

高光谱分辨率激光雷达同时测量大气风和气溶胶光学性质的模拟研究^{*}

刘金涛 陈卫标 刘智深

(中国海洋大学海洋遥感研究所, 青岛, 266003)

摘 要 提出一套高光谱分辨率激光雷达 (HSRL) 系统, 用于同时测量大气风和气溶胶的光学性质。该 HSRL 系统中使用碘分子滤波器分离分子和气溶胶后向散射, 同时利用双边缘检测技术测量大气风场引起的多普勒频移。文中选用合理的 HSRL 参数和大气模型数据, 模拟和分析了 HSRL 的测量性能。系统夜晚运行时, 可测量 20 km 以下的大气风速和气溶胶, 风速误差小于 2 m s^{-1} , 气溶胶的后向散射系数相对误差小于 30%。在白天工作时, 相同误差下的可探测高度为 10 km。模拟分析结果表明, 该 HSRL 雷达有较大的应用前景, 对天气和气象研究等有重要意义。

关键词: 激光雷达; 气溶胶; 风速

1 引言

大气气溶胶的吸收和散射直接影响地球辐射平衡, 同时也会改变云的形成和特性, 从而间接影响大气辐射传输^[1]。大气风场是水汽、气溶胶、碳循环以及海气交换的主要动力, 因此测量大气风场、温度和气溶胶光学性质对天气数值预报、通量传输研究和动力气象研究都是至关重要的^[2]。

Shipley 等首先采用高光谱分辨率激光雷达 (HSRL) 和 Fabry - Perot 干涉 (FPI) 滤波器分离大气气溶胶散射和分子散射^[3], 解决了激光雷达测量气溶胶光学性质的一个病态数学问题, 而不用象 Klett 方法一样需要假设激光雷达比^[4]。随之, 又出现了基于碘分子滤波器的 HSRL^[5-7]。这些系统利用碘分子滤波器对气溶胶散射的高抑制比特性, 分离气溶胶和分子散射, 从而获得了高精度的大气气溶胶和分子光学参数剖面。在文献[5]和[7]中, 作者还通过测量分子散射反演出了高空大气温度剖面。

近 10 年, 非相干检测技术受到高度重视, 被认为是星载激光雷达测风的后选设备^[8]。单边缘检测技术通过测量滤波器透射率变化获得多普勒频移, 并建议可用在大气风场测量中^[9]。随后, Liu 等提出可采用碘分子吸收滤波器作为边缘滤波器, 测量大气风速^[10]。利用单边缘检测技术测量大气风速时, 需要知道气溶胶和分子散射比, 否则很难兼顾高低空的大气风速测量^[11]。因此, Korb 等的系统测量低空大气风速, 此时气溶胶散射强度远大于分子散射强度, 从而可以忽略分子散射信号^[12]。随后, Friedman 等利用基于碘分子滤波器的非相干测风雷达系统, 在忽略气溶胶影响的情况下,

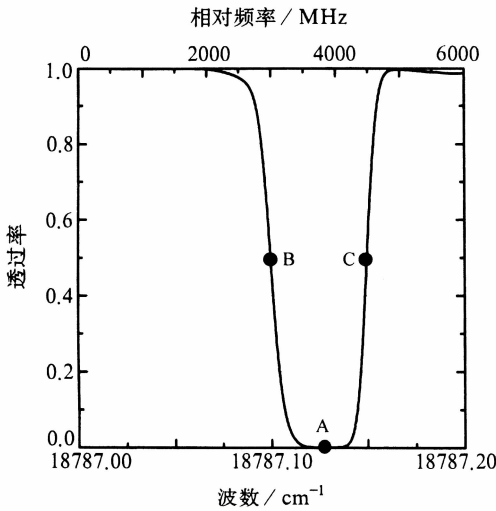


图1 碘分子滤波器的1106吸收线的光谱特性，
碘池长为40 cm，工作温度40℃

通过探测大气分子散射信号获得了高空风速^[13]。为提高风速测量灵敏度，在单边缘检测技术基础上 Korb 等又提出了双边缘检测技术^[14]。碘分子吸收线固有的透射率两翼（见图1），使得双边缘技术同样适用于基于碘分子吸收滤波器的高光谱分辨率激光雷达系统。

本文提出一套 HSRL 系统，利用碘分子吸收滤波器高光谱抑制比和高光谱分辨率特性，同时测量大气气溶胶后向散射系数和大气风速。当倍频 Nd: YAG (532 nm) 激光发射频率锁定在碘分子滤波器的吸收线中部时，可首先获得气溶胶和分子的后向散射比；当激光频率分别锁定在碘分子的透射率两翼中间时，利用双边缘检测技术和测量的后向散射比，反演出高精度

的风速信息。文中选用合适的系统参数和大气模型数据，模拟分析了本 HSRL 的测量性能和精度。

2 测量原理

图1是长为40 cm的碘分子滤波器1106吸收线（18787.13 cm⁻¹）^[15]工作在40℃的光谱透射率曲线。当激光发射频率在A点时，通过分离大气气溶胶和分子散射，获得大气气溶胶的光学特性；当激光频率移到B点或C点时，通过测量透射率的变化来获得多普勒频移。对一定的多普勒频移，透射率在B点和C点的变化规律是相反的，因此可以提高测量灵敏度。激光雷达的回波信号被分成两路，一路直接探测，作为能量检测（M通道）；另一路则通过碘分子滤波器，测量回波的光谱信号（F通道）。两个通道的接收信号可分别写成

$$N_M(r) = b_1 C_1 G(r) \frac{\Delta r}{r^2} [\beta_a(r) + \beta_m(r)] \exp \left\{ -2 \int_0^r [\alpha_a(r') + \alpha_m(r')] dr' \right\},$$

$$N_{F,i}(r) = b_2 C_2 G(r) \frac{\Delta r}{r^2} [f_{a,i}(\Delta v) \beta_a(r) + f_{m,i}(\Delta v) \beta_m(r)] \exp \left\{ -2 \int_0^r [\alpha_a(r') + \alpha_m(r')] dr' \right\}, \quad (1)$$

其中， N_M 、 $N_{F,i}$ 分别为 M 和 F 通道接收到的光子数， $i = A、B$ 或 C ； b_1 、 b_2 为两路分光比； C_1 、 C_2 为两路的系统常数，包括激光能量、光学效率和探测器的量子效率； $G(r)$ 代表激光雷达的距离因子； Δr 为距离分辨率； r 为探测距离； β_a 和 β_m (α_a 和 α_m) 分别是气溶胶和分子的后向散射（消光）系数； $f_{a,i}$ 和 $f_{m,i}$ 分别为气溶胶和分子散射信号通过碘分子滤波器的透射率。

大气分子瑞利散射光谱分布可近似为高斯形式：

$$I(v) = I_0 \exp \left[- \frac{(v - \Delta v)^2}{0.36(\delta v)^2} \right] \quad (2)$$

式中, Δv 为多普勒偏移; $\delta v = 7.16 \times 10^{-7} v_0 \sqrt{T/M}$ 为瑞利散射光谱宽度 (FWHM), v_0 为激光中心频率, T 为大气温度, M 为大气分子的平均摩尔质量 (28.96)。如温度为 280 K, 532 nm 的瑞利散射光谱宽度约为 1.25 GHz。可以看出, 光谱宽度随温度变化不是很灵敏, 一般从海平面到 25 km 的高空, 变化小于 15 %。因此在下面模拟中, 光谱宽度选用固定值 1.25 GHz。气溶胶的光谱宽度在 0.75 kHz ~ 0.7 MHz 之间, 相比于激光和碘分子吸收线线宽可以用狄拉克函数表示。在公式 (1) 中, $f_{a,i}$ 是激光、气溶胶和碘分子光谱的卷积结果; $f_{m,i}$ 则是激光、瑞利散射和碘分子光谱卷积的结果。

当激光频率锁定在 A 点时, 由于碘分子滤波器具有很高的抑制比, 气溶胶散射被滤除, 即 $f_{a,A} = 0$, 通过 M 通道和 F 通道的比值, 可以获得大气后向散射比 R_b :

$$R_b(r) = \frac{\beta_a(r) + \beta_m(r)}{\beta_m(r)} = \frac{K f_{m,A} N_M(r)}{N_{F,A}(r)}, \quad (3)$$

其中, K 为校准常数。如果激光雷达垂直测量, 因为大气垂直风速很小 (一般小于 1 m s^{-1}), 其造成的多普勒频移很小, 所以, $f_{m,A}$ 可由理论计算获得, 从而 R_b 可以得到。大气分子后向散射系数 β_m 可以通过标准大气模型和附近的探空资料求得, 所以气溶胶的后向散射系数求得为 $\beta_a = (R_b - 1)\beta_m$ 。

当激光频率锁在 B 或 C 点时, 多普勒频移可以通过测量回波信号经过碘分子滤波器的透射率变化来获得。此时 f_m 包含激光发射频率的初始透射率和多普勒频移引起的透射率变化, 其一阶泰勒展开为

$$f_{m,i}(\Delta v) = f_{m,i} + \frac{df_{m,i}(v)}{dv} \Delta v, \quad i = B, C, \quad (4)$$

式中, Δv 为多普勒频移, $f_{m,i}$ 为零风速时对应的透射率, $df_{m,i}(v)/dv$ 为光谱斜率。 f_a 也可作类似展开。F 通道与 M 通道之比表示为 [设公式 (1) 中, $b_1 C_1 = b_2 C_2$]:

$$k_i = \frac{(R_b - 1)f_{a,i}(\Delta v) + f_{m,i}(\Delta v)}{R_b}, \quad i = B, C, \quad (5)$$

把 f_a 、 f_m 代入公式 (5), 则两次测量的比值差 $k_B - k_C$ 可表示为

$$k_B - k_C = \frac{(R_b - 1) \left[(f_{a,B} - f_{a,C}) + \left(\frac{df_{a,B}(v)}{dv} - \frac{df_{a,C}(v)}{dv} \right) \Delta v \right]}{R_b} + \frac{(f_{m,B} - f_{m,C}) + \left[d \frac{f_{m,B}(v)}{dv} - \frac{df_{m,C}(v)}{dv} \right] \Delta v}{R_b}. \quad (6)$$

从图 1 可看出, 碘分子滤波器的两翼是基本对称的, 因此 $f_{a,B} \approx f_{a,C}$, $f_{m,B} \approx f_{m,C}$, $\frac{df_{a,B}(v)}{dv} \approx -\frac{df_{a,C}(v)}{dv}$, $\frac{df_{m,B}(v)}{dv} \approx -\frac{df_{m,C}(v)}{dv}$, 则视线风速可表示为

$$V = \frac{c}{2v_0} \Delta v \approx \frac{c}{2v_0} \frac{R_b(k_B - k_C)}{2(R_b - 1) \frac{df_a(v)}{dv} + 2 \frac{df_m(v)}{dv}}, \quad (7)$$

式中, c 为光速, v_0 为激光发射频率。气溶胶和分子散射通过碘分子滤波器的光谱响应

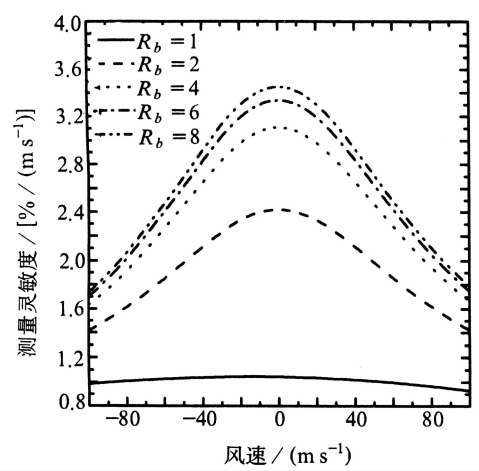


图2 不同后向散射比 R_b 下测量灵敏度和视线风速的关系

比例变化而变化的。当纯分子散射时 ($R_b = 1$)，测量灵敏度只有 $1\%/m\ s^{-1}$ ；而 R_b 大于 4 时，测量灵敏度即可达到 $3\%/m\ s^{-1}$ 。如果系统测量精度达到 1%，则可以推出在高空（平流层）利用分子散射，系统的风速测量精度为 $1\ m\ s^{-1}$ ；在对流层下部，由于强的气溶胶散射信号，风速测量精度可达到 $0.3\ m\ s^{-1}$ 。

3 HSRL 系统模拟和结果分析

表 1 为模拟计算选用的高光谱分辨率激光雷达的系统参数。系统采用种子注入、倍频 Nd: YAG 脉冲激光器，将激光输出线宽控制在 100 MHz 内（脉宽小于 8 ns）；抑制背景光的干涉滤光片的带宽为 0.5 nm；探测器采用量子效率 0.2 的光电倍增管，工

表 1 建议的高光谱分辨率激光雷达系统参数

参 数 名 称	参数值
激光器	Nb: YAG
脉冲能量	300 mJ
脉冲重复频率	10 Hz
激光线宽	<100 MHz
望远镜直径	300 mm
接收视场角	0.3 mrad
干涉滤色片带宽	0.5 nm
系统光学效率（不含碘分子滤波器）	0.4
探测器量子效率	20%
距离分辨率	75 m

斜率 $df_a(v)/dv$ 和 $df_m(v)/dv$ 可以通过分析计算获得。因此通过测量 $k_B - k_C$ 就可以反演出视线风速。

因为透射率变化在碘分子滤波器两翼上是相反的，所以双边缘比单边缘检测可提高近一倍的测量灵敏度。测量灵敏度定义^[14]为

$$\Theta = \frac{1}{F} \frac{dF(v)}{dv}, \tag{8}$$

式中， F 为气溶胶和分子散射信号通过碘分子滤波器的总光谱响应。图 2 为不同后向散射比 R_b 下，利用图 1 碘分子滤波器光谱和气溶胶、瑞利散射光谱计算获得的不同测量灵敏度，可以看出测量灵敏度是随两分量的

工作在光子计数模式；碘分子滤波器中碘池长度为 40 cm，工作温度为 40℃，此时 1106 吸收线的 FWHM 接近 1.5 GHz。因此激光发射频率可以通过声光调制，分别移到 A、B 或 C 点。

大气分子模型采用 1976 年美国标准大气，气溶胶则利用 Spinhirne 的模型^[16]，边界层选用都市气溶胶模型，随同后向散射比 R_b 一起显示在图 3 中。大气水平风剖面的模式选用 Emmitt 等假设的参数^[17]，在本文模拟中均假设为正的视线风速。在 532 nm 附近，白天太阳背景辐射常数 I_b 为 $0.014\ W\ cm^{-2}\ sr^{-1}\ nm^{-1}$ ，则背景光子数可由下式给出：

$$N_b = \frac{I_b s \pi \varphi^2}{h\nu} \frac{2\Delta r}{4c} \Delta\lambda \eta, \quad (9)$$

式中, φ 为接收视场角, s 为望远镜接收面积, $\Delta\lambda$ 为干涉滤光片的带宽, $h\nu$ 为光子能量, η 为接收效率包括光学效率和探测器量子效率。

根据误差传播理论, 大气后向散射比的不确定可表示为

$$\left(\frac{\delta R_b}{R_b}\right)^2 = \left(\frac{\delta N_{M,A}}{N_{M,A}}\right)^2 + \left(\frac{\delta N_{F,A}}{N_{F,A}}\right)^2, \quad (10)$$

上式的右边两项可认为是每个通道信号信噪比的倒数。如果忽略探测器的噪声, 每个通道的信噪比 $S_{N_{Ri}} = \sqrt{m}N_i/\sqrt{N_i + N_b}$, 其中 m 为平均次数。同样地, 气溶胶的后向散射系数的相对误差为

$$\left(\frac{\delta \beta_a}{\beta_a}\right)^2 = \left(\frac{\delta \beta_m}{\beta_m}\right)^2 + \left(\frac{\delta R_b}{R_b - 1}\right)^2. \quad (11)$$

一般, 根据模式大气或探空资料计算获得的分子后向散射系数 β_m 的相对误差小于 2%, 因而, 气溶胶后向散射系数的相对误差主要取决于后向散射比。

如果忽略激光频率的稳定性影响, 视线风速误差可通过 (7) 式获得:

$$(\delta V)^2 = (\delta k_B)^2 \left(\frac{\partial V}{\partial k_B}\right)^2 + (\delta k_C)^2 \left(\frac{\partial V}{\partial k_C}\right)^2 + (\delta R_b)^2 \left(\frac{\partial V}{\partial R_b}\right)^2. \quad (12)$$

上式展开后, 视线风速的相对误差可表示为

$$\begin{aligned} \left(\frac{\delta V}{V}\right)^2 = & \left(\frac{\delta k_B}{k_B - k_C}\right)^2 + \left(\frac{\delta k_C}{k_B - k_C}\right)^2 \\ & + \left(\frac{\delta R_b}{R_b}\right)^2 \left\{ \left[\frac{df_m(v)}{dv} - \frac{df_a(v)}{dv} \right] / \left[(R_b - 1) \frac{df_a(v)}{dv} + \frac{df_m(v)}{dv} \right] \right\}^2. \end{aligned} \quad (13)$$

假设激光雷达每次测量时间为 3 min, 即 1800 (m) 个脉冲平均。图 4a 为后向散射比的相对测量误差的模拟结果。晚上测量时, 24 km 以下的后向散射比的相对测量误差小于 6%; 白天工作时, 相对误差从 16 km 以上急剧增加, 24 km 达到 70%。无论晚上还是白天, 后向散射比的测量精度还是相当高的, 相对误差小于 10% 的探测高度可达到 16 km。图 4b 显示的气溶胶后向散射系数的相对误差, 晚上, 高度 20 km 以下的测量相对误差小于 30%, 白天同样测量误差的观测高度为 10 km。可以看出本文提出的高光谱分辨率激光雷达可以获得高精度的后向散射比和气溶胶后向散射系数。

大气风速误差的分析相对复杂一些,

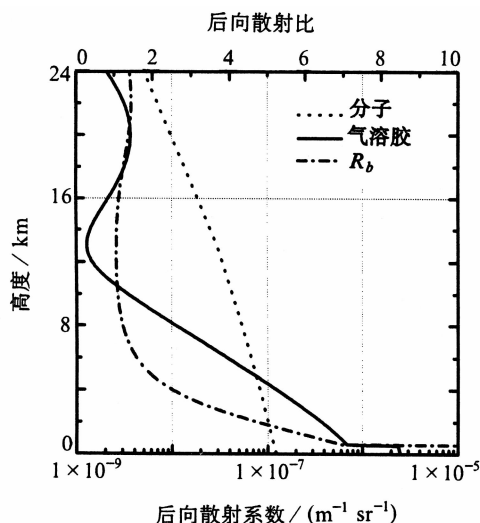


图 3 模式大气分子和气溶胶后向散射系数及相应的后向散射比

从公式 (11) 中看出, 风速误差与 k_B 、 k_C 、 R_b 的测量误差有关。从图 4 的模拟结果看出, R_b 的相对测量误差是比较小的。因此, 视线风速误差主要取决与 k_B 和 k_C 的相对测量误差。假设风速观测时的仰角为 60° , 激光发射频率锁定在 B 和 C 点, 测量时间均为 3 min。图 5a 和 b 分别给出晚上和白天的模拟结果。HSRL 在晚上工作时, 在高度 20 km 以下, 视线风速误差小于 2 m s^{-1} , 相对误差小于 30%。虽然白天运行时, 太阳背景降低了信噪比, 但在 10 km 以下, 误差仍可控制在 2 m s^{-1} 以内。本节模拟的视线风速范围在 50 m s^{-1} 以内, 基本覆盖了实际天气的风速范围。同时, 更长的平均时间会提高风速精度。

应用单边缘检测技术测量大气风速的最大缺点是需要预先知道大气的后向散射比信息。Flesia 等在双边缘技术中, 提出了两个 FPI 滤波器的参数优化, 使系统对分子和

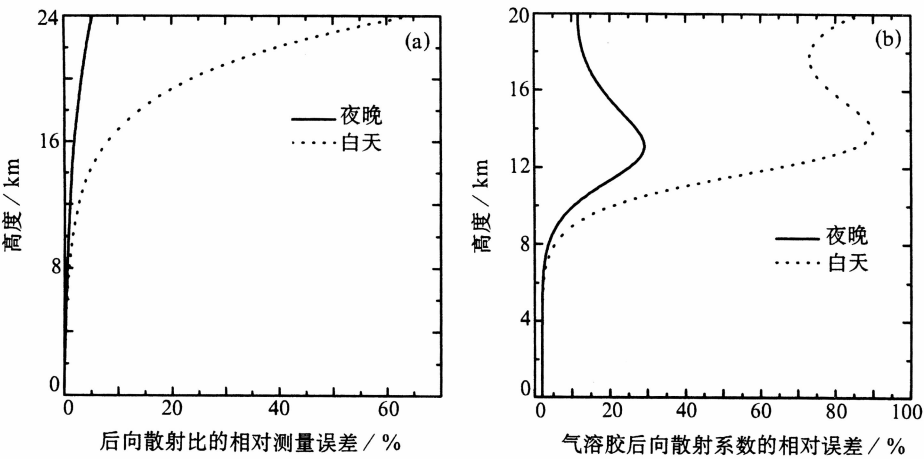


图 4 晚上 (实线) 和白天 (点线) 测量时, 后向散射比 (a) 和气溶胶后向散射系数 (b) 的模拟结果

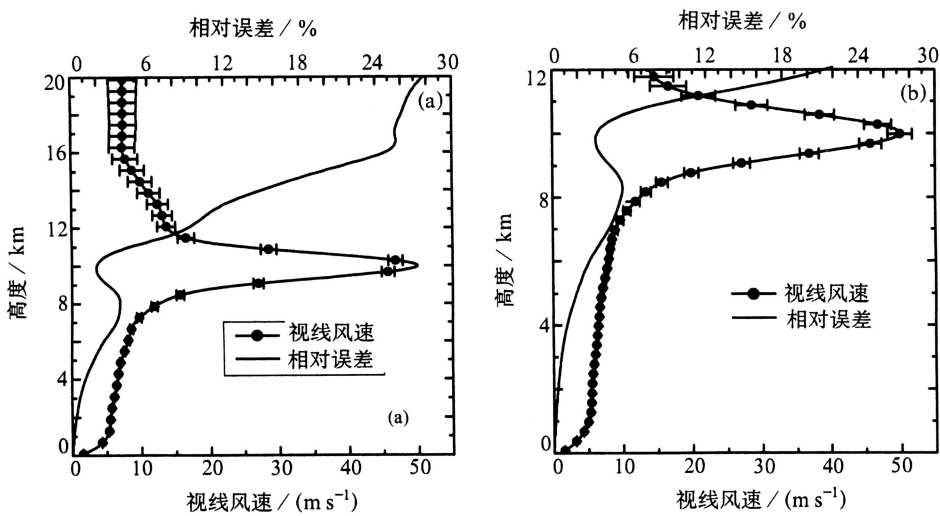


图 5 晚上 (a) 和白天 (b) 测量时视线风速误差模拟结果

气溶胶散射的测量具有相同的灵敏度, 这样就使激光测风雷达系统摆脱对后向散射比先验知识的依赖^[18]。而碘分子滤波器只能通过改变工作温度, 改变吸收线的光谱宽度, 难以进行参数优化。从图 2 可知, 测量灵敏度与后向散射比是密切相关的。公式 (7) 也是基于后向散射比已知的条件推导出来的。在无法获取后向散射比的情况下, 可根据大气分子模型和该地区气溶胶的历史观测数据, 根据图 2 的测量灵敏度与后向散射比的关系, 选择一个平均测量灵敏度曲线。这样风速误差可表示为 $\delta V = 1/(\Theta S_{NR})$, 其中 S_{NR} 是指两个通道的总信噪比。参考文献 [12] 给出了相关的模拟分析结果。但是, 这种方法难免会造成速度误差的偏高或偏低估计。

这里同时需指出的是, 上面的模拟均忽略了激光频率的偏移。激光频率可以用类似文献 [10] 的方法给予稳定。如果频率稳定精度为 1 MHz, 对后向散射比和气溶胶的后向散射系数测量来说, 引起的误差可忽略, 但对风速测量来说, 会带来近 0.25 m s^{-1} 的误差。另外由于碘分子滤波器的温度稳定影响等, 因此实际测量时, 测量误差比上述模拟结果要大。

4 结论

本文利用碘分子吸收光谱特性和双边缘检测技术, 提出了一套同时测量大气气溶胶光学特性和风速的 HSRL 系统。该系统可以分离大气气溶胶和分子散射, 因而不需任何假设, 可以直接反演出大气的后向散射比和气溶胶的后向散射系数; 同时采用双边缘检测技术, 可以获得高精度的大气风速信息。根据建议的 HSRL 系统, 文中模拟分析了系统测量性能, 结果表明可以获得高精度的气溶胶后向散射系数和大气风场。建立这样一个综合的地面大气观测系统, 对天气数值预报、气溶胶传输和气象动力研究具有十分重要的意义。

参 考 文 献

- 1 Hobbs, P. V., *Aerosol - Cloud - Climate Interactions*, Academic Press, San Diego, 1993.
- 2 Baker, W., G. D. Emmitt et al., Lidar - measured wind from space; a key component for weather and climate prediction, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1995, **76**, 869 ~ 888.
- 3 Shipley, S. T., D. H. Tracy et al., High spectral resolution lidar to measure optical scattering properties of atmospheric aerosols. 1: theory and instrumentation, *Appl. Opt.*, 1983, **22**, 3716 ~ 3722.
- 4 Klett, J. D., Stable analytical inversion solution for processing lidar returns, *Appl. Opt.*, 1981, **20**, 211 ~ 220.
- 5 Shimizu, H., S. A. Lee et al., High spectral resolution lidar system with atomic blocking filters for measuring atmospheric parameters, *Appl. Opt.*, 1983, **22**, 1373 ~ 1381.
- 6 Piironen, P. and E. W. Eloranta, Demonstration of a high - spectral - resolution - lidar based on an iodine absorption filter, *Opt. Lett.*, 1994, **19**, 234 ~ 236.
- 7 Liu, Z., I. Matsui et al., High - spectral - resolution lidar using an iodine absorption filter for atmospheric measurements, *Opt. Eng.*, 1999, **38**, 1661 ~ 1670.
- 8 McGill, M. J., W. D. Hart et al., Modeling the performance of direct - detection Doppler lidar system including cloud and solar background variability, *Appl. Opt.*, 1999, **38**, 6388 ~ 6397.
- 9 Korb, C. L., B. M. Gentry et al., The edge technique: theory and application to the lidar measurement of atmospheric

- winds, *Appl. Opt.*, 1992, **31**, 4202 ~ 4213.
- 10 Liu, Z. S., W. B. Chen et al., An incoherent Doppler lidar for ground – based atmospheric wind profiling, *Appl. Phys. B.*, 1997, **64**, 561 ~ 566.
 - 11 McKay, J. A., Modeling of direct detection Doppler wind lidar 1. The edge technique, *Appl. Opt.*, 1998, **37**, 6480 ~ 6486.
 - 12 Korb, C. L., B. M. Gentry et al., Edge technique Doppler lidar wind measurements with high vertical resolution, *Appl. Opt.*, 1997, **36**, 5976 ~ 6983.
 - 13 Friedman, J. S., C. A. Tepley et al., Middle – atmospheric Doppler lidar with an iodine – vapor edge filter, *Opt. Lett.*, 1997, **22**, 1648 ~ 1650.
 - 14 Korb, C. L., B. M. Gentry et al., Theory of the double edge technique for Doppler lidar wind measurements, *Appl. Opt.*, 1998, **37**, 3097 ~ 3104.
 - 15 Gerstenkorn, S., and P. Luc, *Atlas du Spectre d'Absorption de la Molecule d'Iode*, Laboratoire Aime – Cottou CNRS, Orsay, France, 1978, 53.
 - 16 Spinhirne, J. D., Micro pulse lidar, *IEEE Trans. Geosc. Rem. Sens.*, 1993, **31**, 48 ~ 55.
 - 17 Emmitt, G. D., J. D. Spinhirne et al., Target atmospheres for use in DWL concept studies, 4th draft, February 1998.
 - 18 Flesia, C. and C. L. Korb, Theory of the double – edge molecular technique for Doppler lidar wind measurement, *Appl. Opt.*, 1999, **38**, 432 ~ 440.

A Simulation of Simultaneously Measuring Wind and Aerosol Optical Properties Using High Spectral Resolution Lidar

Liu Jintao, Chen Weibiao, and Liu Zhishen

(*Ocean Remote Sensing Institute,*
Ocean University of China, Qingdao 266003)

Abstract A high spectral resolution lidar (HSRL) system which is capable of measuring aerosol backscattering and line – of – sight wind velocity from the troposphere to the stratosphere is proposed. An iodine vapor filter is used to separate the Mie and Rayleigh scattering components, as well as to discriminate the Doppler shift frequency by using double edge technique. The performances of the lidar system are simulated with reasonable parameters and atmospheric model. The error of line – of – sight wind velocity below an altitude of 20 km is smaller than 2 m s^{-1} , and the error of the aerosol backscattering coefficients is smaller than 30% if HSRL is employed in the night. In the daytime, the lidar system can remotely sense wind velocity and aerosol backscattering coefficients within an altitude of 10 km with the same accuracy. This system has a good potential for the study of climate and meteorology.

Key words: lidar; aerosol; wind velocity