

扫描激光雷达大气剖面消光系数优化求解

孙新会 张天舒 陆亦怀 王 伟 赵雪松

(中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031)

摘要 扫描激光雷达可以获取大气剖面,对于了解边界层与云的结构、污染物分布与输送有重要的作用。斜程扫描下,天顶角较大时传统 Fernald 和 Klett 消光系数反演方法不再适用,可采用经典两角度方法对激光雷达常数进行校正,进而获取大气消光系数。但经典两角度法求解雷达常数时存在多解问题,如何设定约束条件求取最优解是较难解决的问题。从经典两角度方法出发,在两条斜程上筛选出的大气缓变区域,假定水平均匀,通过线性回归的方法估算雷达常数,并采用一系列约束条件以求取雷达常数最优解,最终得到斜程扫描下消光系数分布,较好地解决了两角度测量中多解问题求解的困难。通过实验验证,即使在天顶角较大或者信号质量不是很好的情况下,消光系数反演依然能够获得较好的效果。结果表明,该方法能够很好地反映出大气的空间结构。

关键词 遥感; 激光雷达; 最优解; 约束条件; 大气消光系数

中图分类号 P412.25 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201441.0314001

Optimization Solution of Atmospheric Profile Extinction Coefficient by Scanning Lidar

Sun Xinhui Zhang Tianshu Lu Yihuai Wang Wei Zhao Xuesong

(Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China)

Abstract Scanning lidar can produce a profile image about atmosphere and play an important role in studying boundary layer, structure of cloud, distribution and transport of air pollution. However, traditional Fernald and Klett methods cannot be applied to the situation of large zenith angles. Usually, by using two-angle method, the lidar constant is corrected, and then atmospheric extinction coefficient is obtained. But this is a multiple-solution problem. It is difficult to optimize the solutions just by setting some relevant conditions. The atmospheric region between adjacent slant paths is basically horizontally uniform. The lidar constant is estimated by using linear regression in that region. Then the best lidar constant is optimized with relevant constraints. The atmospheric extinction coefficient is inverted. By theoretical simulated and measured data analysis, the inversion result is still very good even when the zenith angle is large and lidar signal quality is not very good. Results show that this method can display atmospheric structure very well.

Key words remote sensing; lidar; optimal solution; constraints; atmospheric extinction coefficient

OCIS codes 290.2200; 290.1090; 280.3640; 280.1100; 280.1120

1 引 言

扫描激光雷达可以实时、快速、大范围、高精度地监测大气污染,特别是对城市近地面层的大气污染状况监测具有独特优势。传统的激光雷达在利用 Fernald 方法反演时要求测量路径上存在一个近乎不含气溶胶的点来作为参考点,在斜程扫描中,尤其

对于角度偏离垂直方向较大时,Fernald 方法并不适用^[1-2]。

由于激光雷达方程中存在两个非独立参数,导致求解激光雷达方程时往往要求作出某种假设。在斜程扫描多角度测量中,亦不可避免。经典两角度反演方法往往假定大气水平均匀分布,即要求大气

收稿日期: 2013-09-13; 收到修改稿日期: 2013-10-11

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(XDB05040300)、国家重大科学仪器设备开发专项(2011YQ120024)

作者简介: 孙新会(1986—),男,硕士研究生,主要从事激光雷达技术方面的研究。E-mail: sunxinhui@foxmail.com

导师简介: 张天舒(1977—),男,博士,研究员,主要从事傅里叶变换红外光谱学技术等方面的研究。

E-mail: tszhang@aiofm.ac.cn

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

稳定分布,这种分布夜间出现可能性比较大,但近地面大气一般无法满足。这意味着同一高度的后向散射系数不变;或者假定光学厚度和天顶角有某种关系。更重要的是,对于系统测量误差,尤其是两斜程角度相差较小时,经典两角度方法极其敏感。实际状况是大气非均匀分层才是常态,尤其在边界层以内及云层形成的地方,因此经典两角度方法应用于实际大气时非常困难。本文对经典两角度结果取对数,通过求取激光雷达相对校正常数的方法来反演消光系数。但是从数学角度看,这是一个多解问题,如何采取多重约束条件对激光雷达进行优化求解是关键之处。该方法仅仅要求特定角度和局部大气水平分布均匀;而且允许作时空上的平均,从而有效地降低了局部不均匀和噪声的影响。

2 斜程扫描算法分析

为了求解消光系数必须对激光雷达方程进行特定必要的变形。

激光雷达方程的基本形式为

$$P(r) = C_0 T_0^2 \frac{\beta_{\pi,p}(r) + \beta_{\pi,m}(r)}{r^2} \times \exp\left\{-2 \int_{r_0}^r [\kappa_p(r') + \kappa_m(r')] dr'\right\}, \quad (1)$$

式中 $P(r)$ 为距离激光雷达 r 处大气介质的回波信号, $\beta_{\pi,p}(r)$ 和 $\beta_{\pi,m}(r)$ 分别为气溶胶和大气分子的后向散射系数, T_0^2 为激光雷达盲区总的透射率(r_0 为几何重叠因子刚好为 1 处), C_0 为激光雷达常数, $\kappa_p(r)$ 和 $\kappa_m(r)$ 分别为气溶胶和大气分子的消光系数。

在两角度方法基础上求对数,即 TALM,对于多角度测量,方程经过变形求解^[3]有

$$\ln\left[\frac{\kappa_{w,1}(h)}{\kappa_{w,2}(h)}\right] = \ln\left[\frac{Z_1(h)}{Z_2(h)}\right] - \ln\left[\frac{C_1 - 2I_1(h_1, h)}{C_2 - 2I_2(h_1, h)}\right], \quad (2)$$

式中下角标 1,2 分别对应两个角度, C_1 和 C_2 为激光雷达常数乘以总的透射率,称为激光雷达相对校正常数; h 为距离激光雷达 r 处大气介质的水平高度,表达式为 $r \cos \phi = h$, ϕ 为斜程对应的天顶角; κ_w 为合成消光系数,表达式为 $\kappa_w(h) = \kappa_p(h) + \frac{[\beta_{\pi,m}(h)]/[\kappa_m(h)]}{[\beta_{\pi,p}(h)]/[\kappa_p(h)]} \kappa_m(h)$; $Z(h)$ 和 $I(h)$ 分别为变换后的一个中间结果,不具有明显的物理意义,具体推导公式参见文献[3]。

从物理意义上看, $\ln\left[\frac{\kappa_{w,1}(h)}{\kappa_{w,2}(h)}\right]$ 代表的是对两条

斜程上同一高度处合成消光系数的比值取对数。假定对于所有 h , $\ln\left[\frac{\kappa_{w,1}(h)}{\kappa_{w,2}(h)}\right]$ 随机分布并且接近于某一个常数,该常数和两条斜程密切相关。令

$$\eta(h) = \ln\left[\frac{\kappa_{w,1}(h)}{\kappa_{w,2}(h)}\right] = \ln\left[\frac{Z_1(h)}{Z_2(h)}\right] - \ln\left[\frac{C_1 - 2I_1(h_1, h)}{C_2 - 2I_2(h_1, h)}\right], \quad (3)$$

通过在 $[h_1, h]$ 内求 $\eta(h)$ 绝对值的最小值即可得到雷达常数 C_1 与 C_2 ,进而求解消光系数。需要注意的是上述假定仅仅在计算雷达常数 C_1 与 C_2 时满足即可。

显然,这是一个多解问题,要想求解最优解,即所有高度上最优,必须添加各种约束条件。取特定高度的雷达回波信号,可以看到 $\eta(h)$ 对应无数个解,但是通过相应的约束条件,有可能从其中挑选出优化解。从图 1 可以看出,该高度上的最优解有可能存在于深蓝色的狭长区域,至于是否为所有高度上最优解,需要进一步进行约束求解。

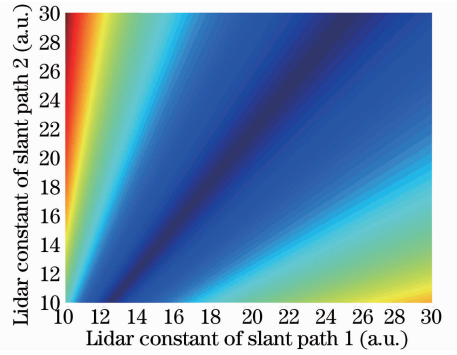


图 1 固定高度 $\eta(h)$ 随雷达常数的二维分布
Fig. 1 Two-dimensional distribution of $\eta(h)$ with fixed height

结合多角度雷达方程解的解析式形式^[4],必须保证 $\eta(h)$ 不能为复数,这意味着 $\eta(h)$ 表达式第二项中的分子及分母必须大于零,也就是说在雷达系统精细调节的基础上,反演时两条斜程的信号不能相差太大,具体计算时通过筛选信号缓变区域实现,这与 TALM 方法的基本假设——大气水平均匀一致。结合具体的天气状况,估计消光系数上限并作为一个约束条件;下限则是很显然的,当雷达校正常数有最优解时消光系数必须大于零。根据雷达校正常数的定义,假如两条斜程上存在缓变区域,那么角度大的雷达校正常数应该大于角度小的雷达校正常数。在上面约束条件的基础上,基本上可以得到一组最优解。

3 理论模拟

为了验证上述算法,采用模拟的斜程激光雷达

信号,以检验消光系数反演结果是否满足要求。通过改变天顶角和信噪比(SNR),并加入云团以检验算法稳定性和精度。参考实际雷达系统的具体参数,见表1生成了两条信号。

表1 雷达信号的相关模拟参数

Table 1 Relevant simulation parameters of lidar signal

Parameter	Value
Effective diameter of telescope /m	0.2
Energy of single laser pulse /J	0.1
Speed of light /(m/s)	3×10^8
End position transitional zone /m	224
Optical transmittance of lidar system	0.45
Receiving field /mrad	1
Divergence angle of laser /mard	0.5
Axis distance between sending and receiving system /m	0.148
Diameter of laser /mm	16
Wavelength of laser /nm	532

3.1 生成两条理想雷达信号并添加噪声

从图2可以看到, $\eta(h)$ 是随机分布并且基本对称,说明大气实际情况符合该方法的基本假设; $\eta(h)$ 随着高度的增大,添加的随机噪声也增大。这种随机噪声与空间大气的不均匀造成的效果是一样的,因此对于实际信号,应用时要考虑去噪问题。图3中,红色代表TALM反演结果,绿色代表模拟时设定的消光系数;图3(a)中天顶角为 30° ,图3(b)中天顶角为 60° 。在信号质量尚可时,反演结果与设定的消光系数曲线基本吻合,非常理想。

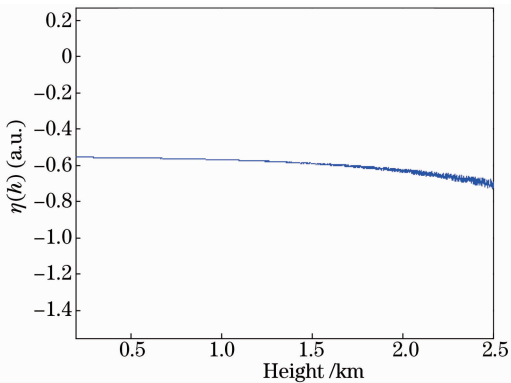


图2 天顶角为 30° 和 60° 时添加噪声后 $\eta(h)$ 曲线
Fig. 2 Curves of $\eta(h)$ with the addition of noise when zenith angles are 30° and 60°

3.2 在斜程信号某处添加云层

从图4可以看出, $\eta(h)$ 仅仅在云层出现的位置偏离较大,而且偏离完全由该处的云层决定,与云层上下气溶胶分布没有关系,这也是该方法的一个优点。图5(a)中天顶角为 60° ,图5(b)中天顶角为 50° ;红色

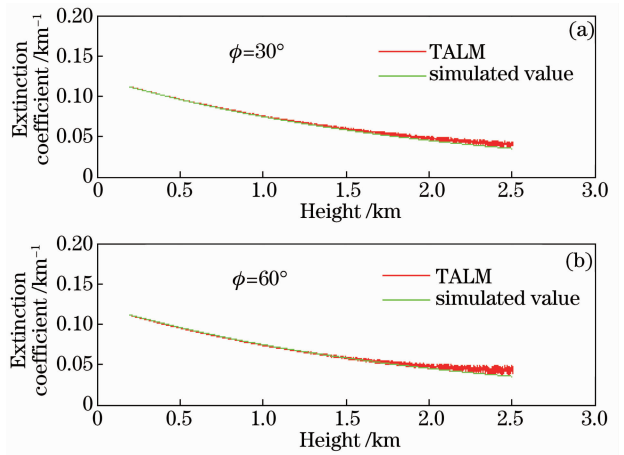


图3 添加噪声后消光系数随高度分布
Fig. 3 Distributions of extinction coefficient on height with the addition of noise

代表TALM反演结果,绿色代表模拟时设定的消光系数。不管是无云还是云层存在区域,TALM反演结果与设定的消光系数都基本吻合。由模拟结果看,该方法能准确反应出大气的消光系数。

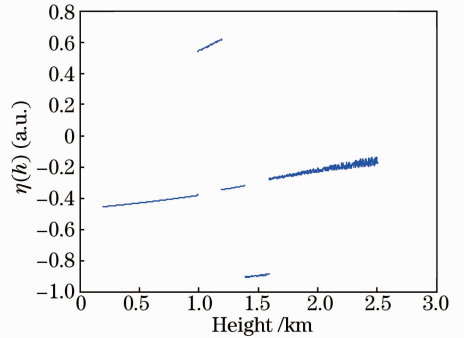


图4 添加云层,天顶角为 60° 和 50° 时 $\eta(h)$ 曲线
Fig. 4 Curves of $\eta(h)$ with the addition of cloud when zenith angles are 60° and 50°

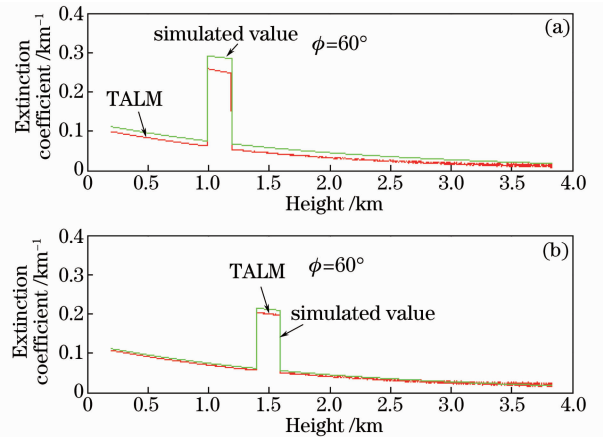


图5 添加云层,消光系数随高度分布
Fig. 5 Distributions of extinction coefficient on height with the addition of cloud

3.3 信号质量变差

天顶角及其他参数固定,信号质量变差时,反演结果与设定的消光系数值相对误差增大。在实际应用中,需要事先精细地调整雷达的机械及光学结构;进行数据处理时,需要寻找相邻两条斜程同一高度上相对水平均匀的部分进行校正。图6中,玫瑰色、蓝色、黑色、红色曲线趋势意味着信号质量下降时,TALM反演结果与设定的消光系数的相对误差愈来愈大。

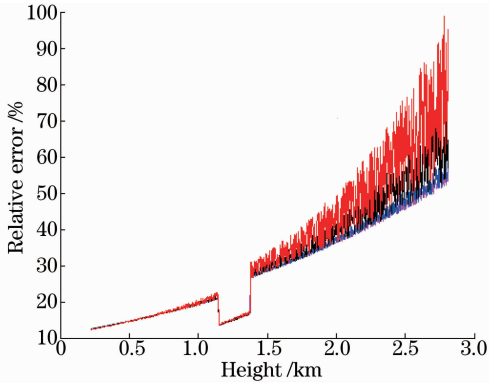


图6 信号质量下降时 TALM 消光系数与设定值的相对误差

Fig. 6 Relative error between TALM extinction coefficient and pre-set value when signal quality decreases

为了研究天顶角对反演精度的影响,分别计算了不同天顶角下 TALM 消光系数与设定值的相对误差。算法处理的是两条相邻斜程同一高度处的雷达信号,为了研究天顶角变化下相对误差的变化情况, x 轴设为距离,且每条曲线相互独立。从图7可以看到,不管天顶角如何变化,一定距离内的相对误差处于50%以内,基本上可以如实反映大气的空间结构。其中,右上角数字分别代表各个斜程的天顶角。

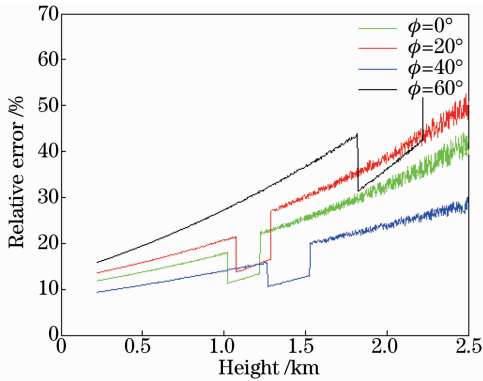


图7 不同天顶角下,TALM消光系数与设定值的相对误差随高度分布

Fig. 7 Distributions of relative error on height between TALM extinction coefficient and pre-set value at different zenith angles

4 激光雷达系统

激光雷达系统主要由激光发射、光学接收、数据采集(数据采集系统采用 Licel 系统)、扫描控制几部分构成。结构示意图如图8所示,激光发射单元采用 Nd:YAG 激光器,输出波长为355 nm,经扩束镜扩束后,平行出射于大气。采用卡塞格林式接收望远镜,焦平面处置有小孔光阑,用来避免近地面较强的回波信号对探测器造成伤害,减小大气回波信号的动态范围,同时也可以有效降低大气背景光噪声。光电倍增管(PMT)前放置一超窄带、高透射率和高截止率的干涉滤光片,以达到抑制背景光的目标。采样方法有模拟采样和光子技术两种。当近地面回波信号较强时,利用采样频率为20 MHz的模数转换器(A/D)转换进行采集和存储,多发激光脉冲回波信号累加平均后获得回波廓线;高空信号很弱时,采用光子计数。扫描控制由程序完成,当电机到达预定位置,激光器出光并触发信号采集和存储单元,程序读取数据并存储到电脑上^[5-6]。

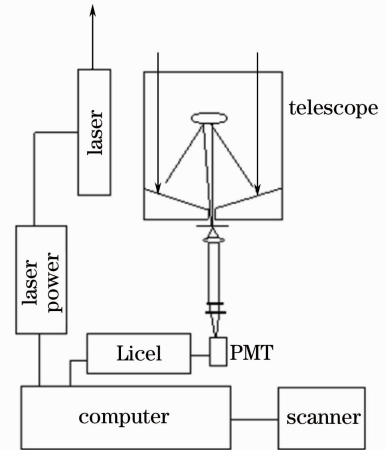


图8 激光雷达结构示意图

Fig. 8 Structure diagram of lidar

5 实测数据分析

在激光雷达系统精细调整的前提下,通过两条相邻斜程信号相比并通过取对数放大的方法来筛选两条斜程间相对均匀的信号,同时结合水平能见度对消光系数做出一个上限估计,在众多解中找到合适的校正雷达常数,并用来反演两条斜程其余部分。换句话说,在多角度测量中,光路调节、信号接收系统的线性、信号背景基线等都应该被考虑到^[7-8]。

由于要求大气处于似稳态状况,但是大气的非均匀性在空间和时间上总是在演变着;信号的信噪比较差时,特别对于晴空大气来说,很难得到较好结

果,哪怕风力的改变都可能会使数据质量下降,因此测量时必须尽可能快地将一个剖面扫描完毕。实际测量时发现斜程角度间隔为 5° ,发射激光脉冲数目为 $1000\sim 2000$ 为宜。

该方法应用于实际大气时,即使大气仅仅在特定高度均匀的情况下也适用。水平变化剧烈的区域可以通过距离平方校正信号排除掉,利用缓变部分进行校正。而且通过与多角度测量结合,可以得到适用于整个扫描剖面的平均雷达常数。

更关键的是针对 $\eta(h)$ 的分布情况而言,并不严格要求大气水平均匀,仅仅满足统计意义上的水平均匀即可,这意味着可以研究该方法在各种天气状况下的适用性问题。

考虑在天气良好状况下的一组数据,分析结果如下:图 9 中,红色代表 TALM 消光系数,蓝色代表 Fernald 消光系数;图 9(a)中天顶角为 0° ,图 9(b)中天顶角为 5° 。由于回波信号的随机起伏、气溶胶消光系数边界值的选取、标定高度的选择、气溶胶消光后向散射比的选择、空气分子消光系数的不确定性等因素导致 Fernald 结果本身有一定误差。晴空大气状况下,噪声、系统失调对回波信号及 TALM 反演结果也有较大影响。尽管事先已经严格调整了激光雷达系统,但是 Fernald 和 TALM 反演结果仍有一定偏差。天顶角较小情况下,二者轮廓基本一致,TALM 方法可以有效地反演出大气参数。在天顶角较大情况下,标定高度无法选择,Fernald 方法不再适用,但是测量地点处于合肥郊区,垂直监测未观察到污染及沙尘等明显影响空气消光系数的因素出现,因此该斜程上任意高度的消光系数可以参照垂直情况。图 10 中,红色代表 TALM 消光系数,蓝色

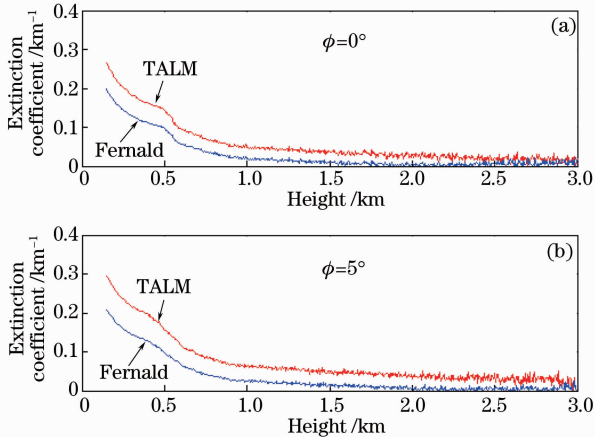


图 9 小天顶角下消光系数分布

Fig. 9 Distributions of extinction coefficient at small zenith angles

代表 Fernald 消光系数,二者趋势基本一致,反演结果基本上不依赖于天顶角;图 10(a)中天顶角为 60° ,图 10(b)中天顶角为 65° 。

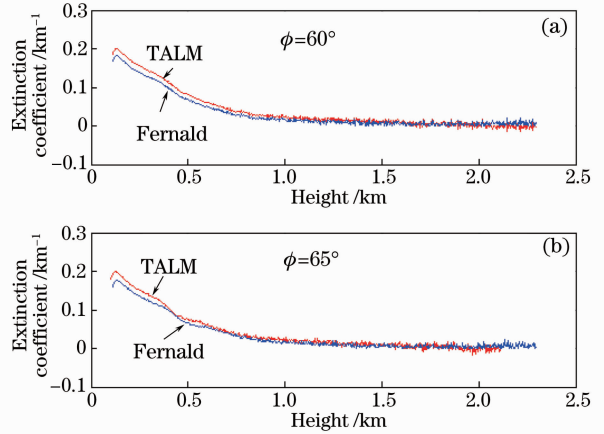


图 10 大天顶角下消光系数分布

Fig. 10 Distributions of extinction coefficient at large zenith angles

图 11 为天顶角一定时,每条回波信号廓线累积平均的激光脉冲数目不同得到的反演结果。在激光雷达测量过程中,后向散射回波信号、天空背景光信号和光电倍增管暗电流都具有随机起伏的特征,后两者与前者对比可以忽略不计。而通过增加测量次数可以有效地减小回波信号起伏引起的测量误差。可以看到,在测量次数为 500 的情况下,在 500 m 处反演结果与 1000、2000 m 处相比明显出现了较大偏差。在实际测量时,考虑到要快速扫描整个剖面 ($10\sim 20$ min),激光脉冲数目也不宜过多,选取 $1000\sim 2000$ 为宜。

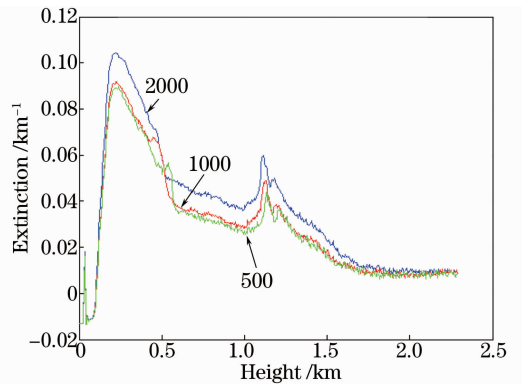


图 11 噪声对反演精度的影响

Fig. 11 Effect of noise on inversion accuracy

在斜程扫描时,可以对相邻两条斜程进行雷达常数的相对校正,然后在整个二维剖面上进行平均,代入每条斜程数据得到相应的消光系数。图 12 和图 13 分别为天气晴朗状况下及有云状况下得到的

二维伪彩图。图 12 反映了大气的水平均匀分层结构,图 13 反映了测量期间云团的漂移及扩散。

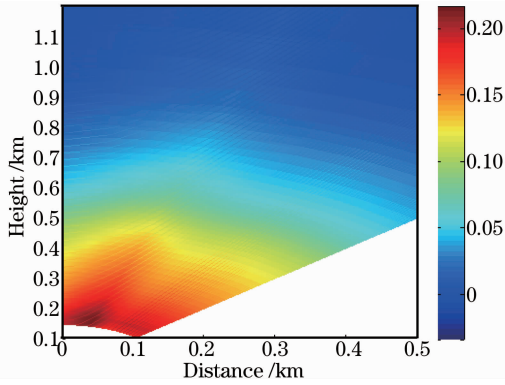


图 12 晴朗大气下消光系数伪彩图

Fig. 12 Pseudo-color image of extinction at clear atmosphere

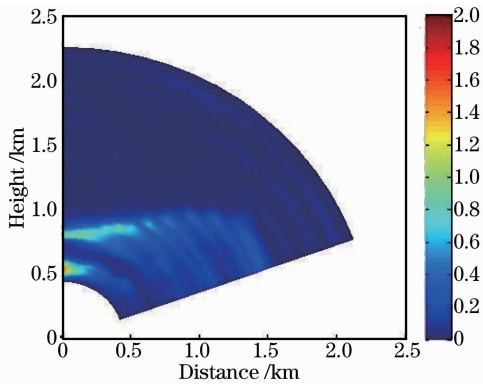


图 13 云团扩散

Fig. 13 Diffusion of cloud

6 结 论

通过对 TALM 方法进行分析,得到一系列约束条件并应用到最优解的寻找上,可以准确得到校正雷达常数,进而代入相关公式得到消光系数。与 Fernald 方法得到的消光系数对比表明,在一般天气状况下,可以很好地反演出大气的消光系数分布。

参 考 文 献

- 1 J D Klett. Stable analytical inversion solution for processing lidar returns[J]. Appl Opt, 1981, 20(2): 211-220.
- 2 F G Fernald. Analysis of atmospheric lidar observations; some comments[J]. Appl Opt, 1984, 23(5): 652-653.
- 3 M Pahlow, V A Kovalev, M B Parlange. Calibration method for multiangle lidar measurements[J]. Appl Opt, 2004, 43(14): 2948-2956.
- 4 V A Kovalev. Stable near-end solution of the lidar equation for clear atmospheres[J]. Appl Opt, 2003, 42(3): 585-591.
- 5 Fan Guangqiang, Liu Jianguo, Zhang Tianshu, *et al.*. Dual-channel polarization lidar monitoring of sandstorm and its transportation research[J]. Chinese J Lasers, 2012, 38(s1): s114006.
范广强, 刘建国, 张天舒, 等. 双通道偏振激光雷达监测沙尘暴污染及其输送研究[J]. 中国激光, 2012, 38(s1): s114006.
- 6 Zhang Chaoyang, Su Lin, Chen Liangfu. Retrieval and analysis of aerosol lidar ratio at several typical regions in China [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(5): 0513002.
张朝阳, 苏 林, 陈良富. 中国典型地区气溶胶激光雷达比反演与分析[J]. 中国激光, 2013, 40(5): 0513002.
- 7 A K Vladimir. Distortions of the extinction coefficient profile caused by systematic errors in lidar data[J]. Appl Opt, 2004, 43(15): 3191-3198.
- 8 D Althausen, D Müller, A Ansmann, *et al.*. Scanning 6-wavelength 11-channel aerosol lidar[J]. J Atmos Ocean Tech, 2000, 17(11): 1469-1482.

栏目编辑:王晓球