

微脉冲激光雷达及其应用研究进展

贺千山 毛节泰

(北京大学物理学院大气科学系, 北京 100871)

摘要 微脉冲激光雷达 (MPL) 对云和气溶胶的光学属性的空间分布提供连续自动的观测, 该系统结构紧凑, 发射能量对人眼安全, 其可靠性已在国内外很多大型试验中得到了验证。文章介绍了微脉冲激光雷达的系统结构、工作原理以及较之传统激光雷达的优越性, 给出了气溶胶光学属性的反演方法(斜率法、近端解法、远端解法和迭代求解法) 并指出了其优缺点, 对 MPL 在边界层、气溶胶观测等方面的应用研究成果做了简介。

关键词 微脉冲激光雷达 气溶胶 反演方法 应用

引言

气溶胶在大气中的含量虽然很低, 但它却扮演着十分重要的角色。近年来大气气溶胶(自然和人为)对全球天气和气候的影响已经被大量地研究^[1]。气溶胶中的人为成分在短波范围直接导致一个负的辐射强迫(变冷), 其数量约为 $1.0 \sim 2.0 \text{ W/m}^2$, 但同时由工农业产生的温室气体(如 CO_2) 对长波辐射又有正的辐射强迫影响^[2]。另外气溶胶影响卫星遥感以及空气和水的质量^[3,4]。激光雷达为气溶胶的垂直结构、成分和动力学探测提供了有力的工具^[5-10]。

地面观测可以得到连续的 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 的质量浓度、尺度谱、消光系数和一些物理化学光学属性, 但由于昂贵的建设和维护经费限制了地面站获得气溶胶空间分布信息, 而且地面站不能获得气溶胶的垂直分布。另外气溶胶光学厚度是气溶胶消光系数的垂直积分, 很多情况下它不能反映地面粒子的浓度。地面安装的激光雷达是监测气溶胶消光系数垂直分布和垂直方向积分的强有力工具。

1 微脉冲激光雷达概况

激光雷达是通过分析激光的回波信号从而得到大气物理特征的。激光波长位于光波段, 典型值为

$1 \mu\text{m}$ 左右, 这与烟、尘等大气气溶胶粒子的尺度相当, 加上光电探测器的探测灵敏度较高, 因而激光探测烟、尘等微粒具有很高的探测灵敏度。激光雷达所接收的激光大气回波, 包含了大气散射光的光强、频率、相位和偏振等多种信息。利用这些丰富的激光大气回波信息, 能够探测多种大气物理要素。激光雷达的各种优势是其他探测手段所不能比拟的。

雷达系统对于小尺度的大气气溶胶粒子尤为敏感, 这是因为粒子在可见光波段有强的散射特征^[11]。然而对于时间连续的雷达探测, 尤其对于气候方面的观测需要更长时段的连续观测, 这样的雷达应用还比较少, 这与传统的雷达应用有很大差别。由于应用与维护上的费用限制了激光雷达的广泛应用^[12], 而且传统雷达的使用持续时间较短, 高能量的出射光对人体有一定危害。1992年由 NASA 的 GSFC (Goddard Space Flight Center) 研发的微脉冲激光雷达 (MPL) 克服了传统雷达的缺点^[13]。

MPL 技术应用固态二极管激光器延长了该雷达的连续工作寿命, 而且包含了高效率的量子化滤噪光子计数设备。MPL 最显著的特点还在于它的发射能量对人眼是安全的。低的脉冲能量以高的重复频率透过一个收发共享的卡塞格林望远镜片(直径 20 cm), MPL 的发射能量是几个 μJ , 而标准激光

“高等学校博士学科点专项科研基金”项目资助

作者简介: 贺千山, 男, 1975 年生, 硕士, 主要从事大气遥感和大气辐射研究, Email: oxeye@water.pku.edu.cn

收稿日期: 2003 年 6 月 30 日; 定稿日期: 2003 年 9 月 14 日

雷达比它高几个数量级,这样就提高了监视仪器运转的安全性,允许系统自动运作。脉冲重复频率为 2500 Hz,这使得系统在短时间内可以平均很多低能量脉冲,从而达到较好的信噪比。MPL 系统有一个高的空间分辨率 30 ~ 300 m,有 4 种选择。另外 MPL 比其它光雷达系统结构更紧凑,这个特点使它可以观测任意天顶角。因此像常规垂直探测一样可以方便地做到水平和倾斜探测。值得注意的是探测器对信号十分敏感,晴天探测时必须防止太阳光直接射入探测器而造成严重的破坏。晴天探测时探测望远镜轴线要偏离太阳光入射方向,或者做一定的遮挡处理。另外, MPL 的接收视场小(大约 100 μrad),这降低了处理多次散射的复杂性,并且降低了周围太阳光背景噪音的影响。测试表明, MPL 系统在两次大的维护中间可连续运行长达一年时间。MPL 雷达数据可用于计算云滴散射截面,云的光学厚度,行星边界层高度,气溶胶消光廓线与光学厚度,甚至在夜间某种情况下可探测到对流层特

性^[13,14]。

美国科学与工程设备公司(SESI)自 1993 年就推出了 MPL 的商业产品,至今已生产了 20 多套系统。依照光学特征和数据采集系统的改进程度有 4 个不同的版本。收发装置的一体化不仅降低了出射能量从而对人眼安全,而且相对于收发分置的光学设计雷达有更紧凑的结构。

MPL 的优点在于对人眼安全、低发射能量和结构紧凑,但它的与传统光雷达设计不同的发射接收共享光学路径,也会引发另外的问题,诸如探测器的后脉冲订正和近端填充函数的确定,这些问题在数据处理过程中必须仔细考虑。

2 微脉冲激光雷达的结构

MPL 由 4 个部分组成:激光发射系统、光学收发天线、探测器和数据采集系统。图 1 是 MPL 的系统示意图。

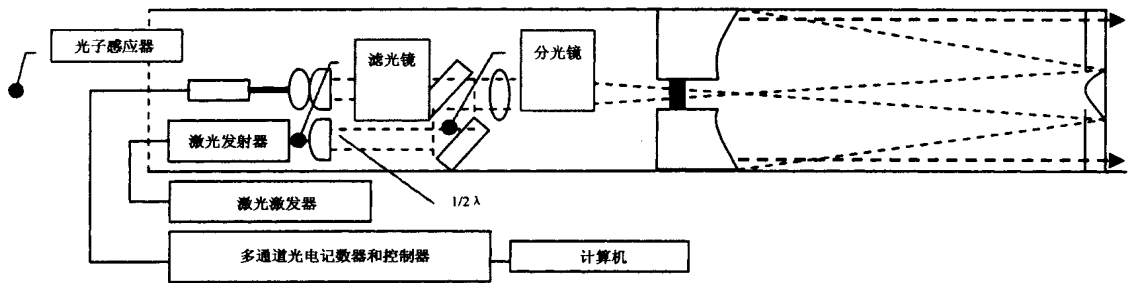


图 1 微脉冲激光雷达的构造示意图

MPL 的发射接收处理器被放置在一个恒温室中,天线装置是一个直径 20 cm 的卡塞格林望远镜,光电计数器直接装在望远镜的下方。激光发射器和计数器连接到发射接收器上,另一端连在计算机上。Nd:YLF 激光器发射的脉冲基本波长是 1046 nm,经倍频后为 523 nm 的出射脉冲波长。

北京大学研究中用的 MPL 工作功率是 1 W,脉冲延时是 10 ns,根据系统状态输出能量在 6 ~ 8 μJ ,信号通过 Geiger 型雪崩光电倍增管放大,由计数器记录下来。

因为接收望远镜的焦点在无穷远,所以发射接收装置不能精确地取得近距离的回波信号。这就是所谓的近端(范围大约为 0 ~ 2 km)填充误差,即离

望远镜越近,接收能量偏差也越大。因为大部分气溶胶集中在地面上方几公里内的大气中,因此填充订正对 MPL 探测气溶胶很重要。进行这一订正实验的关键在于选择大气水平方向比较均一的时机,观测的时候需要注意观测视野内没有任何障碍物(包括云)出现。

计算机与计数器相连,用于控制雷达工作,可视化输出实时雷达回波,并存储数据。MPL 的最大探测高度夜间可达大约 30 km,白天晴朗条件下可达 10 km 左右。

计算机存储的雷达信号中包括来自 523 nm 的太阳光背景噪音和后脉冲噪音。后脉冲噪音是由于探测器二极管发出的光电子先于激光脉冲被探测器

接收而引起的噪音。在开始的几公里,后脉冲噪音比正常雷达回波能量小几个量级,但在远端它的影响不容忽视。

3 微脉冲激光雷达的工作原理

微脉冲激光雷达的探测原理可以用激光雷达方程说明。激光雷达方程是表示发射功率与接收到的回波功率之间关系的方程。它的形式是

$$n_r(r) = [(O_c(r) CE\beta(r) T^2 / r^2) + n_b(r) + n_{ap}(r)] / D[n(r)] \quad (1)$$

其中: $T^2 = \exp[- 2 \int_0^r \alpha(r') dr']$ 为大气透过率; $n_r(r)$ 是雷达探测器接收的光电子数 (phe/ μs); $O_c(r)$ 是填充订正函数; C 是系统常数; E 是发射的激光脉冲能量 (μJ); $\beta(r)$ 是气溶胶和大气总的后向散射系数 (km^{-1}); r 是探测体与接收器望远镜之间的距离; $n_b(r)$ 是背景噪音 (phe/ μs); $n_{ap}(r)$ 是探测器后脉冲订正函数 (phe/ μs); $D[n(r)]$ 是探测器 deadtime 订正函数^[15]。

4 雷达方程求解算法

下面给出几个经典的反演方法及其优缺点。

4.1 斜率法

对基本雷达方程做简单变化, 设 $S(r) = \ln[r^2 P(r)]$, 则雷达方程变为

$$S - S_0 = \ln \frac{\beta}{\beta_0} - 2 \int_{r_0}^r \alpha dr' \quad (2)$$

上式的微方形式为

$$\frac{dS}{dr} = \frac{1}{\beta} \frac{d\beta}{dr} - 2\sigma \quad (3)$$

当 $d\beta/dr \neq 0$ 时要解方程必须明确 β 和 σ 之间的关系, 或是假定或是实测得到。但对于均匀大气而言, $d\beta/dr = 0$, 消光系数能被表示成雷达信号对距离的斜率 $\alpha_{hom} = (-1/2) dS/dr$ ^[16]。

对于非均匀大气而言, 可以假定在一小段距离上大气是均匀的, 这样在每一段距离上连续地应用斜率法也可以得到不均匀大气条件下较为合理的消光系数近似分布。

4.2 近端解法

很多实际观测和理论研究表明, 在粒子的后向散射远大于分子气体的后向散射的情况下, 例如灰霾、云天、有雾或对于红外波段, β 和 σ 之间有下列指

数关系近似表示:

$$\beta = c\sigma^k \quad (4)$$

式中 k 与激光波长和气溶胶粒子的光学属性有关。研究表明 k 满足 $0.67 \leq k \leq 1.0$, 在这种假设情况下, 基本雷达方程变为

$$\frac{dS}{dr} = \frac{k}{\sigma} \frac{d\sigma}{dr} - 2\sigma \quad (5)$$

方程具有伯努利方程的形式, 从而可解得

$$\sigma = \frac{\exp[(S - S_0)/k]}{\{ \sigma_0^1 - \frac{2}{k} \int_{r_0}^r \exp[(S - S_0)/k] dr' \}} \quad (6)$$

式中 $\sigma_0 = \sigma(r_0)$ ^[17]。

尽管这种方法在理论上比斜率法优越, 但很多问题还是用斜率法求解。这是因为近端解法要求很精确的边界值, 另外这种解法有时会产生异常大、无穷或负值和无物理意义的结果, 由图 2 看出边界值的很小变化导致两种计算结果相去甚远。要避免这样的结果有人使用大的不合实际的 k 值。很少有人研究指出造成这种结果的原因, 仅有人提出是由于忽略了多次散射的影响。斜率法显然也有同样的不足, 但不会出现这样不切实际的结果, 所以这种解释不能令人信服。

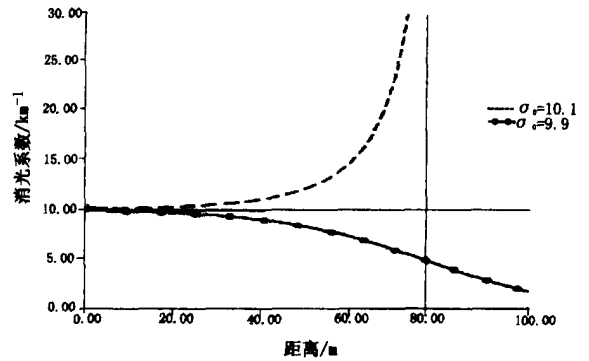


图 2 初值 σ_0 的误差造成反演结果的强烈扰动

4.3 远端解法

对近端解法做稍许改进, 把边界取到大气上层的某处 r_m , 得到 $r < r_m$ 处的 $\sigma(r)$, 对于常数 k , 雷达方程的解的形式表示如下

$$\sigma(r) = \frac{\exp[(S - S_m)/k]}{\{ \sigma_m^1 - \frac{2}{k} \int_r^{r_m} \exp[(S - S_m)/k] dr' \}} \quad (7)$$

式中 $S_m = S(r_m)$, $\sigma_m = \sigma(r_m)$ ^[18]。

这种看似微小但合理的变化使解的表现十分不

同。随着 r 在 r_m 的基础上变小, σ 由两个逐渐增大的数值相比得到, 因此结果是稳定和精确的, 并且随着 r 的下降, 解对初值 σ_m 的依赖性也越来越小。该方法的关键之处在于确定远端边界值, 即 r_m 和 σ_m , 常规探测仪器无法精确得到 σ_m 的值, 因此在应用过程中也有一定的困难。一般认为在对流层顶气溶胶含量很小的高度是 r_m , 相应的 $\beta_m = 0$, $\sigma_m = \sigma_R$ 。但在雷达能力受限的情况下, 如噪音干扰使得雷达有效探测距离达不到对流层顶, 就不能采用上述假设。

4.4 迭代求解

该算法利用另外独立观测的气溶胶光学厚度作限制因子。雷达方程的解为^[19, 20]:

$$\beta_A(x-1) = \frac{S_r(x-1) \psi(x-1, x)}{\frac{S_r(x)}{\beta_A(x) + \beta_R(x)} + \frac{1}{R_A} [S_r(x) + S_r(x-1) \psi(x-1, x)] \Delta z - \beta_R(x-1)} \quad (8)$$

其中, $\psi(x-1, x) = \exp\left[\left(\frac{1}{R_A} - \frac{1}{R_R}\right)(\beta_R(x-1) + \beta_R(x)) \Delta z\right]$, x 比 $(x-1)$ 高一个距离分辨率; Δz 是雷达的距离分辨率; $R_R(r) = \sigma_R(r) / \beta_R(r) = 8\pi/3$ 是大气分子消光后向散射比; $R_A(r) = \sigma_A(r) / \beta_A(r)$ 是气溶胶粒子消光后向散射比, 随气溶胶谱分布和粒子折射率变化很大。具体求解步骤见文献[19] [20], 这里不再赘述。

其算法的误差来源主要是常数 R_A , 很多人就常数 R_A 带来的误差进行了深入分析^[21-24], 为了克服这个误差, 必须用模式或独立测量数据得到 $R_A(z)$ 的廓线。

5 微脉冲激光雷达的应用研究

5.1 气溶胶光学厚度及空间分布

Kenneth 等从 1999 年 1 月 14 日到 2 月 8 日进行了 Aerosols99 移动观测计划, 这项观测沿着弗吉尼亚的 Norfolk 和南非的开普敦, 其目的是得到南北大西洋几个不同地区的气溶胶分布特征^[25]。

利用 MPL 和太阳光度计同时观测的气溶胶光学厚度作比较。两者的观测值有较好的一致性。对于较大的气溶胶光学厚度, 激光雷达观测值稍高于太阳光度计观测值。这是由于两者采用不同的观测路径, 激光雷达观测是垂直的, 而太阳光度计观测是沿着太阳光直射路径; 也可能是观测期间激光雷达的数据包括了很薄的云, 或者在太阳光度计观测过

程中观测者把较厚的气溶胶层当作云而滤去。因为激光雷达算法中用 AOD 去决定天空气溶胶消光后向散射比 (S_a) 和消光廓线, 所以高估的 AOD 会导致总的柱消光和 S_a 也被高估。总的看来, 两者取得的 AOD 在上述误差范围内是一致的。

Aerosols99 移动观测项目沿着巡航路径做消光廓线等值线。由消光廓线等值线可以看出消光系数的数量和垂直结构在不同地区有很大差异, 依不同观测位置和当时气象条件不同变化很大。

5.2 MPL 观测边界层及其随时间的演变

Weibiao Chen 等^[26]从 1998 年就在日本的筑波将雷达系统以 60° 仰角一直连续观测。图 3 是由 1999 年 7 月 26 日的 MPL 数据资料反演出的边界层变化。边界层高度随时间的波动表明卷挟层和垂直风速对边界层高度的影响。同时, 用 Klett 方法 (Klett, 1981) 计算了自由对流层下的气溶胶光学厚度, 在图中用虚线表示。混合层高度的变化趋势与气溶胶光学厚度变化趋势一致, 只是气溶胶光学厚度的变化滞后约 2 h 20 min。排除时间的差异两者的相关系数是 0.92。这种时间上的滞后可能由于清晨地面霾的扩散速度大于边界层的对流速度造成的。

5.3 MPL 观测气溶胶浓度的日变化

北京大学从 2002 年 3 月 19 日到 4 月 30 日将激光雷达以 45° 仰角连续观测了 40 多天。图 4 给出了 2002 年 4 月 30 日经过距离订正与填充订正的光雷达信号。从图中可以看出 07:00 以前近地面雷达信号十分强, 之后较高处的信号逐渐增强, 18:00 以后高处雷达信号又变弱。由 Mie 散射理论计算的大气消光系数垂直分布, 可看出气溶胶垂直浓度分布有明显的日变化, 它与大气稳定度有很好的相关性。

6 结语

大气辐射测量计划 (ARM) 和全球卫星监测项目对云和气溶胶的研究都必须借助于 MPL 监测数据才能更深入的了解它的辐射特性。被动遥感大气组分的垂直分布是间接和模糊的, 应用直接自动的激光雷达系统作为被动遥感的补充, 将会对大气辐射状态的垂直特征有一个全面的了解^[27]。上述应用表明常规 MPL 观测有很大的可行性。今后, 对该雷达做一定的升级和改进, 如补充双波长和偏振散射功能, MPL 系统的应用前景会更广阔。

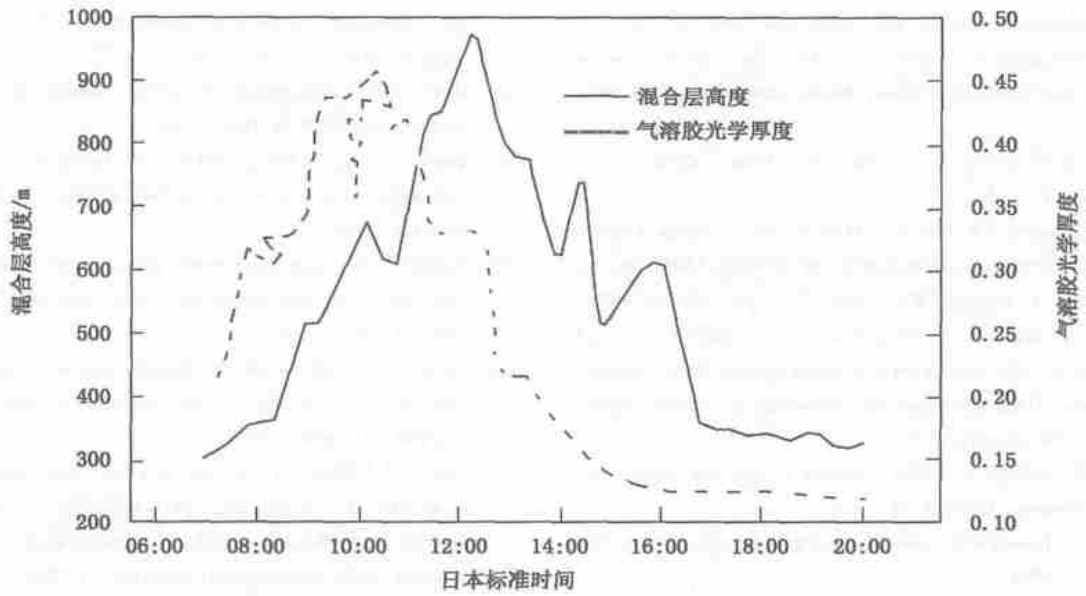


图 3 微脉冲激光雷达反演的气溶胶光学厚度与边界层高度随时间的演化

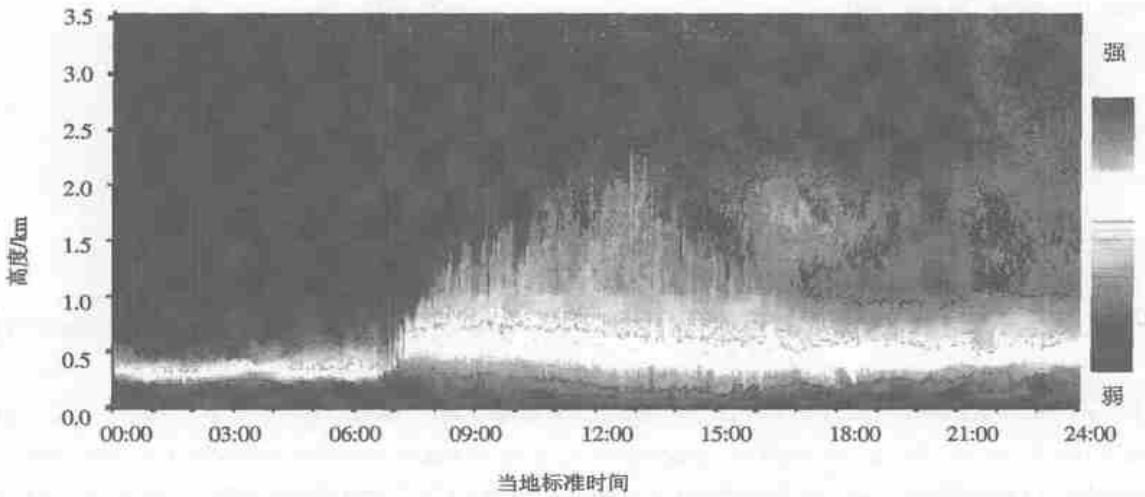


图 4 2002 年 4 月 30 日北京大学 MPL 观测的雷达信号(已经过距离订正和填充订正)

参考文献

- 1 白宇波,石广玉,田中耕一,等. 拉萨上空大气气溶胶光学特性的激光雷达探测. 大气科学, 2000, 24(4):559 - 567
- 2 Harshvardhan. In Aerosol-Cloud Climate Interactions. International Geophysics Series,1993,54:75 - 95
- 3 World Climate Programme. WCP-55. Report of the Experts Meeting on Aerosols and Their Climatic Effects. Geneva: World Meteorological Organization,1983. 107
- 4 Zuev V E. Laser Beams in the Atmosphere. New York:Plenum Press, 1982
- 5 Carswell A I. Lidar measurements of the atmosphere. Canad. J. Phys.,

- 1983,61:378 - 395
- 6 Fiocco G. Lidar systems for aerosol studies: an outline. Handbook for middle Atmosphere Programme (MAP),1984,13:56 - 83
- 7 Killinger D K, Menyuk N. Laser remote sensing of the atmosphere. Science,1987,235:37 - 45
- 8 Thomas L. Laser radar observations of middle atmosphere structure and composition. Phil. Trans. R. Soc. Lond.,1987,A323:597 - 609
- 9 Devara P C S, Raj P E. Remote sounding of aerosols in the lower atmosphere using a bistatic CW helium neon lidar. J. Aerosol Sci.,1989,20:37 - 44
- 10 Chanin M L, Hauchecorne A. Lidar study of the structure and dynamics of the middle atmosphere. Indian J. Radio Space Phys.,1991,20:1

- 11
- 11 Sassen K. Lidar cloud research. *Rev. Laser Eng.*, 1995, 23: 148 - 153
 - 12 Sassen K. The polarization lidar technique for cloud research: A review and current assessment. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1991, 72: 1848 - 1866
 - 13 Spinhirne J D. Micro pulse lidar. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 1993, 31: 48 - 55
 - 14 Welton E J, Kenneth J V, Patricia K Q, et al. Measurements of aerosol vertical profiles and optical properties during INDOEX 1999 using micro-pulse lidars. *J. Geophys. Res.*, 2002, 107 (D19): art. no. 8019
 - 15 Campbell J R, Hlavka D L, Welton E J, et al. Full-time, eye-safe cloud and aerosol lidar observation at atmospheric radiation measurement program sites: Instruments and data processing. *J. Atmos. Ocean. Tech.*, 2002, 19 (4): 431 - 442
 - 16 Hansen J E, Travis L D. Light scattering in planetary atmospheres. *Space Sci. Reviews*, 1974, 16: 527 - 610
 - 17 Collis R T H, Russell P B. *Laser Monitoring of the Atmosphere*. New York: Springer, 1976
 - 18 Klett J D. Stable analytical inversion solution for processing lidar returns. *Appl. Optics*, 1981, 20(2): 211 - 220
 - 19 Fernald F G. Analysis of atmospheric lidar observations: some comments. *Appl. Optics*, 1984, 23: 652 - 653
 - 20 Welton E J, Voss K J, Gordon H R, et al. Ground-based lidar measurements of aerosols during ACE-2: instrument description, results, and comparisons with other ground-based and airborne measurements. *Tellus B*, 2000, 52 (2): 636 - 651
 - 21 Klett J D. Lidar inversion with variable backscatter/extinction ratios. *Appl. Optics*, 1985, 24: 1638 - 1643
 - 22 Sasano Y B, Rowell E V, Ismail S. Error caused by using a constant extinction/backscattering ratio in the lidar solution. *Appl. Optics*, 1985, 24: 3929 - 3932
 - 23 Kovalev V A. Lidar measurement of vertical aerosol extinction profiles with range-dependent backscatter to extinction ratios. *Appl. Optics*, 1993, 32: 6053 - 6065
 - 24 Kovalev V A, Moosmuller H. Distortion of particulate extinction profiles measured with lidar in a two-component atmosphere. *Appl. Optics*, 1994, 33: 6499 - 6507
 - 25 Voss K J, Welton E J, Quinn P K, et al. Lidar measurements during Aerosols99. *J. Geophys. Res.*, 2001, 106(D18): 20821 - 20831
 - 26 Weibiao Chen, Hiroaki Kuzea, Akihiro Uchiyama, et al. One-year observation of urban mixed layer characteristics at Tsukuba, Japan using a micro-pulse lidar. *Atmospheric Environment*, 2001, 35: 4273 - 4280
 - 27 Devara P C S, Raj P E. Real-time monitoring of atmospheric aerosols using a computer-controlled lidar. *Atmos. Environ.*, 2000, 29(16): 2205 - 2215

Micro Pulse Lidar and Its Applications

He Qianshan Mao Jietai

(Department of Atmospheric Science, School of Physics, Peking University, Beijing 100871)

Abstract: Micro Pulse Lidar (MPL) systems provide continuous, automatic observation of nearly all significant atmospheric clouds and aerosols. Being compact in structure and with eye-safe transmitted radiation, the systems proved reliable in a number of experiments both at home and abroad (such as ACE-2 and Aerosols99). An introduction to the structures and working principles of MPL systems, as well as their advantages over traditional ones, are given. The retrieval methods of lidar determined aerosol optical properties (such as slope, near-end, far-end and iteration methods) and their advantages and disadvantages, and a summary of application researches of MPL to ABL and aerosol measurement, etc., are presented.

Key words: micro pulse lidar, aerosol, retrieval method, application