

文章编号: 1001-3806(2009)03-0303-04

气溶胶质量浓度垂直分布反演模型的研究

张春光, 张玉钧*, 韩道文, 陈臻懿, 刘文清

(中国科学院 安徽光学精密机械研究所 环境光学与技术重点实验室, 合肥 230031)

摘要: 激光雷达监测气溶胶垂直分布一直是大气环境监测领域的重要内容之一。为了研究大气气溶胶质量浓度的垂直分布, 对气溶胶质量浓度反演模型进行了理论分析和实验验证。在理论分析后向散射系数与质量浓度之间指数关系及气象因子对气溶胶质量浓度分布影响的基础上提出了一种指数修正模型。采用非线性最小二乘法与经验相结合的方法进行了实验验证, 获得了模型参量并反演了气溶胶质量浓度的垂直分布。结果表明, 修正模型与实际情况更接近, 能更好地反映气象因子对气溶胶质量浓度分布的影响, 该修正模型对于气溶胶的垂直分布研究具有一定的参考价值。

关键词: 激光技术; 激光雷达; 反演; 气溶胶质量浓度; 垂直分布; 气象因子

中图分类号: X831 **文献标识码:** A

Study on retrieval model for vertical distribution of aerosol mass concentration

ZHANG Chun-guang, ZHANG Yu-jun, HAN Dao-wen, CHEN Zhen-yi, LIU Wen-qing

(Key Laboratory of Environmental Optics & Technology, Anhui Institute of Optics & Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: Monitoring the vertical distribution of the aerosol with lidar is one of the focuses in the environment monitoring field. In order to study the vertical distribution of the air aerosol, a model to retrieve aerosol mass concentration was analyzed theoretically and proved experimentally. A modified model was presented based on exponent model and analysis of influence of the meteorological factors upon aerosol mass concentration. With the method of nonlinear least squares and some experience, some key parameters of the model and the vertical distribution of mass concentration can be retrieved. Conclusions are drawn as follows: the modified model can satisfactorily reflect the influence of meteorological factors upon aerosol mass concentration; the retrieved results consist with measured values. The results may be regarded as a reference to the research in this field.

Key words: laser technique; lidar; retrieval; aerosol mass concentration; vertical distribution; meteorological factors

引言

大气气溶胶粒子普遍存在于对流层中, 在大气中的含量很低, 却扮演着十分重要的角色。对流层气溶胶粒子通过吸收和散射太阳辐射以及地球的长波辐射影响着地球-大气系统的辐射收支平衡, 通过改变云的微物理特性参与云的形成, 从而对局地、区域乃至全球的气候有着重要的影响。与对全球气候影响一样, 气溶胶对全球环境的影响也日趋严重, 是观测城市对流层大气污染物时空演变以及城市空气质量的天然载体^[1]。

气溶胶质量浓度垂直分布的研究一直是环境监测领域的重要课题之一。由于技术条件的限制, 一直缺

乏有效的方法对气溶胶质量浓度的空间垂直分布进行监测。激光雷达并不能直接给出气溶胶质量浓度, 只能给出反映气溶胶光学特性的后向散射廓线, 因而需要建立利用激光雷达探测到的气溶胶光学参量来反演气溶胶质量浓度分布的方法。然而, 诸如后向散射系数这样的光学特性与气溶胶质量浓度之间并没有严格的对应关系, 其它相关因素对后向散射系数和质量浓度的影响不容忽视, 因此, 仅仅利用激光雷达探测到的气溶胶光学特性来反演其质量浓度分布, 其准确性必将受到怀疑^[2]。大气气溶胶是一个非常复杂的体系, 其质量浓度的变化受很多因素的影响。资料表明, 在污染源不变的情况下, 气象因子对气溶胶的浓度分布有很大的影响^[3]。作者研究了气象因子对气溶胶质量浓度的影响, 对反演气溶胶质量浓度的指数模型进行了修正。利用近地面的数据确定各个参量, 然后利用所得到的参量和各个高度后向散射系数以及气象数据来反演气溶胶质量浓度的垂直变化, 实验表明: 该模型能更好地反演气溶胶的垂直分布。

基金项目: 公益性行业(气象)科研专项基金资助项目(GYHY200706023)

作者简介: 张春光(1981-), 男, 硕士研究生, 主要从事激光雷达气溶胶监测方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: yjzhang@aiofm.ac.cn

收稿日期: 2008-03-18; 收到修改稿日期: 2008-05-06

1 指数模型

国内 SUN 早在 1982 年就对激光遥测大气气溶胶质量浓度进行了理论分析^[2],指出质量浓度 $m(z)$ 与消光系数 $\alpha(z)$ 之间是呈比例关系,用下式表示为:

$$m(z) = \gamma\alpha(z) \quad (1)$$

式中, γ 为比例系数^[2]。由于消光系数和后向散射系数之间的关系并不是严格的线性, KLETT 假定它们之间存在下述关系^[4]:

$$\beta(z) = K \cdot \alpha^q(z) \quad (2)$$

式中, $\beta(z)$ 是后向散射系数 ($\text{km}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$), q 与激光波长、气溶胶粒子特性有关。所以有:

$$m(z) = \gamma\alpha(z) = \gamma \left[\frac{\beta(z)}{K} \right]^{1/q} = a \times \beta^b(z) \quad (3)$$

考虑到测量时的一些不稳定因素, (3) 式可以写为:

$$m(z) = a \times \beta^b(z) + C \quad (4)$$

(4) 式就是气溶胶质量浓度反演的指数模型。式中, a, b 为模型参量, 与季节、气溶胶模式^[5]、气象以及测量时的具体气溶胶有关, C 与当时测量仪器的稳定性及其它不稳定因素有关。

2 模型的修正

2.1 气象因子对气溶胶质量浓度的影响

2.1.1 相对湿度 (relative humidity, RH) 的影响 对单个粒子而言, 当相对湿度增加时, 粒子质量在增加, 质量浓度与相对湿度呈正相关的关系^[6-7]。当相对湿度大时, 颗粒物 (particulate matter, PM) 由于吸湿使质量浓度增加; 另外, 湿度变大有利于气粒转化, 也能使颗粒物数浓度增加。图 1 是一组实际测量的湿度与可吸入颗粒物质量浓度的数据, 从中可以看出两者之间明显的正相关关系。

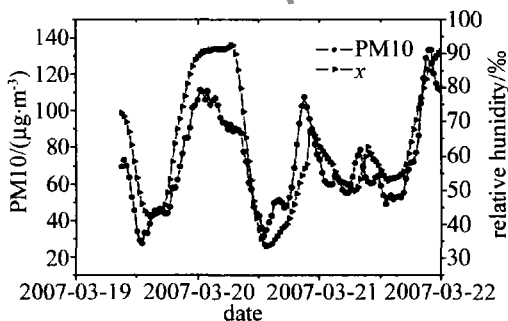


Fig. 1 Positive correlation of relative humidity and PM10 mass concentration

气溶胶颗粒物的后向散射系数受到相对湿度的影响显著, 因此, 当利用后向散射系数来反演气溶胶质量浓度时, 必须考虑相对湿度对气溶胶质量浓度的影响^[8]。一般来说, 这一湿度影响因子可表示为^[9]:

$$f(x) = 1/(1 - x/100) \quad (5)$$

x 为以百分数表达的相对湿度。

2.1.2 温度的影响 温度会影响单个气溶胶粒子的布朗运动, 而粒子布朗运动的扩散能力与温度成正比^[10]。对于固定高度的气溶胶, 温度低时, 不利于气溶胶扩散, 气溶胶浓度高; 随着温度升高, 布朗运动加剧, 气溶胶粒子浓度降低。

图 2 是随机选择的一组温度与气溶胶质量浓度的测量数据, 从中可以看出二者明显的负相关关系。

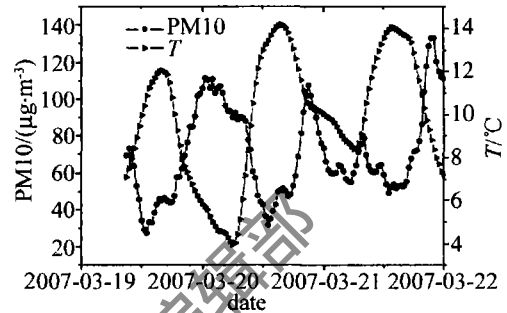


Fig. 2 Negative correlation of temperature and PM10 mass concentration 温度对气溶胶分布的影响可以近似用负指数规律递减描述^[11], 温度影响因子可表述如下:

$$f(T) = d \times \exp\left(\frac{273 - T}{273}\right) \quad (6)$$

式中, d 为影响系数, T 为温度 ($^{\circ}\text{C}$)。温度项 $(273 - T)/273$ 的作用是保证在气温变化范围内, 该项为正值且影响小。

2.1.3 风速的影响 大气低层风速对污染物的传输及扩散过程有重要的影响, 通常风速越大越有利于空气中污染物质的稀释扩散。而长时间的微风或静风会抑制污染物的扩散, 使近地面层的污染物浓度成倍增长。

图 3 是近地面风速和 PM10 质量浓度的负相关示意图。经验表明^[12]: 在污染源一定的情况下, 污染浓

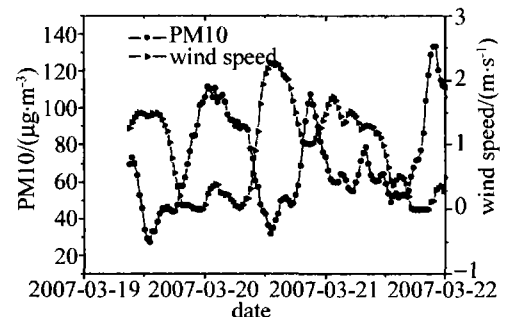


Fig. 3 Negative correlation of wind speed and PM10 mass concentration 度与风速大小成反比。但是当风速接近 0 时, 污染浓度变得很大, 所以影响因子可以用下式表示:

$$f(v) = \frac{1}{v^2 + f} \quad (7)$$

式中, v 为风速 (m/s), f 的作用是保证风速的影响因子是有限的, 且能保证风速对浓度的影响不是很大。

2.2 修正反演模型

由于气象因子对气溶胶的影响非常大,通过前面对温度、相对湿度以及风速对气溶胶质量浓度的影响分析,可以将指数模型修正为:

$$m(z) = a\beta^b(z) + d \exp\left(\frac{273 - T}{273}\right) + \frac{1}{1 - x/100} + \frac{1}{v^2 + f} + C \quad (8)$$

把(8)式所表示的气溶胶质量浓度反演模型称为气溶胶质量浓度的修正反演模型。如果假定气溶胶成分比例不随高度发生变化,就可以利用近地面获得的模型参量来反演各个高度的气溶胶浓度。

3 实验结果与分析

为了对上面建立的修正模型进行验证,以实验实际测量的数据进行分析。实验地点在合肥市西郊的董铺岛,时间为2007-03。实验仪器有米散射激光雷达、气象参量仪和振荡天平(tapered element oscillating microbalance, TEOM)。其中气象参量仪可以测定温度、湿度、风速等气象参量;激光雷达垂直测量大气回波信号,通过Fernald反演算法^[13]能够得到气溶胶后向散射系数廓线,垂直分辨率为10m。近地面可吸入颗粒物质量浓度由振荡天平测量。整个实验过程中仪器都正常工作,均24h连续测量,激光雷达的测量周期为15s,TEOM的采样间隔为30min,气象参量仪的测量周期为1min。

3.1 近地面数据结果

首先利用激光雷达测量的后向散射数据和TEOM测量的气溶胶浓度数据,按照非线性拟合方法确定指数模型中的参量;然后,结合温度、相对湿度、风速数据,在保持 a, b 参量不变的情况下,结合经验,确定修正模型中的其它参量。两种模型的参量如表1所示。

Table 1 Parameters of two models

parameter	a	b	d	f	C
modified	500	0.91	5	0.1	-60
exponential	500	0.91			-35

利用上述两种模型及获得的参量反演了气溶胶质量浓度数据,并与实际测量值进行了对比和相关性分析。图4和图5分别是用两种模型参量反演得到的气溶胶质量浓度值与实际测量值的对比和相关性示意图。从图中可以看出:修正模型得到的结果更接近实际测量值;指数模型反演的结果与实际测量值的相关系数为0.91979,而修正模型反演的结果与实际测量值的相关系数为0.93185,有所改善,表明修正模型能够更好地反演气溶胶质量浓度。

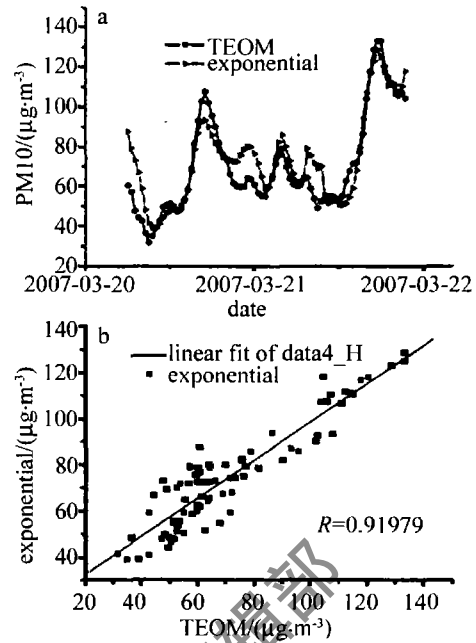


Fig. 4 a—comparison between retrieved values with exponential model and measured values b—correlation of retrieved values with exponential model and measured values

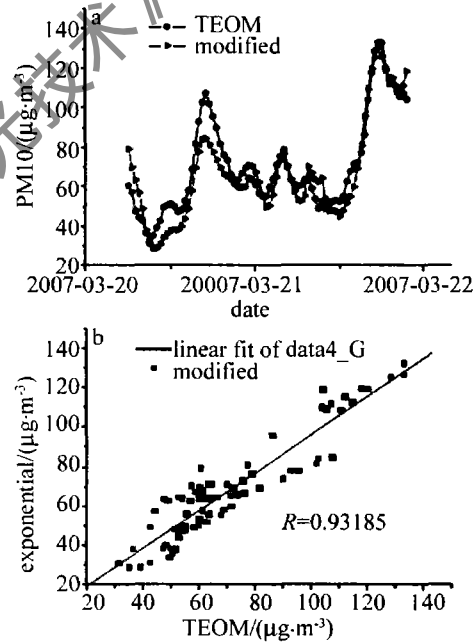


Fig. 5 a—comparison between retrieved values with modified model and measured values b—correlation of retrieved values with modified model and measured values

3.2 垂直数据结果

在进行垂直反演之前需要获得气象参量的垂直分布数据。一般情况下,温度和湿度对随着高度增加而减小。根据欧洲地区标准夏天大气的温度和水蒸气垂直分布实验统计结果拟合的 T 和 x 随高度的变化规律^[14]为:

$$T = T_0 - 0.0065 \times z \quad (9)$$

$$x = x_0 - 0.96 \times z \quad (10)$$

式中, T_0 是近地面温度($^{\circ}\text{C}$), x_0 是近地面相对湿度,用百分数表示。风速 v 一般情况下随高度的增加而变

大,可以用对数廓线模式^[15]表示为:

$$v = v_0 \ln(z) \quad (11)$$

式中, v_0 为近地面风速(m/s)。

利用(9)式~(11)并结合探测的近地面温度、相对湿度和风速数据就可以获得它们的垂直变化廓线,利用修正前后两种模型对2007-03-21的8:00和21:30两个时刻的数据进行了反演,得到了气溶胶浓度的垂直变化廓线。图6和图7分别是上述两模型反演的气溶胶质量浓度垂直分布示意图及两种模型反演结果的相关性示意图。图中 exponential 表示指数模型反演

的结果, modified 表示修正模型反演的结果。

从图6和图7可以看出,两种模型反演的结果总体上是一致的,相关性都在0.99以上,在个别地方还存在一些明显的区别。在近地面,修正模型的反演结果与指数模型的反演结果非常接近,而在空中,修正模型的结果则小于指数模型。这是因为加入了气象因子修正而产生的,这与大粒子向下沉降,高空风速大更有利于粒子扩散,相对湿度变小等实际情况较为一致。因此,修正模型可能更适合气溶胶质量浓度垂直分布的反演,可信度更高。

4 结论

气象因子对气溶胶质量浓度的影响是客观存在的。作者分析了气象因子对气溶胶的影响,建立了指数修正模型。实验结果表明,该模型能较为准确地反映气象因子对气溶胶质量浓度分布的影响,与实际更接近,可为反演气溶胶质量浓度分布提供有益的参考。但是由于影响气溶胶分布的因素太多,还需要进一步研究相关因素的影响,对模型进行完善和优化。

参考文献

- [1] YANG H, LIU W Q, LIU J G, *et al.* Monitoring and study of city tropospheric aerosol [J]. *Laser Technology*, 2006, 30(2): 174-176 (in Chinese).
- [2] SUN J Q, ZHANG H F. A theoretical analysis of remote measurement of mass concentration of atmospheric dust using lidar [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1982, 2(1): 36-43 (in Chinese).
- [3] YANG D Zh, YU H Q, DING G A, *et al.* An analysis of aerosols in the lower-level atmosphere over Beijing northern suburbs in winter [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2002, 13(s1): 113-126 (in Chinese).
- [4] KLETT J D. Stable analytical inversion solution for processing lidar returns [J]. *Appl Opt*, 1981, 20(2): 211-220.
- [5] YAN P, LI W L, QIN Y. A review of the current development of atmospheric aerosol models [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2004, 15(5): 629-640 (in Chinese).
- [6] ZHANG J Sh, SHI G Y. The impact of relative humidity on the radiative property and radiative forcing of sulfate aerosol [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2002, 60(2): 230-237 (in Chinese).
- [7] ZHANG R J, WANG M X, *et al.* Preliminary research on the size distribution of aerosols in Beijing [J]. *Climatic and Environmental Research*, 2000, 5(1): 85-89 (in Chinese).
- [8] HOWELL S G, CLARKE A D, SHINOZUKA Y, *et al.* Influence of relative humidity upon pollution and dust during ACE-Asia: size distributions and implications for optical properties [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2006, 111(D06205): 2-6.
- [9] LI Ch C, MAO J T, LIU Q H, *et al.* Application of MODIS remote sensing aerosol products in the air pollution studies of Beijing [J]. *Science in China*, 2005, D35(s1): 177-186 (in Chinese).
- [10] ZHANG Ch Ch, ZHOU W X. *Atmospheric aerosol* [M]. Beijing: Meteorological Press, 1995: 89 (in Chinese).

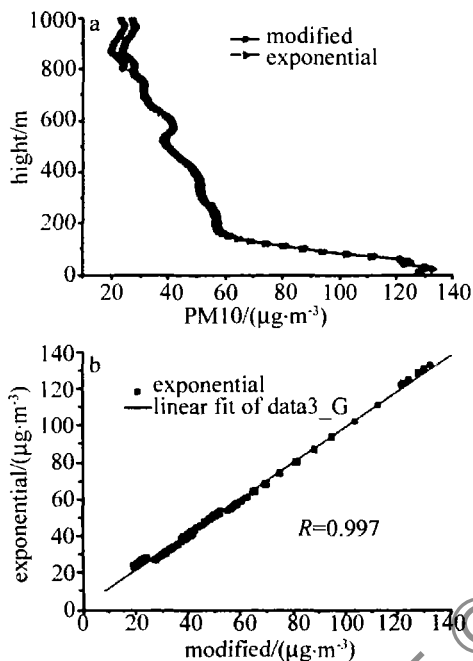


Fig. 6 a—comparison of both models retrieved results at 2007-03-21T 8:00
b—correlation of both models retrieved results at 2007-03-21T 8:00

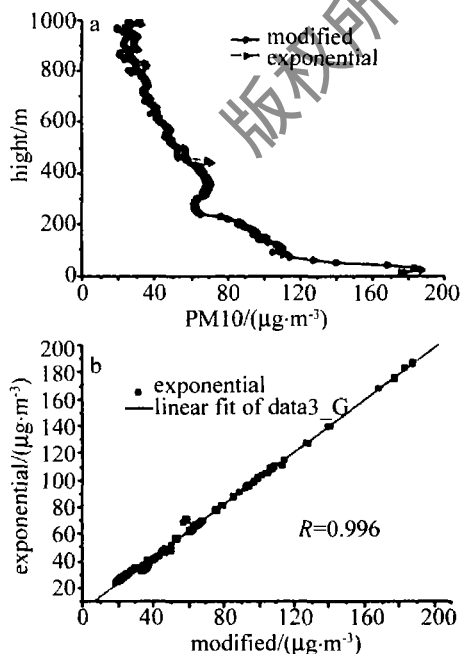


Fig. 7 a—comparison of both models retrieved results at 2007-03-21T 21:30
b—correlation of both models retrieved results at 2007-03-21T 21:30

温度波动度为 $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$ 。采用光纤光栅解调仪记录光纤光栅反射谱数据,该设备波长解调精度为 1pm ,数据送计算机进行高斯拟合,进而计算出中心波长。每次水箱达到预定温度后保持 10min ,等温度场趋于一致后开始测量,每隔 10°C 采集一次数据。

图3是测量的峰值波长与温度的关系图。通过线

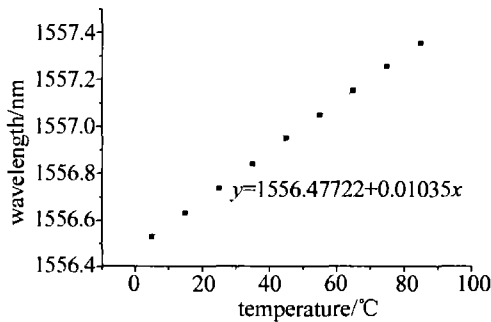


Fig.3 Relationship of wavelength and temperature

性拟合,得到峰值波长与温度的线性关系: $y = 1556.47722 + 0.01035x$ 。利用此公式,由测量的峰值波长可以计算得到温度值,见表2。温度测量的误差如图4所示。温度测量值与实际温度之间的标准方差为 0.3°C 。

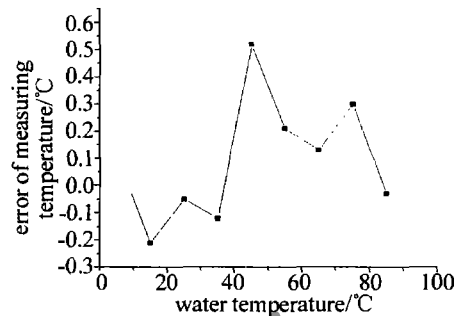


Fig.4 Error of measuring temperature

Table 2 Water temperature and measuring temperature

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
water temperature/ $^{\circ}\text{C}$	5	15	25	35	45	55	65	75	85
measuring temperature/ $^{\circ}\text{C}$	5.11	14.79	24.95	34.88	45.52	55.21	65.13	75.3	84.97

4 结论

针对基于可调谐法布里-珀罗(F-P)滤波器的光纤光栅解调仪解调精度不够高的问题,提出了在解调过程中对光纤光栅反射谱进行高斯拟合,从而消减噪声影响的方法。研究表明,该方法能有效提高波长检测精度。拟合以后,中心波长的测量误差不大于 2.5pm ,这个精度大约比直接峰值检测的结果要好一个数量级。并且温度测量值与实际温度之间的标准方差为 0.3°C ,能满足一般工程的测量要求。

参考文献

[1] ZHANG W, LU Zh T. Using fiber-optic sensors for bridge monitoring [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2003, 20(3): 54-58 (in Chinese).
 [2] ZHOU Zh, TIAN Sh Zh, ZHAO X F, et al. Theoretical and experimental studies on the strain and temperature sensing performance of optical FBG [J]. Journal of Functional Materials, 2002, 33(5): 551-554 (in Chinese).
 [3] CHAN C C, JIN W, DEMOKAN M S. Enhancement of measurement accuracy in fiber Bragg grating sensors by using digital signal process-

ing [J]. Optics and Laser Technology, 1999, 31(4): 299-307.
 [4] CHAN C C, GONG J M, SHI C Z, et al. Improving measurement accuracy of fiber Bragg grating sensor using digital matched filter [J]. Sensors and Actuators A-Physical, 2003, A104(1): 19-21.
 [5] CHAN C C. Improving the wavelength detection accuracy of FBG sensors using an ADALINE network [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2003, 15(8): 1126-1128.
 [6] JIANG D Sh, GAO Zh T, ZHANG C. Fitted algorithm to improve the precision of demodulation system of Bragg grating sensor [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2006, 25(4): 65-66 (in Chinese).
 [7] JIANG D Sh, GAO P, ZHANG C, et al. Straight line fitting of fiber grating Bragg wavelength based on least square method [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2006, 25(4): 25-27 (in Chinese).
 [8] XU M G, GEIGER H, DAKIN J P. Modeling and performance analysis of a fiber Bragg grating interrogation system using an acousto-optic tunable filter [J]. IEEE Journal of Lightwave Technology, 1996, 14(1): 391-396.
 [9] JIN W. Investigation of interferometric noise in fiber-optic Bragg grating sensors by use of tunable laser sources [J]. Appl Opt, 1998, 37(1): 17-25.
 [10] JI X L. Implementation of DSP based on MATLAB and VC complex programming [J]. Modern Electronics Technique, 2007, 31(15): 107-108 (in Chinese).

(上接第306页)

[11] TATE T T, PRASAD P, NITIN V K. Effect of temperature, atmospheric condition, and particle size on extinction in a plume of volatile aerosol dispersed in the atmospheric surface layer [J]. Appl Opt, 1998, 27(3): 593-598.
 [12] YANG Y B. Air pollution and influence of weather condition in Chengdu [J]. Journal of Sichuan Meteorology, 2004, 24(3): 40-43 (in Chinese).
 [13] FERNALD F G. Analysis of atmospheric lidar observation: some com-

ments [J]. Appl Opt, 1984, 23(5): 652-655.
 [14] FABRIZIO C, LUCA F, SIMONE T. Microwave attenuation measurements in satellite-ground links: the potential of spectral analysis for water vapor profiles retrieval [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2001, 39(3): 645-654.
 [15] LI X Y, HE Q, MAMTIMIN A, et al. Characteristics of wind velocity, humidity and temperature profiles near surface layer on a cloudy day in spring in the hinterland of taklimakan desert [J]. Arid Meteorology, 2007, 25(2): 22-28 (in Chinese).