

考虑多次散射的卷云几何特征和光学特性反演方法

熊兴隆, 刘雯菁, 符超, 蒋立辉

(中国民航大学 天津市智能信号与图像处理重点实验室, 天津 300300)

摘要: 研究了考虑多次散射的卷云几何特征和光学特性反演方法, 对反演卷云高度和卷云激光雷达比的方法进行了改进。采用多次散射因子对卷云消光系数曲线进行修正, 选取云底及云顶附近高度消光系数变化率的均值求解云层高度修正误差, 对微分零交叉法求解得到的卷云高度进行修正, 实现了较为精确的激光雷达云层高度反演。采用以边界值处消光系数和卷云光学厚度为约束条件的粒子群算法, 求解卷云有效激光雷达比, 选用半解析 Monte Carlo 方法, 计算总散射信号与一次散射信号的比值, 并结合 Platt 多次散射因子方程求得多次散射因子, 实现了卷云激光雷达比的准确求解。使用 Mie 散射激光雷达真实回波信号进行了验证。结果表明, 该改进方法具有较高的精度, 更具应用价值。

关键词: 卷云几何特征; 卷云光学特性; Mie 散射激光雷达; 多次散射

中图分类号: TN958.98 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)09-2734-08

A novel method of retrieving the geometrical and optical properties of cirrus cloud considering multiple scattering

Xiong Xinglong, Liu Wenqing, Fu Chao, Jiang Lihui

(Key Laboratory for Advanced Signal Processing, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: The geometrical and optical properties of cirrus cloud with multiple scattering were studied and the retrieval methods of cirrus height and lidar ratio were improved. An approach was proposed for determining cirrus height based on multiple scattering factors and the extinction coefficients of cirrus were corrected by the factors. With multiple scattering factors and the extinction coefficients, the error of the cirrus-height was computed. Finally, the precise lidar cloud detection retrieval was achieved preliminarily. In the improved method of retrieving the lidar ratio with multiple scattering, the nonlinear equations with cirrus lidar ratio and cirrus extinction coefficient as variables were constructed, and the particle swarm optimization algorithm was used to solve the equations, the extinction coefficient of the cirrus's top and the lidar ratio of cirrus clouds were acquired. Then, through the PLATT's multiple scattering equation and the ratio of total scattering and signal scattering calculated by semi-analytic Monte Carlo method, the lidar ratio was obtained. The experiment was carried on based on the proposed method, using the real return signals of the ground-based lidar. It is turned out that the proposed technique has the advantages of

收稿日期: 2015-01-05; 修订日期: 2015-02-03

基金项目: 国家 973 计划(2010CB731801); 国家自然科学基金(60879016)

作者简介: 熊兴隆(1962-), 男, 教授, 硕士生导师, 主要从事信号与信息处理、激光雷达气象探测方面的研究。

Email: xx_long@126.com

high accuracy. Therefore, it has a promise future.

Key words: geometrical properties of cirrus cloud; optical properties of cirrus cloud;
Mie scattering lidar; multiple scattering

0 引言

大气中的卷云是由于天气系统的抬升作用或湿空气的深度对流形成的,一般分布在对流层上部到平流层下部,是一种光学性质特殊的气溶胶,对天气和气候有重要的影响^[1]。激光雷达^[2-3]具有探测距离远、时空分辨率高等特点,是探测卷云几何特征和光学特性强有力的工具。为了利用激光雷达回波信号准确反演卷云高度和卷云激光雷达比,国内外学者进行了大量的研究工作,迄今为止,已经发展了多种反演方法。在卷云光学厚度小于1时,不需要考虑多次散射影响,在此情况下,反演卷云高度的方法有微分零交叉法^[4]和记忆式滑动窗口积分算法^[5],以及峰值面积积分法^[6]。反演卷云激光雷达比的方法有以光学厚度为约束条件的穷举搜索法^[7],以及以云底消光系数和卷云光学厚度为约束条件的标准粒子群法^[8]。当卷云光学厚度大于1时,必需考虑多次散射的影响,在此情况下,Xiong^[9]提出了考虑多次散射影响的卷云高度反演方法。该方法采用多次散射因子对消光系数曲线进行校正,选取云底和云顶高度处的消光系数变化率求解修正误差,进而得到精确的云层高度信息。但该方法对云底和云顶高度处消光系数变化率较敏感,若两点处的消光系数变化率稍有偏差,将会造成很大的误差。王瑾等^[10]以光学厚度为约束条件,采用穷举搜索法迭代反演卷云的有效激光雷达比,再结合Chen^[11]提出的多次散射因子方程,求出卷云的激光雷达比。但该方法所用求解多次散射因子的方程仅以光学厚度为变量,是一个简化方程,精度较低。

文中对考虑多次散射的卷云几何特征和光学特性反演方法进行了研究,并对反演卷云高度和卷云激光雷达比的方法进行了改进。采用多次散射因子对卷云消光系数曲线进行修正,选取云底及云顶附近高度的消光系数变化率的均值代替云底及云顶高度点的消光系数变化率,求解云层高度修正误差,进而求解云底及云顶高度。该方法减小了修正误差对两点处的消光系数变化率的依赖性,避免了由于云

层内部消光系数抖动严重造成的误差,使结果更加稳定,保证了较高的精度。采用以边界值处消光系数和卷云光学厚度为约束条件的粒子群算法,求解卷云有效激光雷达比,选取半解析 Monte Carlo^[12-13]方法和 Platt^[14]多次散射因子方程相结合计算出的多次散射因子代替 Chen 提出的仅以光学厚度为变量的多次散射因子方程计算出的多次散射因子,进而求解卷云激光雷达比。该方法计算的多次散射因子更加准确,保证了卷云激光雷达比较高的精度。使用中国科学院安徽光学精密机械研究所地基双波长 Mie 散射激光雷达(DWL)探测得到的真实回波信号数据对上述方法进行了实验验证。

1 卷云几何特征的确定

1.1 微分零交叉法确定卷云高度

激光雷达回波信号强度 $P(z)$ 主要取决于气溶胶和云的后向散射系数和消光系数。由于云的后向散射系数远大于气溶胶,所以当激光在大气中传输遇到云时, $P(z)$ 将出现迅速增大的突变信号。文中采用微分零交叉法确定卷云高度,基本思想是先对回波信号 $P(z)$ 进行微分,然后寻找微分信号的零点位置,第一个零点位置是由几何重叠因子引起的,并不判断为云。微分零点由负变正的零点附近的谷值回波信号处判断为云底 z_b , 云顶 z_t 是 $P(z) \cdot z^2 < P(z_b) \cdot z_b^2$ 的零点位置。

1.2 卷云高度误差校正

通常卷云中的气溶胶粒子浓度较大,多次散射效应较严重,多次散射的影响不可忽略,此时的多次散射激光雷达方程表示为:

$$P(z) = Cz^{-2} [\beta_a(z) + \beta_m(z) + \beta_c(z)] \exp\{-2 \int_0^z [\sigma_a(z') + \sigma_m(z')] dz'\} \exp\{-2 \int_{z_b}^z \eta(z') \sigma_c(z') dz'\} \quad (1)$$

式中: $P(z)$ 表示高度 z 处的大气后向散射回波信号; C 表示激光雷达系统常数,它与激光的初始能量,系统的光学效率,望远镜的有效接收面积和探测器的

量子效率有关; $\beta_m(z)$ 、 $\beta_s(z)$ 和 $\beta_c(z)$ 分别表示高度 z 处大气分子、气溶胶粒子和卷云的后向散射系数; $\sigma_m(z')$ 、 $\sigma_s(z')$ 和 $\sigma_c(z')$ 分别表示高度 z 处大气分子、气溶胶粒子和卷云的消光系数, z_b 表示卷云的云底高度。 η 表示卷云的多次散射因子, 在卷云之外时, 不考虑多次散射的影响取值为 1, 在卷云内部时取值小于 1。由于多次散射的影响, 考虑与未考虑多次散射影响求解得到的消光系数曲线有很大差异, 卷云内部考虑多次散射求解得到的消光系数值比未考虑时的值大, 如图 1 所示。

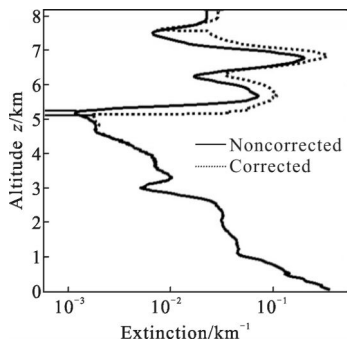


图 1 卷云消光系数曲线

Fig.1 Extinction coefficients profiles of cirrus cloud

图 1 中, 虚线表示多次散射修正的卷云消光系数曲线, 实线表示未经多次散射修正的消光系数曲线。由此可以看出, 修正后的卷云内部消光系数廓线比未修正的值明显偏大, 而且消光系数廓线明显展宽。卷云内部激光雷达回波信号的强度主要取决于云的后向散射系数和消光系数, 消光系数曲线变化必然引起微分零交叉法计算得到的云底及云顶高度变化。图 1 中, 多次散射修正的云底高度明显比未修正的云底高度值小, 并且云底高度误差达到几百米。因此对于多次散射现象较严重的卷云高度的求解, 必须采用云高误差几何修正模型对云层高度进行修正, 如图 2 所示。

图 2 中实线和虚线分别表示未修正和修正的卷云消光系数曲线, Δ 表示修正误差函数。根据几何修正模型得到的云底高度和云顶高度的修正误差函数见公式(2)。

$$\begin{cases} \Delta_b = -\frac{\eta \left(\frac{\sigma(z_b)}{\eta} - \sigma(z_b) \right)}{\frac{d\sigma(z)}{dz}} \quad (z=z_b) \\ \Delta_t = -\frac{\eta \left(\frac{\sigma(z_t)}{\eta} - \sigma(z_t) \right)}{\frac{d\sigma(z)}{dz}} \quad (z=z_t) \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\sigma(z_b)$ 表示云底消光系数; $\sigma(z_t)$ 表示云顶消光系数; Δ_b 表示多次散射影响下的云底高度修正误差; Δ_t 表示多次散射影响下的云顶高度修正误差; $\frac{d\sigma(z)}{dz}$ 表示消光系数变化率。修正后的云底和云顶高度计算公式如下:

$$\begin{cases} z_b' = z_b - \Delta_b \\ z_t' = z_t + \Delta_t \end{cases} \quad (3)$$

式中: z_b' 和 z_t' 分别表示修正后的云底和云顶高度。

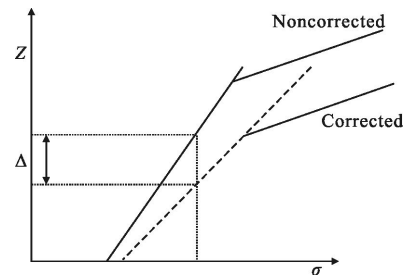


图 2 多次散射影响下云高误差几何修正模型

Fig.2 Geometric diagram of the error Δ of cirrus height caused by multiple scattering

通常卷云中的气溶胶粒子浓度较大, 多次散射影响不可忽略, 利用上述几何误差修正模型, 可以计算出多次散射影响的云底和云顶高度的修正误差 Δ_b 和 Δ_t 。由公式(2)可以看出修正误差对于云底和云顶高度处的消光系数变化率比较敏感。为了减小修正误差对云底及云顶高度处的消光系数变化率的依赖性, 文中对公式(2)中云底及云顶高度校正误差函数做了改进, 选取云底及云顶附近高度的消光系数变化率的均值代替云底及云顶高度点的消光系数变化率。

当多次散射不严重时, 多次散射因子接近 1, 此时计算出的修正前的云层高度和修正后的云层高度几乎一致; 当多次散射效应严重时, 多次散射因子较小, 此时计算出的修正前的云层高度和修正后的云层高度差别较大。符合实际情况, 证明上述方法是有效可行的。

2 卷云光学特性的确定

卷云激光雷达比作为粒子散射的光学特性, 是激光雷达方程中两个重要的未知参数之一, 在反演云的消光系数和光学厚度时, 对卷云激光雷达比的取值非常敏感。文中考虑多次散射影响的反演卷云

激光雷达比改进方法的具体思路是:先构建非线性方程组,其次采用非线性粒子群算法求解非线性方程组得到卷云的有效激光雷达比 F ,然后计算出激光雷达比 S_c 。

2.1 卷云激光雷达比的求解

选取云层下方区域 $P(z)z^2/\beta_m(z)$ 最小值处的高度为第一边界点 z_c ,根据微分零交叉法方法求解云底高度 z_b 和云顶高度 z_t 。假设这 3 个高度点的消光系数值分别为 X_1, X_2, X_3 ,卷云的有效激光雷达比为 X_4 。采用不动点原理^[15]求取 z_c 处的消光系数值即边界值

$$D \left[\left[\int_0^{z_c} \frac{\exp[S(z)-S(z_c)]}{\frac{1}{X_1} + 2 \int_z^{z_c} \exp[S(z')-S(z_c)]dz'} dz + \int_0^{z_c} \frac{\exp[S(z)-S(z_c)]}{\frac{1}{X_1} + 2 \int_z^{z_c} \exp[S(z')-S(z_c)]dz'} dz \right]^2 \right] = X_1 \quad (4)$$

$$X_1 = -S_a \sigma_m(z_c)/S_m + \frac{S(z_c) \cdot \exp(2S_d/S_m - 1) \cdot \int_0^{z_c} \sigma_m(z') dz'}{S(z_b)/[X_2 + S_a \sigma_m(z_b)/S_m] + 2 \int_z^{z_b} S(z) \cdot \exp(2(S_d/S_m - 1) \cdot \int_z^{z_b} \sigma_m(z') dz') dz} \quad (5)$$

$$X_2 = -X_4 \sigma_m(z_b)/S_m + \frac{S(z_b) \cdot \exp(2(X_4/S_m - 1) \cdot \int_z^{z_b} \sigma_m(z') dz')}{S(z_t)/[X_3 + X_4 \sigma_m(z_t)/S_m] + 2 \int_z^{z_t} S(z) \cdot \exp(2(X_4/S_m - 1) \cdot \int_z^{z_t} \sigma_m(z') dz') dz} \quad (6)$$

$$-\ln[(P_t z_t^2 / P_b z_b^2)^{1/2}] = \int_{z_b}^{z_t} \left[-X_4 \sigma_m(z)/S_m + \frac{S(z) \cdot \exp(2(X_4/S_m - 1) \cdot \int_0^z \sigma_m(z') dz')}{S(z_t)/[X_3 + X_4 \sigma_m(z_t)/S_m] + 2 \int_z^{z_t} S(z) \cdot \exp(2(X_4/S_m - 1) \cdot \int_z^{z_t} \sigma_m(z') dz') dz} \right] dz \quad (7)$$

2.2 消光系数曲线的求解

由于多次散射对于后向散射系数影响不大,但对于消光系数的影响较大。所以必须对云层中的消光系数曲线进行修正,文中采用改进的 Fernald 后向积分法反演消光系数,即云层部分采用求解得到的多次散射影响的有效激光雷达比 F 反演云层部分消光系数,而非云层部分采用默认的激光雷达比 50 反演云层外部的消光系数。

3 多次散射因子的求解

多次散射因子是描述多次散射现象的重要参量。在非云层部分不考虑多次散射的影响,多次散射因子为 1。在云层部分,多次散射较严重,此时多次散射因子较小,在反演多次散射的卷云几何特征和光学特性时,多次散射因子的求解至关重要。文中采用半解析 Monte Carlo 方法计算总散射信号与一次散射信号的比值,然后结合 Platt 多次散射因子方程

X_1 , 方程如公式(4)。公式(4)中, $S(z)=P(z)z^2, D=S(z_c)/\int_0^{z_c} S(z)dz$; 选取 z_b 为第二边界点,采用 Fernald^[16]后向积分法构建方程求解消光系数 X_1 , 方程如公式(5)。公式(5)中, $\sigma_m(z)$ 为空气分子消光系数,根据 Rayleigh 散射理论得到; S_m 取值为 $8\pi/3$; S_a 表示气溶胶激光雷达比,取值为 50。选取 z_t 为第三边界点,采用 Fernald 后向积分法构建方程求解消光系数 X_2 , 再用改进的 Fernald 后向积分法求解卷云消光系数,对其积分求卷云光学厚度,方程如公式(7)。通过卷云的有效激光雷达比 F 可以计算激光雷达比 S_c , 其中 $S_c=F/\eta$ 。

求解得到多次散射因子。

3.1 总散射与一次散射信号比值的求解

根据传输介质的光学性质、激光雷达的系统参量,以及大气消光分布情况,利用半解析 Monte Carlo 方法研究光在随机介质中的传输。通过对大量光子的行为进行跟踪,每次散射前对光子进行判决,光子终止的条件为:(1)当光子在接收视场外时,停止对其的跟踪,(2)达到最大散射次数,光子终止。模拟计算出光子经过每一次散射后到达探测器的几率。光子的每次碰撞对回波信号都有贡献,光子经过每一次散射直接到达接收机的概率,

$$P_n = \frac{P_n(\theta)\Delta\Omega}{4\pi} \exp\left[-\sigma\left(r_n + \sum_{i=1}^n l_n\right)\right] \quad (8)$$

式中: $P_n(\theta)$ 为散射相函数; l_n 为第 n 次散射的自由路程; r_n 为光子在散射介质中直接到达接收机的距离; $\Delta\Omega$ 为接收机的立体角。整个散射体积内接收到的总散射信号由所有散射得到的几率求和得到^[17-18]。最后

求解出回波信号中总散射信号与单次散射信号的比值。模拟过程中的参数参考表 1。

表 1 蒙特卡洛模拟过程中的参数

Tab.1 Parameters for Monte Carlo simulation

Parameters	Value
Wavelength/nm	532
Receiver full FOV/mrad	0.05
Beam divergence angle/mrad	0.3
Telescope receiver area/m ²	1
Photo number/m	105
Phase function	Henyeey-Greenstein
Single scatter albedo	1
Pulse energy/mJ	180
Max scattering order	6

3.2 多次散射因子的求解

将半解析 Monte Carlo 方法求解出的总次散射与一次散射信号的比值,结合 Platt 多次散射因子方程求解多次散射因子。Platt 多次散射因子方程如下式:

$$\begin{cases} \eta(z) = 1 - \frac{\ln(\text{MSS})}{2\delta(z)} \\ \delta(z) = - \int_{z_0}^z \sigma(z') dz' \end{cases} \quad (9)$$

式中: MSS 表示总散射信号与单次散射信号的比值; $\eta(z)$ 为多次散射因子,该值取决于云高、相函数和望远镜孔径大小等因素。

4 实验验证

采用中国科学院安徽光学精密机械研究所地基双波长 Mie 散射激光雷达探测得到的真实回波信号数据,对文中改进方法进行了实验验证。

4.1 低空卷云

图 3 给出了激光雷达探测得到的低空卷云真实回波信号。图 4 为低空卷云的局部放大信号。图 5 为通过半解析 Monte Carlo 方法计算得到的低空卷云的多次散射与一次散射的比值。图 6 为计算得到的低空卷云的多次散射因子。图 7 为低空卷云激光雷达比。图 8 为反演得到的低空卷云消光系数曲线。对图 3 信号进行反演,得到边界点高度为 4.68 km,微

分零交叉法得到云底高度为 5.43 km, 云顶高度为 6.42 km。求解得到的消光系数边界值为 0.013, 云底消光系数为 0.015, 云顶消光系数为 0.021, 卷云的有效激光雷达比为 26.03。多次散射影响下的云底高度修正误差为 0.005 km, 云顶高度修正误差为 0.006 km。修正后的云底高度为 5.425 km, 云顶高度为 6.426 km。未改进方法计算得到的云底高度为 5.418 km, 云顶高度为 6.422 km。原算法与改进的方法云底高度相差 0.007 km, 云顶高度相差 0.004 km。

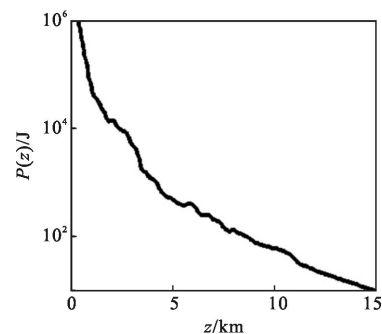


图 3 激光雷达回波信号(低空卷云)

Fig.3 Return signal of lidar(low cirrus clouds)

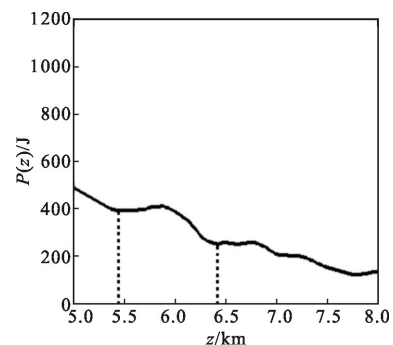


图 4 局部放大信号(低空卷云)

Fig.4 Locally amplified signal(low cirrus clouds)

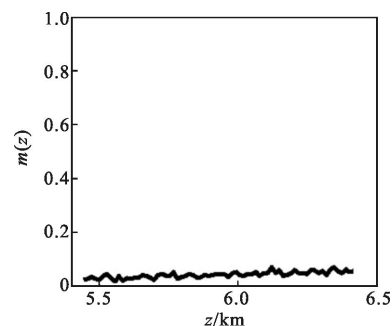


图 5 多次散射与一次散射的比值(低空卷云)

Fig.5 Ratio of multiple scattering to single scattering (low cirrus clouds)

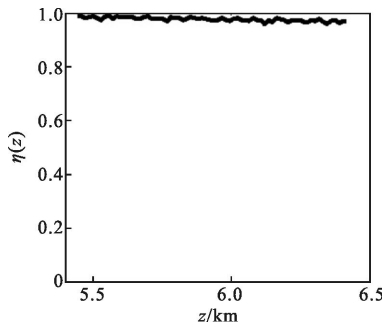


图 6 多次散射因子(低空卷云)

Fig.6 Multiple scattering factors (low cirrus clouds)

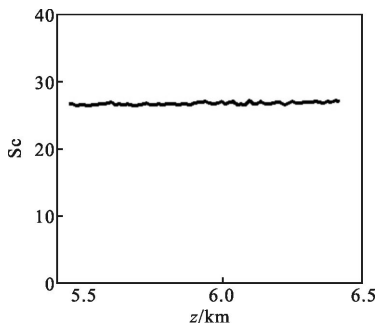


图 7 激光雷达比(低空卷云)

Fig.7 Lidar ratios (low cirrus clouds)

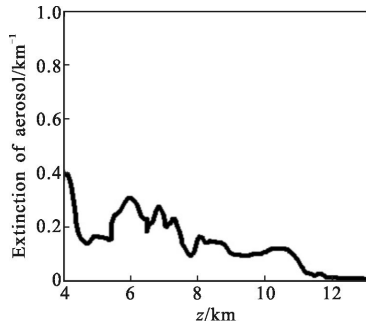


图 8 消光系数曲线(低空卷云)

Fig.8 Extinction coefficient (low cirrus clouds)

4.2 高空卷云

图 9 给出了激光雷达探测得到的高空卷云真实回波信号。图 10 为高空卷云的局部放大信号。图 11 为通过半解析 Monte Carlo 方法计算得到的高空卷云的多次散射与一次散射的比值。图 12 为计算得到的高空卷云的多次散射因子。图 13 为高空卷云激光雷达比。图 14 为反演得到的高空卷云消光系数曲线。对图 9 信号进行反演,得到边界点为 5.07 km。微分零交叉法得到云底高度为 11.58 km, 云顶高度为

13.89 km。求解得到的消光系数边界值为 0.042, 云底消光系数为 0.031, 云顶消光系数为 0.043, 卷云有效激光雷达比为 40.69。多次散射影响下的云底高度修正误差为 0.25 km, 云顶高度修正误差为 0.13 km。修正后的云底高度为 11.35 km, 云顶高度为 14.03 km。未改进方法计算得到的云底高度为 11.37 km, 云顶高度为 13.98 km。原算法与改进的算法云底高度相差 0.02 km, 云顶高度相差 0.05 km。

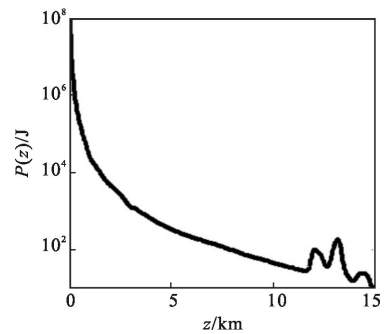


图 9 激光雷达回波信号(高空卷云)

Fig.9 Return signal of lidar (high cirrus clouds)

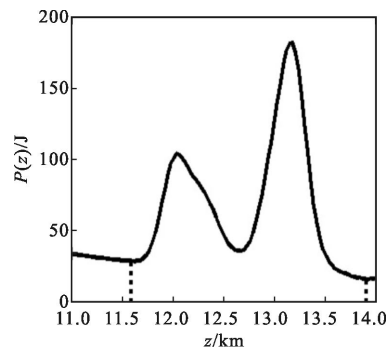


图 10 局部放大信号(高空卷云)

Fig.10 Locally amplified signal (high cirrus clouds)

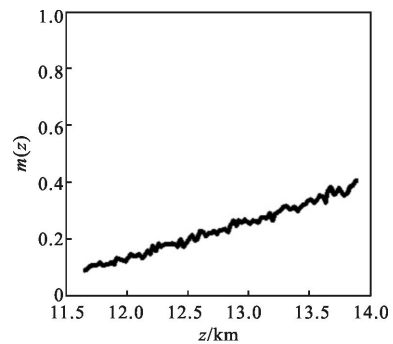


图 11 多次散射与一次散射的比值(高空卷云)

Fig.11 Ratio of multiple scattering to single scattering (high cirrus clouds)

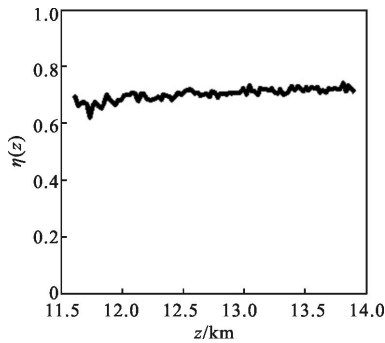


图 12 多次散射因子(高空卷云)

Fig.12 Multiple scattering factors(high cirrus clouds)

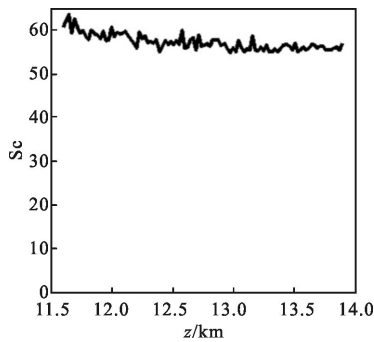


图 13 激光雷达比(高空卷云)

Fig.13 The lidar ratios(high cirrus clouds)

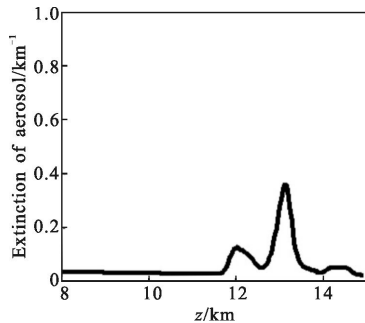


图 14 消光系数曲线(高空卷云)

Fig.14 Extinction coefficient (high cirrus clouds)

4.3 结果分析

将文中改进方法与原方法进行比较。计算结果表明:改进的求解卷云高度的方法对云底及云顶高度处的消光系数变化率依赖性更小,所得云层高度信息更准确。同时多次散射因子的值与卷云光学厚度和云层高度等因素有关。改进的求解卷云激光雷达比的方法中,多次散射因子不仅仅取决于卷云光学厚度,所得结果更加可靠。当多次散射较严重时,多次散射因子较小,修正与未修正的卷云高度误差逐渐增大。文中求解多次散射的卷云几何特征和光学特性的改进方法具有以下优点:

(1) 选取云底及云顶附近高度消光系数变化率的均值代替云底及云顶高度处的消光系数变化率求解多次散射卷云高度修正误差。避免了消光系数曲线抖动较严重造成的计算误差,使计算结果更加稳定,保证了较高的精度。

(2) 选取半解析 Monte Carlo 方法计算多次散射与一次散射的比值,克服了 Monte Carlo 方法耗时的缺点,提高运算速度的同时保证了精度。结合 Platt 多次散射因子方程计算多次散射因子,计算出的多次散射因子精度更高,进而得到的卷云激光雷达比更准确。

(3) 通过 Fernald 后向积分法反演云层区域消光系数。反演过程中激光雷达比的取值选用文中计算出的多次散射影响下的卷云有效激光雷达比,反演出的消光系数曲线更加符合实际大气。

5 结论

针对多次散射的卷云几何特征和光学特性研究,给出了考虑多次散射的反演卷云高度和卷云激光雷达比的改进方法。对真实卷云回波信号做了实验验证,结果表明,该改进方法能够较为可靠的反演出回波信号中的云层信息,得到卷云高度值和卷云激光雷达比,具有很高的应用价值。

参考文献:

- [1] Cao Yanan, Chen Xiuhong, Wei Heli. Study of the effects of cirrus altitude on the atmospheric infrared spectral radiation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41 (8): 1965-1970. (in Chinese)
曹亚楠, 陈秀红, 魏合理. 卷云高度对大气的红外光谱辐射影响的研究 [J]. 红外与激光工程, 2012, 41(8): 1965-1970.
- [2] Xiong Xinglong, Jiang Lihui, Feng Shuai. Return signals processing method of Mie scattering lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(1): 89-95. (in Chinese)
熊兴隆, 蒋立辉, 冯帅. Mie 散射激光雷达回波信号处理方法 [J]. 红外与激光工程, 2012, 41(1): 89-95.
- [3] Xiong Xinglong, Jiang Lihui, Feng Shuai, et al. Constructing and solving the nonlinear equation for determining the boundary value of the extinction coefficient for atmospheric aerosol in lower atmosphere [J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2012, 23(7): 1356-1362. (in Chinese)

- 熊兴隆, 蒋立辉, 冯帅, 等. 非线性方程法确定低空探测机载激光雷达消光系数边界值 [J]. *光电子·激光*, 2012, 23(7): 1356–1362.
- [4] 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): 3097–3012. (in Chinese)
毛飞跃, 龚威, 李俊, 等. 基于改进微分零交叉法的米散射激光雷达云检测与参数反演 [J]. *光学学报*, 2010, 30(11): 3097–3012.
- [5] Han Daowen, Liu Wenqing, Zhang Yujun, et al. Memorable glide window integral algorithm for retrieving cloud height [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, 20(1): 1–5. (in Chinese)
韩道文, 刘文清, 张玉钧, 等. 用于反演云层高度的记忆式滑动窗口积分法[J]. *强激光与粒子束*, 2008, 20(1): 1–5.
- [6] Yang Chengwu, Liu Wenqing, Zhang Yujun. Peak and area integral algorithm for retrieving cloud-base height [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(10): 2848–2852. (in Chinese)
杨成武, 刘文清, 张玉钧. 用于反演云底高度的峰值面积积分法[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(10): 2848–2852.
- [7] Shi Bo, Nie Miao, Ma Xiaomin, et al. Lidar measurement of cirrus clouds lidar ratio [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2012, 7(1): 1–5. (in Chinese)
史博, 聂淼, 麻晓敏, 等. 卷云消光后向散射比的激光雷达测量[J]. *大气与环境光学学报*, 2012, 7(1): 1–5.
- [8] Zhang Yayi, Zhao Yifei. A novel method of determining the lidar ratio in cirrus clouds [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2013, 24(9): 1768–1773. (in Chinese)
张亚宜, 赵焱飞. 反演卷云激光雷达比的新方法[J]. *光电子·激光*, 2013, 24(9): 1768–1773.
- [9] Xiong Xinglong, Li Meng, Jiang Lihui, et al. A method for determining cirrus height with multiple scattering[J]. *Chinese Optics Letters*, 2013, 11(10): 100101.
- [10] Wang Jin, Zhang Lei, Wang Hongbin, et al. Lidar observations of spatial and temporal variations of cirrus clouds over semi-arid areas in Northwest [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2013, 30(1): 66–72. (in Chinese)
王瑾, 张镭, 王宏斌, 等. 西北半干旱区激光雷达探测卷云几何特征和光学厚度[J]. *量子电子学报*, 2013, 30(1): 66–72.
- [11] Chen W N, Chiang C W, Nee J B. Lidar ratio and depolarization ratio for cirrus clouds [J]. *Applied Optics*, 2002, 41(30): 6470–6476.
- [12] Cai Weiwei, Ma Lin. Improved Monte Carlo model for multiple scattering calculations [J]. *Chinese Optics Letters*, 2012, 10(1): 012901.
- [13] Wang Hongxia, Zhu Youzhang, Tian Tao, et al. Characteristics of laser transmission in different types of aerosols[J]. *Acta Phys Sin*, 2013, 62(2): 024214–1:10. (in Chinese)
王红霞, 竹有章, 田涛, 等. 激光在不同类型气溶胶中传输特性研究[J]. *物理学报*, 2013, 62(2): 024214–1: 10.
- [14] Platt C M R, Wnker D M. Multiple scattering effects in clouds observed from lite [C]//SPIE, 1995, 2580: 60–71.
- [15] Xiong Xinglong, Jiang Lihui, Feng Shuai, et al. Determination method of atmospheric aerosol extinction coefficient boundary value based on fixed point principle[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2012, 23(2): 303–309. (in Chinese)
熊兴隆, 蒋立辉, 冯帅, 等. 基于不动点原理的大气气溶胶消光系数边界值确定方法 [J]. *光电子·激光*, 2012, 23(2): 303–309.
- [16] Fernald F G. Analysis of atmospheric lidar observation: some comments[J]. *Appl Opt*, 1984, 23(5): 652–653.
- [17] Wahyu Widadal, Hideki KINJol, Hiroaki Kuzei, et al. Effect of multiple scattering in the lidar measurement of tropospheric aerosol extinction profiles [J]. *Optical Review*, 2001, 8(5): 382–387.
- [18] Winker D M, Poole L R. Monte-Carlo calculations of cloud returns for ground-based and space-based lidars [J]. *Applied Physics*, 1995, 60(4): 341–344.