光电探测器采样信号进行变换，获得对应于不同高度的谱数据；

[0010] 步骤2，对不同高度的谱数据进行强度检测，得出不同高度处最大谱强度数据F(h)，最大谱强度数据包含大气信息，其中h为高度；

[0011] 步骤3，将谱强度数据等效至激光雷达方程，同时也进行了距离校正：

[0012] $$X(h)=F(h)\cdot h^2=AK\beta(h)exp\left[-2\int_0^h\alpha(\xi)\,d\xi\right]$$

[0013] 其中，A为谱强度数据同回波强度转换的比例关系，为定值；K为系统常数；h为对应高度；β(h)为大气总后向散射系数，α(ξ)是关于高度ξ的大气总消光系数；

[0014] 步骤4，利用大气消光系数与大气后向散射系数之间的对应关系，将大气总后向散射系数由大气总消光系数代替：$\beta(h)=\alpha^k(h)/S_1$，

[0015] S_1为消光后向散射比，k与激光发射波长、气溶胶离子特性相关，0.67≤k≤1，

[0016] 对步骤3所得公式进行对数与微分处理，得到结果：

[0017] $$\frac{d[lnX(h)]}{dh}=\frac{k}{\alpha(h)}\cdot\frac{d\alpha(h)}{dh}-2\alpha(h)$$

[0018] $$lnX(h)=\ln\left(\frac{AK}{S_1}\right)+\ln\left(\alpha^k(h)\right)-2\int_0^h\alpha(\xi)\,d\xi$$

[0019] 其中，步骤3公式的常数项做对数变为单独常数项，再微分计算时常数为0；

[0020] 步骤5，结合伯努利方程解法，计算步骤4公式的未知函数α(h)，而α(h)可结合边界条件分为下面两种表达公式：

[0021] $$\alpha_f(h)=\frac{exp\{[lnX(h)-lnX(h_f)]/k\}}{\frac{1}{\alpha(h_f)}+\frac{2}{k}\int_{h_f}^h exp\{[lnX(h')-lnX(h_f)]/k\}dh'}$$

[0022] $$\alpha_b(h)=\frac{exp\{[lnX(h)-lnX(h_b)]/k\}}{\frac{1}{\alpha(h_b)}-\frac{2}{k}\int_{h_b}^h exp\{[lnX(h')-lnX(h_b)]/k\}dh'}$$

[0023] $\alpha_f(h)$为后向大气消光系数，即高度大于h_f时的大气消光系数结果，$\alpha(h_f)$为其边界条件；

[0024] $\alpha_b(h)$为前向大气消光系数，即高度小于h_b时的大气消光系数结果，$\alpha(h_b)$为其边界条件；

[0025] h_f及h_b分别为边界条件对应的高度值；

[0026] 当高度大于等于h_f时，大气消光系数α(h)计算结果取$\alpha_f(h)$；

[0027] 当高度小于h_b时，大气消光系数α(h)计算结果取$\alpha_b(h)$。

[0028] 大气气溶胶浓度信息同大气相关系数信息是直接相关的，结合以上的计算结果，即可获取不同高度的完整大气气溶胶浓度廓线信息。

[0029] 所述步骤4中，与激光发射波长、气溶胶离子特性相关的参数k，不失一般性，可以取k＝1。

[0030] 发明优点

[0031] 相干激光雷达最近几年经过了比较快的发展，已具有了广泛的数据可做进一步研

究。但总体而言，相干激光雷达应用仍处于商业发展初期，相干激光雷达已有研究的着重点，基本聚焦于对相干系统硬件性能的改进、不同测风模式的开发、风场测量结果的整合处理等方面，并未对相干回波中隐藏的大气信息进行提取分析。本发明将常规相干激光雷达所忽略的信息充分利用，基于相干雷达对风测量中的计算流程，应用其中的中间处理数据，用谱强度数据来等效成大气回波强度，再用大气回波的反演方法计算大气气溶胶，从而实现了基于相干激光雷达谱强度数据的大气气溶胶的测量，不但扩展了相干激光雷达的测量功能，也为后续的研究打下基础。

[0032] 由于相干激光雷达的探测原理，大气远场弱信号同本振信号拍频获取远场回波数据。相干激光雷达可利用较强的本振信号有效提升远场信号信噪比，相比传统气溶胶激光雷达对远场信号的探测更加精确。

[0033] 相干雷达系统光学部件多采用成熟的集成化模块，系统本身稳定性和环境适应性相比传统的气溶胶雷达系统更有优势，更适合商业性的大范围推广。

附图说明

[0034] 图1是相干激光雷达谱强度图，

[0035] 横轴为点数，每100个点为一组，对应一个距离门的谱数据；纵轴为谱强度，对应距离门范围内最高点为对应距离门的谱强度数值。

[0036] 图2是通过图1的数据获取不同距离门的等效大气回波强度图。

[0037] 图3是本发明的流程图。

具体实施方式

[0038] 相干激光雷达的探测过程为激光本振信号同雷达回波信号在空间混频探测。其中，激光本振信号由激光种子源引出一束有一定强度的窄带宽信号。激光发射脉冲在大气中的回波由相同光学器件接收，然后同本振光一起在空间上完成混频，进而由探测器将光信号转化为电信号。

[0039] 其中，相干激光雷达系统本振信号为：

[0040] $$u_{od}(x,y,t) = A_{od}(x,y)\cdot exp[-j(2\pi f_{od}t + \varphi_{od})] \quad (1.1)$$

[0041] A_{od}为本振光振幅，φ_{od}为本振光相位，f_{od}为本振光频率；x、y为本振光分布的平面坐标信息，t对应时间信息；以上形式为复数的表示形式，其中实部代表实际的光波强度。

[0042] 雷达所接收回波信号强度表示为：

[0043] $$u_{sd}(x,y,t) = A_{sd}(x,y)\cdot exp[-j(2\pi f_{sd}t + \varphi_{sd})] \quad (1.2)$$

[0044] A_{sd}为信号光振幅，φ_{sd}为信号光相位，f_{sd}为信号光频率；x、y为回波分布的平面坐标信息，t对应时间信息。以上形式为复数的表示形式，其中实部代表实际的光波强度。

[0045] 两路信号在探测器上进行混频，光波矢量为：

[0046] $$u_d(x,y,t) = A_{od}(x,y)\cdot exp[-j(2\pi f_{od}t + \varphi_{od})] + A_{sd}(x,y)\cdot exp[-j(2\pi f_{sd}t + \varphi_{sd})] \quad (1.3)$$

[0047] 因此，探测器所探测到的光强为：

[0048] $$I_d(x,y,t) = |u_d(x,y,t)|^2 =$$

[0049] $$|u_{od}|^2+|u_{sd}|^2+2Re[u_{od}(x,y,t)*u_{sd}(x,y,t)]=I_{od}+I_{sd}+I_n \quad (1.4)$$

[0050] $I_{od}=|u_{od}|^2$

[0051] $I_{sd}=|u_{sd}|^2$

[0052] $I_n=2Re[u_{od}(x,y,t)*u_{sd}(x,y,t)]$

[0053] 其中，$u_{od}(x,y,t)*u_{sd}(x,y,t)$为两个复数相乘，Re表示取其中的实部作为实际强度的有效数值。

[0054] I_{od}及I_{sd}均为直流信号，因此可方便的滤除；而外差信号I_n为：

[0055] $$I_n=2\sqrt{I_{od}I_{sd}}cos(2\pi\Delta ft+\Delta\varphi) \quad (1.5)$$

[0056] $\Delta f=f_{od}-f_{sd}$ (1.6)

[0057] 其中，$\Delta\varphi$为初始相位差数值，Δf为多普勒频移信息，而I_n的峰值强度信息则包含了I_{sd}强度信号，可以用来反演气溶胶常数。

[0058] 光电探测器输出信号使用高速模拟数字采集卡(AD采集卡)，获得数字信号。光的传播速度确定，因此系统每个距离门内的一组数据进行FFT变化，获得不同径向高度对应的频率谱强度信号，如图1所示。FFT谱数据强度中，中心频率对应强度同$I_{od}I_{sd}$成正比，对应频率数值为Δf。

[0059] 相干激光雷达仅使用频率中心频率相比发射相干中心频率的差值Δf，用于反演风速；而对应频率的强度信息则含有大气回波的信号I_{sd}与本振光强度I_{od}。

[0060] 根据以上分析，提取出的不同距离中心频率强度为本振光信号强度同回波信号强度的乘积。而本振光强度稳定，因此变化后的谱强度信息对应了普通激光探测的回波信号。同时，由于本振光强度较大，对应谱强度信号信噪比较高，利用谱强度数据进行大气探测，系统探测距离及准确度相比普通激光雷达方法，优势明显，也具有充分的可靠性，接下来的主要工作就是如何采用准确的算法利用好这些数据来实现大气气溶胶的测量。

[0061] 对于相干激光雷达获得的谱强度数据，首先提取出对应距离门的最大谱强度信号，经足够的时间累积平均，获取大小相合激光雷达方程的信号。

[0062] 设获得的谱中心强度数据为F(h)，则与实际大气参数之间关联性如下：

[0063] $$F(h)=A\cdot K\cdot\frac{1}{h^2}[\beta_{aer}(h)+\beta_{mol}(h)]\times exp\left\{-2\int_0^h[\alpha_{aer}(\xi)+\alpha_{mol}(\xi)]\,d\xi\right\} \quad (2.1)$$

[0064] 其中，A为谱强度数据同回波强度转换的比例关系，为定值；K为系统常数；h为对应的高度；$\beta_{aer}(h)$及$\beta_{mol}(h)$分别为大气分子后向散射系数及气溶胶后向散射系数；$\alpha_{aer}(\xi)$及$\alpha_{mol}(\xi)$分别为大气分子消光系数及气溶胶消光系数，ξ表示高度值。

[0065] 获取的谱强度数据可对应激光雷达方程，参照一般的气溶胶反演方法进行反演。且相比普通的气溶胶激光雷达，谱强度数据信噪比较大，探测距离及精度有明显优势。

[0066] 对于后向散射系数为β(h)，消光系数为α(h)，有以下公式：

[0067] $\beta(h)=\beta_{aer}(h)+\beta_{mol}(h)$ (2.2)

[0068] $\alpha(h)=\alpha_{aer}(h)+\alpha_{mol}(h)$ (2.3)

[0069] 谱强度信号进行距离校正后为X(h)，

[0070] $$X(h)=F_n(h)\cdot h^2=AK\beta(h)exp\left[-2\int_0^h\alpha(\xi)\,d\xi\right] \quad (2.4)$$

[0071] 对公式2.4取对数得：

[0072] $$lnX(h) = ln[AK\beta(h)] - 2\int_0^h \alpha(\xi)\,d\xi \qquad (2.5)$$

[0073] 对公式2.5取微分：

[0074] $$\frac{d[lnX(h)]}{dz} = \frac{1}{\beta(h)} \cdot \frac{d\beta(h)}{dh} - 2\alpha(h) \qquad (2.6)$$

[0075] 在大气回波的特性中，后向散射系数同消光系数之间存在一定的对应关系，以如下公式进行表示：

[0076] $\beta(h) = \alpha^k(h)/S_1$ (2.7)

[0077] S_1为消光后向散射比，k与激光发射波长、气溶胶离子特性相关，0.67≤k≤1，一般取k＝1；

[0078] 将公式2.7带入2.6，

[0079] $$\frac{d[lnX(h)]}{dz} = \frac{k}{\alpha(h)} \cdot \frac{d\alpha(h)}{dz} - 2\alpha(h) \qquad (2.8)$$

[0080] 利用伯努利方程的求解方法，求解公式2.8中的α(h)，可得如下两种情况：

[0081] $$\alpha_b(h) = \frac{exp\{[lnX(h) - lnX(h_f)]/k\}}{\frac{1}{\alpha(h_f)} + \frac{2}{k}\int_{h_f}^{h} exp\{[lnX(h') - ln\ (h_f)]/k\}dh'} \qquad (2.9)$$

[0082] $$\alpha_f(h) = \frac{exp\{[lnX(h) - l\quad (h_b)]/k\}}{\frac{1}{\alpha(h_b)} - \frac{2}{k}\int_{h_b}^{h} exp\{[lnX(h') - lnX(h_f)]/k\}dh'} \qquad (2.10)$$

[0083] 式2.9为后向积分式，$\alpha(h_f)$为边界条件；式2.10为前向积分式，$\alpha(h_b)$为边界条件；边界条件$\alpha(h_f)$和$\alpha(h_b)$的求取，可以假设某一范围内大气均匀并利用斜率法得到。

[0084] 当高度大于等于h_f时，大气消光系数α(h)计算结果取$\alpha_f(h)$；

[0085] 当高度小于h_b时，大气消光系数α(h)计算结果取$\alpha_b(h)$；

[0086] 结合以上的计算结果，即可获取不同高度的完整大气消光系数廓线。

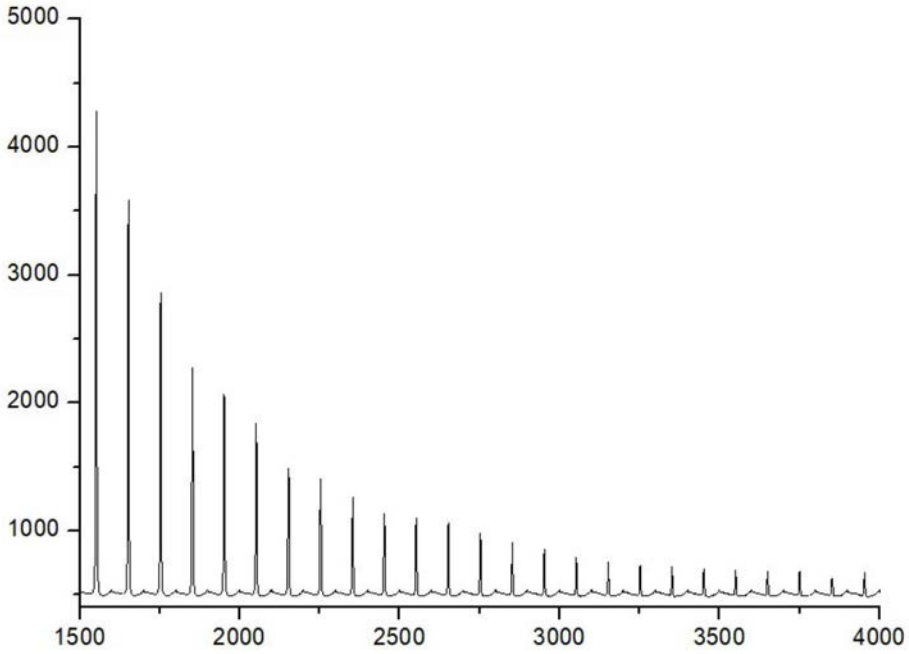

5000
4000
3000
2000
1000
1500
2000
2500
3000
3500
4000

图1

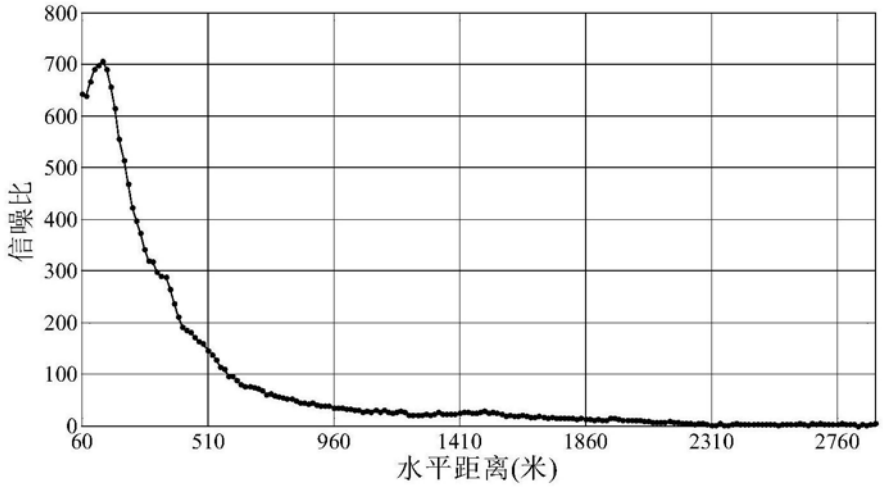

800
700
600
500
400
300
200
100
0
信噪比
60
510
960
1410
1860
2310
2760
水平距离(米)

图2

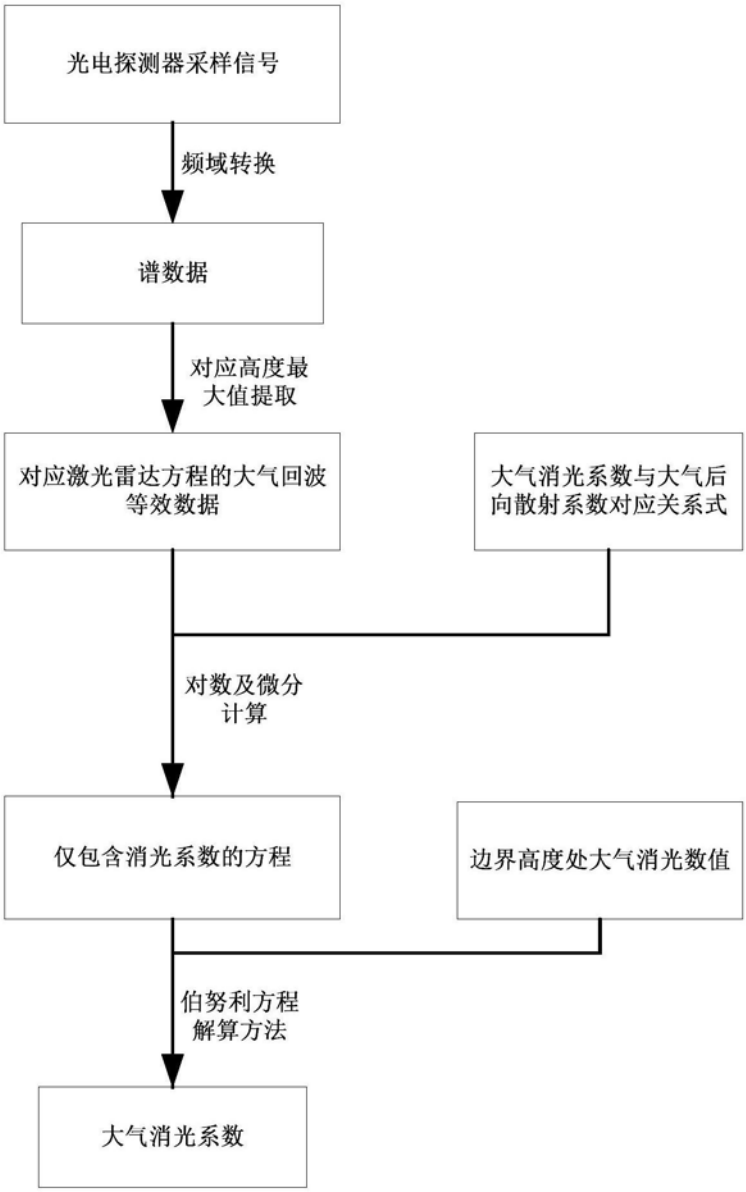

光电探测器采样信号
频域转换
谱数据
对应高度最大值提取
对应激光雷达方程的大气回波等效数据
大气消光系数与大气后向散射系数对应关系式
对数及微分计算
仅包含消光系数的方程
边界高度处大气消光数值
伯努利方程解算方法
大气消光系数

图3