

DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2009.06.003

PML 偏振激光雷达定标因子实验方法确定

王珍珠, 刘 博, 王邦新, 刘 东

(中国科学院安徽光学精密机械研究所中国科学院大气成分与光学重点实验室, 安徽 合肥 230031)

摘 要: 一台 532 nm 单波长的偏振米散射激光雷达用于测量大气后向散射回波信号和线性退偏振比。为了准确获得大气气溶胶和云的退偏振特性, 两个偏振通道的标定因子 k 必须精确确定。采用三种不同的实验方法来确定偏振激光雷达的标定因子, 详细叙述了测定方法、过程、结果及误差分析。最后, 将标定后的激光雷达探测结果与 CALIPSO 数据进行比较, 进一步验证了方法的可行性。

关键词: 标定因子; 退偏振比; 偏振米激光雷达; CALIPSO

中图分类号: P407.5; TN958.98

文献标识码: A

文献编号: 1673-6141(2009)06-0414-07

Experimental Determination of the Calibration Factor of Polarization-Mie Lidar

WANG Zhen-zhu, LIU Bo, WANG Bang-xin, LIU Dong

(Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: A ground-based polarization-Mie lidar has been developed to measure backscattering signals from the atmosphere and linear depolarization ratios at 532 nm. To retrieve depolarization properties of clouds and aerosols, the calibration factor k of two polarization channels at 532 nm must be calculated. Three different experimental methods are presented to determine the calibration factor k in this polarization-Mie lidar. Some measured examples are presented and discussed. Experimental and CALIPSO results indicate that these methods are feasible.

Key words: calibration factor; depolarization ratio; polarization-Mie lidar; CALIPSO

1 引 言

激光后向散射退偏振技术大大扩展了大气探测的能力^[1], 偏振激光雷达在遥测大气气溶胶和

云方面是极为优越的工具之一^[2-5]。这种类型的激光雷达(包括地基和空基)^[6-7]可以为其他种类的雷达提供有用的互补数据, 从而更好的理解大

收稿日期: 2009-04-14; 修改日期: 2009-06-05

基金项目: 国家 973 计划项目(2006CB403702)、科技部基础性工作专项重点项目(2007FY110700)资助

E-mail: zzwang@aiofm.ac.cn

气参量。通常, 将一束线偏振激光脉冲发射至大气中, 经过大气粒子退偏后的后向散射激光包含平行和垂直两个分量, 这两个分量经偏振棱镜分离后由两个探测通道分别接收。这样获得的两个信号的比经过标定因子 k 校正后, 就可得到大气的线性退偏振比 δ 。对 δ 值的测量及其校正很多文献中提到过^[8-10], 但是并未对校正方法进行详细的讨论。

用于实验的系统是一台 532 nm 地基偏振米散射激光雷达 (PML)^[11], 它具有两个米散射探测通道, 分别用于测量近距离 (0~15 km) 和远距离 (2~45 km) 的回波信号。通过这两个信号可以反演整个对流层的大气后向散射系数垂直分布。为测量大气的线性退偏振比廓线, 此台激光雷达通过调整光路也可以实现对大气后向散射回波信号的退偏振探测。同时需要对两个探测通道的标定因子 k 的精确测量。本文详细分析了三种不同的获得偏振激光雷达 k 值的实验方法, 给出了具体的测量结果, 并将 PML 大气探测结果与星载 CALIPSO 激光雷达进行了相互对比, 也验证了标定因子 k 值的正确性。

2 PML 偏振雷达系统

PML 激光雷达系统主要由激光发射单元、信号接收单元和数据采集处理单元组成。图 1 给出了该系统结构的框图。其中, 使用了工作波长 532 nm、脉冲能量 150 mJ、重复频率 10 Hz、光束发散角 0.5 mrad、线偏振度 98% 的 Nd:YAG 激光器, 直径 254 mm 的望远镜接收视场 1 mrad; 激光器发射头紧贴着望远镜放置, 通过调整两反射镜 (M1&M2) 来保证发射激光与接收望远镜主轴平行; 还使用了中心波长 532 nm 窄带滤光片, Hamamatsu H7680 型光电倍增管, Phillips 777 型前置放大器, 精度 16 bit、速率 5 MHz 的 A/D 采集卡; 另外, 在目镜后面还有两个滑块, 其中一个放置 1/2 波片 (用于偏振标定), 另一个放置偏振棱镜和分束镜 (调整选择不同的探测目的)。这样的设计有利于偏振系统的标定和精确测量线性退偏振比廓线^[11]。

3 方法和实验

一般来说, 退偏振比表征了发射的线偏振激

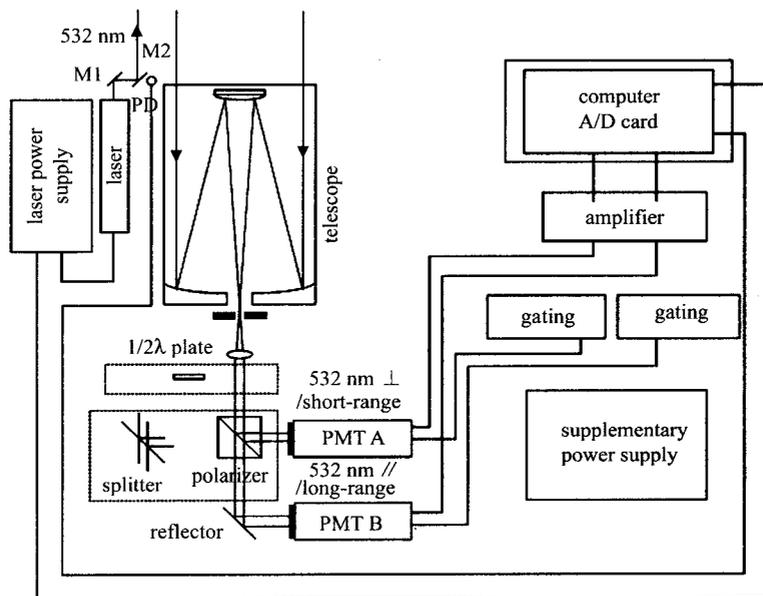


图 1 PML 激光雷达系统结构图

Fig.1 Schematic diagram of PML

光经大气退偏后, 后向散射激光的垂直、平行分量的比值^[1], 可由偏振激光雷达测量^[2,10]

$$\delta(z) = k \frac{P_s(z)}{P_p(z)}. \quad (1)$$

其中, $P_s(z)$ 和 $P_p(z)$ 分别表示激光雷达偏振垂直与平行通道的回波信号, k 值为标定因子, 它包含了激光雷达系统的退偏振效应和两个通道不同的探测效率等^[8]。对于不同的激光雷达系统两个通道的标定因子 k 值是不同的, 它可以通过实验方法确定^[5]。纯大气分子和球形粒子对退偏振比的贡献很小(约 1~3%), 而非球形粒子(冰晶云、沙尘等)会引起发射激光的强的退偏振效应(通常约 10~50%)^[2,4-5,12-13]。下面叙述三种确定标定因子的实验方法。

3.1 非偏光源法

实验上, 可以使得发射激光不出射至大气, 利用非偏振光源照射进入偏振激光雷达的接收视

场, 此类光源可以选用人工的(例如, 日光灯)或者自然的(例如, 当激光雷达接收望远镜指向厚厚的云时, 经过多次散射的太阳光可以看作非偏光源)。文中以日光灯光源为例, 选择夜晚进行定标实验, 这样天空背景辐射的影响可以忽略。首先将 PML 偏振激光雷达设置为偏振测量状态, 然后将日光灯所发出的光移进激光雷达的接收视场内, 进行一段时间的数据采集, 数据平均后可以获得两组原始信号。但是, 由暗电流、随机噪声等带来的电子学背景信号需要从原始信号中去除。因此, 紧接着将接收望远镜完全遮住后, 再进行一段时间的数据采集, 同样平均后获得两组电子学背景信号。最后利用去除背景后的信号做比即确定了标定因子 k 的值。图 2(a)、2(b) 给出了激光雷达先后接收的四组信号以及处理后的信号比值(i.e. $k=1.18$), 可以看出, k 是个固定的值, 不会随高度变化。

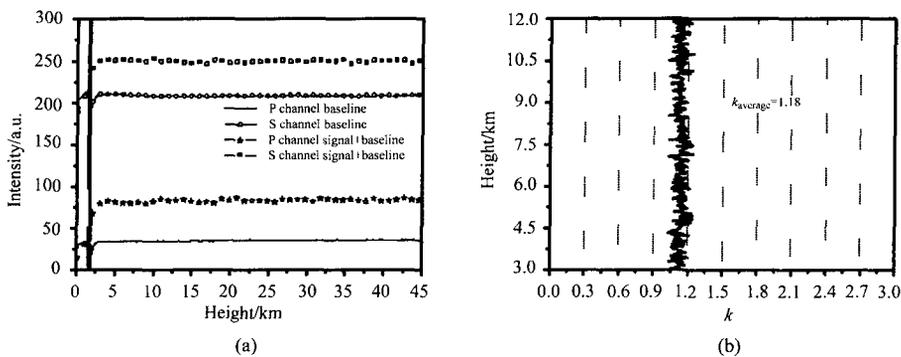


图 2 非偏光源法确定标定因子

Fig.2 Determining the calibration factor k by using unpolarized light source

3.2 大气分子法

另一种方法是利用大气分子的退偏振比值来校准 $\delta(z)$, 即有

$$\delta_m(z_0) = \frac{\beta_s^m(z_0)}{\beta_p^m(z_0)}, \quad (2)$$

其中, β_s^m 和 β_p^m 为分子后向散射系数的两个分量。选择一个特别干净的高度 z_0 , 认为粒子的散

射可以忽略, 因而标定因子可以描述为

$$k = \delta_m(z_0) \frac{P_p^m(z_0)}{P_s^m(z_0)}. \quad (3)$$

这种标定技术确定 k 值, 基于测量实验时只考虑纯大气分子散射的情况, 此时的退偏振比很小, 大约 1~3%^[2,4-5,14-16]。

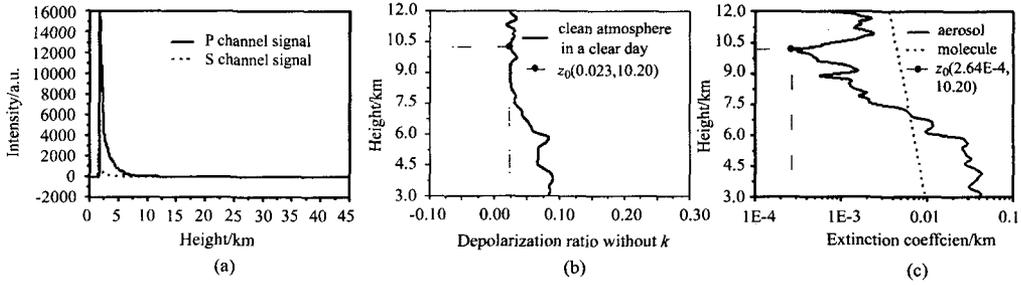


图 3 大气分子法确定标定因子

Fig.3 Determining the calibration factor k by using the value of molecular depolarization ratio

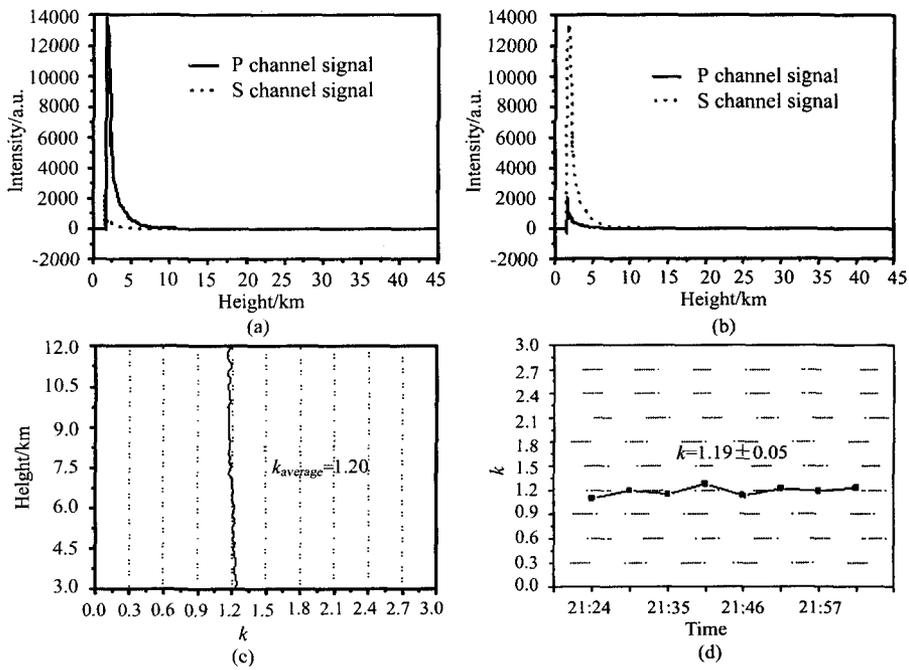


图 4 1/2 波片法确定标定因子

Fig.4 Determining the calibration factor k by using the half wave-plate

选择一个晴朗的夜晚, 使 PML 激光雷达处于偏振测量状态, 通过发射 5000 发 (多次测量平均以增大信噪比) 激光脉冲获得两组平均的后向散射回波信号, 如图 3(a) 所示。仅仅将这两组信号作为可以获得没有 k 值标定的大气退偏振比廓线, 如图 3(b) 所示。为了确定粒子散射可以忽略的高度 z_0 , 首先要知道大气气溶胶的垂直分布。利用 Fernald^[17] 方法对平行通道的回波信号进行反演近似得到大气气溶胶消光系数廓线。其中, 假设气溶

胶消光后向散射比 $S_1 = 50 \text{ Sr}(532 \text{ nm})$, 分子的消光后向散射比 $S_2 = 4\pi/3 \text{ Sr}$, 分子的后向散射系数 $\beta_2(z)$ (或消光系数 $\alpha_2(z)$) 可以通过气象探空或大气模式计算得到, 标定高度 z_c 通过选取近乎不含大气气溶胶粒子的清洁大气层所在的高度来确定。这个高度一般在对流层顶附近, 其边界值, 532 nm 波长气溶胶后向散射系数 $\beta_1(z_c)$ (或消光系数 $\alpha_1(z_c)$) 则由大气气溶胶散射比 $R = 1 + \beta_1(z_c) = 1.01$ 来确定。图 3(c) 给出了 2008 年 6 月 5 日合肥上空

大气气溶胶的消光系数廓线,可以看出标定高度 z_c 的消光系数很小,认为可以忽略粒子散射,即确定 $z_0 = z_c$ 。于是可由公式 (3) 获得 k 值。如果 $\delta_m(z_0) = 0.0279^{[16]}$, 那么 $k = 1.21$; 但是如果 $\delta_m(z_0) = 1 \sim 3\%$, k 值将会在 $0.43 \sim 1.30$ 之间。从上述可知, $\delta_m(z_0)$ 值和标定高度 z_0 的选取是很重要的,它们共同决定了标定因子的大小。然而,对于测量的分子大气的退偏振比值的估计依赖于激光雷达系统的配置和大气温度状态^[18],估计不准确将会给 k 值确定带来很大的误差。

3.3 1/2 波片法

第三种方法是 1/2 波片法,即将一 1/2 波片插入发射^[19]或者接收^[20]光路中进行标定实验。当一束线偏振光入射至 1/2 波片(其偏振方向与 1/2 波片光轴方向成 θ 角),从波片出射的光束仍然是线偏光,但是其偏振方向与原入射光的偏振方向之间的夹角变为 2θ 。因此,正如文献 [19-20] 中所提到的情形,在不考虑散射源和 1/2 波片本身的情况下,当波片的光轴方向与发射的激光偏振方向调整为 22.5° ,到达偏振棱镜入射面的后向散射光的偏振方向将会旋转 45° ,那么经过偏振棱镜由平行垂直两个通道的探测器所接收到的光功率信号应该相同,实际测量两个通道的输出信号是有差别的,即为两通道的标定因子 k 值。

在本文中,1/2 波片是可以手动旋转的。首先,将 1/2 波片置于接收光路中(如图 1 所示),调整其光轴方向与发射激光偏振方向成 0° 进行偏振测量实验,图 4(a) 给出了平行(实线)和垂直(点线)探测通道输出的信号;然后,将 1/2 波片旋转 45° 进行实验,此时两个正交的探测通道接收的信号与前者相反,如图 4(b) 所示。假设激光发射能量前后不变,且短时间内大气稳定不变,将前述测量的两个最大后向散射信号作比,很容易计算出偏振通道的标定因子 k 。图 4(c) 给出了 k 的廓线,其值不随高度变化,取均值为 1.20。利用这种方法,继续旋转 1/2 波片,接收并记录多组由平行和垂直通道探测的信号,由每两个最大的后

向散射回波信号可以依次计算 k 值。图 4(d) 显示了 2008 年 6 月 5 日连续测量的 8 个 k 值,发现 k 值是依次变化的,这种有规律变化的现象是由波片本身引起,而不仅仅是操作误差,通过平均可以消除 k 的测量误差。利用 1/2 波片法,最终确定 $k=1.19$ 。

4 讨论和对比

上述三种方法,要求激光雷达测量系统处于理想状态,即激光光源的状态是理想的、接收光路的调整是完美的,还要求实验期间天气干净、大气状况稳定等。实际上,文中激光雷达系统所用到的激光光源的线偏振度大于 98%,其引入的误差小于 2%;接收光路的调整及仪器本身引入的退偏振误差近似小于 3%(利用文献 [8] 中的方法估计);而选择标定的天气比较稳定,可以认为是零误差。

比较而言,方法 1 原理简单而且容易实现,考虑了整个光路对标定因子 k 的影响,只要光源是非偏振的,就不会引入大的误差,文中利用的日光灯可认为是非偏振的,综合考虑各个引入误差的项,其总的误差小于 3%;方法 3 仅考虑了 1/2 波片后面的光路的影响,忽略了望远镜和目镜对后向散射光的影响(这里假设是理想的),另外,在旋转 1/2 波片进行测量时引入人为的误差,还有波片本身带来的误差,可以通过多次平均来消除(例如,图 4(d) 给出的 8 次测量的结果,平均后的订正因子 $k = 1.19 \pm 0.05$),这种方法带来的误差小于 9%(包括激光光源、后继光路、多次测量等误差的总和);而方法 2 依赖于干净大气的选取和 $\delta_m(z_0)$ 值估计的准确性,否则会引入较大误差致使标定不准,在假设天气非常干净、标定点选取恰当、标定点处回波信号信噪比足够(大于 10)的情况下,由公式 (3) 可以看出,引入误差的大小只取决于 $\delta_m(z_0)$ 值,而 $\delta_m(z_0)$ 值又很难准确给定,所以这种方法确定标定因子 k 误差很大。因此,在进行偏振雷达标定时,常选择方法 1 和方法 3

确定标定因子 k 的值, 取定 $k \sim 1.2$, 其误差都在 10% 以内, 是可以接受的误差范围, 能够满足实验的需求。

最后, 为了验证标定因子 k 的可靠性, 我们将 PML 激光雷达测量结果与 CALIPSO 激光雷达 [7,9] 的同时观测结果进行了比较。图 5 给出了 2008 年 4 月 6 日 CALIPSO 卫星经过合肥上空与 PML 同时进行实验的对比结果, 图 5(a) 中显示的是 CALIPSO 激光雷达接收的整个的 (实线)、垂

直分量的 (点线) 衰减后向散射廓线。利用这两条廓线很容易获得气溶胶的退偏振比廓线 (图 5(b) 的实线), 由 PML 激光雷达计算的结果用图 5(b) 的点线表示。结果表明, 两台激光雷达测量的结果, 其大小和趋势都吻合的很好。6 km 以下高度的细微结构不一致, 是因为合肥当地的大气情况与 CALIPSO 路径下方的大气不完全一样造成的。比较验证结果证明了 PML 测量的可靠, 也就是标定因子 k 是可信的。

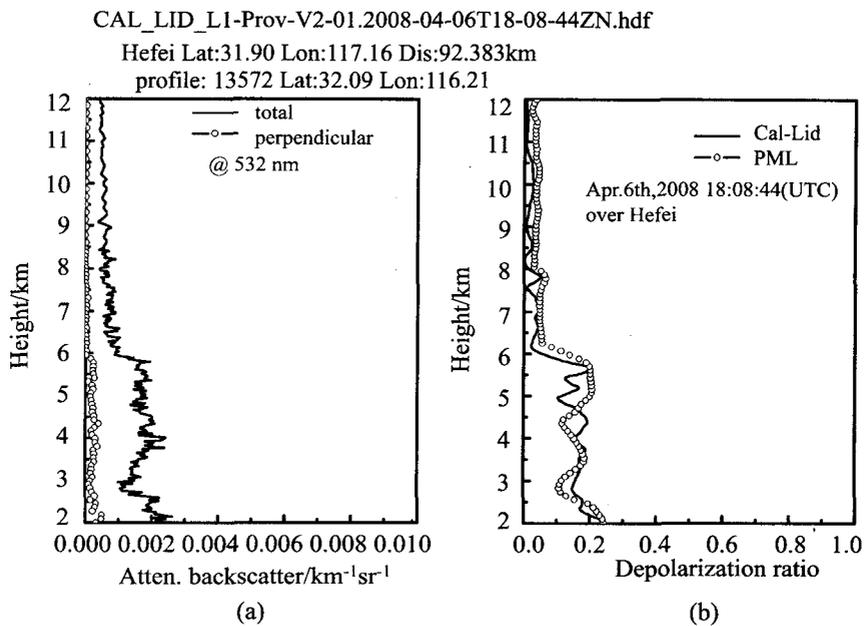


图 5 PML 与 CALIPSO 激光雷达测量结果对比

Fig.5 Comparison with CALIPSO lidar over Hefei on April 6th, 2008 (UTC)

5 结 论

文中介绍了地基 PML 偏振激光雷达, 详细讨论了三种不同的实验上确定标定因子的方法, 并给出了每种方法的误差来源及分析, 尽管计算 k 值时考虑了一些假设条件, 方法 1 和方法 3 获得的 k 值误差都在 10% 以内, 满足实验的要求。同时, 与 CALIPSO 激光雷达对比结果也验证了标定的正确性。PML 偏振激光雷达可以用于卷云与沙尘等的探查实验。

参考文献:

[1] Sassen K. The polarization lidar technique for cloud research: a review and current assessment [J]. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 1991, **72**(12): 1848-1866.

[2] Uchino O, Tabata I, Kai K J, et al. Polarization properties of middle and high level clouds observed by lidar [J]. *J. Meteor. Soc. Japan.*, 1988, **66**(4): 607-616.

- [3] Gobbi G P. Polarization lidar returns from aerosol and thin clouds: a framework for the analysis [J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(24): 5505-5508.
- [4] Liu Dong, Qi Fudi, Jin Chuanjia, et al. Polarization lidar observations of cirrus clouds and Asian dust aerosols over Hefei [J]. *Chin. J. Atmosph. Sci.*, 2003, **27**(6): 1093-1100(in Chinese).
刘东, 戚福弟, 金传佳, 等. 合肥上空卷云和沙尘气溶胶退偏振比的激光雷达探测 [J]. *大气科学*, 2003, **27**(6):1093-1100.
- [5] Wang Z Z, Chi R L, Liu B, et al. Depolarization properties of cirrus clouds from polarization lidar measurements over Hefei in spring [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(4): 235-237.
- [6] Scholand R M, Sassen K, Stone R. Observation by lidar of linear depolarization ratios for hydrometeors [J]. *J. Appl. Meteor.*, 1971, **10**(5): 1011-1017.
- [7] Winker D M, Pelon J R, McCormick M P. The CALIPSO mission: spaceborne lidar for observation of aerosols and clouds [C]. *Proc. of SPIE*, 2003, **4893**: 1-11.
- [8] Biele J, Beyerle G, Baumgarten G. Polarization lidar: corrections of instrumental effects [J]. *Opt. Express*, 2000, **7**(12): 427-435.
- [9] Liu Z Y, McGill M, Hu Y X, et al. Validating lidar depolarization calibration using solar radiation scattered by ice clouds [J]. *IEEE Geosci. Remote Sensing Lett.*, 2004, **1**(3): 157-161.
- [10] Behrendt A, Nakamura T. Calculation of the calibration constant of polarization lidar and its dependency on atmospheric temperature [J]. *Opt. Express*, 2002, **10**(16): 805-817.
- [11] Liu Dong, Fan Aiyuan, Qi Fudi, et al. Unattended automated and portable Polarization-Mie Lidar and its detecting method: China Patent, 200510038410.6 [P]. 2005-09-28(in Chinese).
刘东, 范爱媛, 戚福弟, 等. 无人值守昼夜兼用的便携式偏振米散射激光雷达及其探测方法: 中国, 200510038410.6 [P]. 2005-09-28.
- [12] McNeil W R, Carswell A I. Lidar polarization studies of the troposphere [J]. *Appl. Opt.*, 1975, **14**(9): 2158-2168.
- [13] Murayama T, Okamoto H, Kaneyasu N, et al. Application of lidar depolarization measurement in the atmospheric boundary layer: effects of dust and sea-salt particles [J]. *J. Geophys. Res. Atmosph.*, 1999, **104**(D24): 31781-31792.
- [14] Bates D R. Rayleigh scattering by air [J]. *Planet. Space Sci.*, 1984, **32**(6): 785-790.
- [15] Young A T. Revised depolarization corrections for atmospheric extinction [J]. *Appl. Opt.*, 1980, **19**: 3427-3428.
- [16] Tomasi C, Vitale V, Petkov B, et al. Improved algorithm for calculations of Rayleigh-scattering optical depth in standard atmospheres [J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**(16): 3320-3341.
- [17] Fernald G F. Analysis of atmospheric lidar observation: some comments [J]. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(5): 652-653.
- [18] Cairo F, Di Donfrancesco G, Adriani A, et al. Comparison of various linear depolarization parameters measured by lidar [J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(21): 4425-4432.
- [19] Spinhirne J D, Hansen M Z, Caudill L O. Cloud top remote sensing by airborne lidar [J]. *Appl. Opt.*, 1982, **21**(9): 1564-1571.
- [20] McGill M, Hlavka D, Hart W. Cloud physics lidar: instrument description and initial measurement results [J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(18): 3725-3734.