

doi:10.3788/gzxb20124112.1416

噪音信号对夜间对流层臭氧探测准确度的影响

曹念文¹, 杨丰恺¹, 施建中¹, 福地哲生²

(1 南京信息工程大学 大气物理学院, 南京 210044)

(2 日本东京电力中央研究所, 东京)

摘 要: 本文探讨在背景噪音影响下, 差分吸收激光雷达测量臭氧的不确定性: 背景噪音对臭氧浓度廓线的影响正比于背景噪音强度、强吸收波长和弱吸收波长的回波信号强度比. 理论计算结果表明: 合适的回波信号强度比可以使激光雷达背景信号对夜间臭氧探测浓度的影响变得非常小, 可以忽略不计. 实验结果表明: 用波长对 (280 nm, 285 nm) 对大气臭氧进行观测时, 适当调节两波长回波信号强度比为 0.96 时, 背景信号对臭氧浓度探测的影响小到可以忽略的程度. 模拟分析和实验观测结果相接近, 证实了理论推算的合理性. 在背景噪音强度未知的情况下, 通过调整强吸收和弱吸收两波长的激光脉冲的能量, 在示波器上得到适合的回波信号强度比值, 可以抑制背景噪音信号对臭氧探测结果的影响, 确保夜间臭氧测量的准确性.

关键词: 差分吸收激光雷达; 臭氧; 背景噪音

中图分类号: P412.293

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2012)12-1416-6

0 引言

差分吸收激光雷达 (Differential absorption lidar) 是测量大气臭氧廓线的一种行之有效的探测手段. 国内外很多科研单位都用该技术进行臭氧探测研究. 中国科学院安徽光学精密机械研究所胡欢陵研制紫外差分吸收激光雷达测量平流层大气臭氧得到很有科学价值的研究成果^[1]. 日本东京电力中央研究所用差分吸收激光雷达测量东京都低空对流层臭氧廓线^[2]. 差分吸收激光雷达对对流层臭氧的测量时存在气溶胶和其他物质的影响^[2-7]. 差分吸收激光雷达测量臭氧的不确定性与气溶胶的光学性质和气溶胶含量有关^[8]. 其他物质影响产生的不确定性可以通过优化波长对来去除^[5]. 为了消除气溶胶和其他物质的影响, 多波长差分吸收激光雷达和喇曼差分吸收激光雷达已经经过了进一步的发展^[9]. 对于紫外区域 SO₂ 对臭氧探测产生的不确定性, 主要考虑火山喷发产生的巨量 SO₂ 的影响, 而 1~2 ppb 背景值 SO₂ 对臭氧产生的影响, 非常小可以忽略^[5].

除此之外, 背景噪音对对流层臭氧测量也存在很大影响, 尽管臭氧差分吸收激光雷达国内外已发展和应用了数十年, 但是如何处理背景噪音仍然是一个悬而未决的问题. 背景噪音一般非常小且难以

确定, 一般情况下将激光回波信号前的电信号的平均值作为背景噪音. 也有一些研究人员将最大距离处的回波信号作为背景强度^[10]. 差分吸收激光雷达方法测量臭氧的不确定性对于背景强度十分敏感, 未知背景噪音可能造成巨大测量误差. 在臭氧实验观测中, 探测波长总是设定在接近 300 nm (紫外区域). 波长对 (280 nm, 285 nm) 仅仅是个例子. 在夜间臭氧测量中, 背景值波长依赖性微不足道, 背景噪音主要是由光电倍增管暗电流或热噪音引起的. 研究如何减少背景噪音对臭氧探测的影响颇具价值. 系统阐述背景噪音对臭氧探测影响的文章报道不多见. 本文侧重讨论臭氧测量时背景噪音的影响: 从理论分析到数据模拟再到实验观测, 实验结果和数据模拟基本吻合, 间接证实了理论分析的合理性. 对于气溶胶和其他物质 (如 SO₂) 对臭氧测量的影响本文暂不讨论.

1 理论分析

背景噪音影响差分吸收激光雷达测量臭氧的结果. 在数据处理过程中, 背景噪音应从信号中减去. 所得臭氧浓度大小对背景噪音的强度很灵敏. 未知背景噪音可造成较大测量误差. 如何精确地确定背景噪音十分重要. 本文重点分析背景噪音的影响, 以

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 41175033/D0503) 和公益性行业 (气象) 科研专项基金 (No. GYHY201006047-5) 资助

第一作者: 曹念文 (1967-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为激光大气探测. Email: nwcao@yahoo.com.cn

收稿日期: 2012-06-28; 修回日期: 2012-09-05

及抑制该影响的方法. 对夜间臭氧测量时非常薄弱的背景噪音进行分析. 根据差分吸收激光雷达方程, 臭氧浓度可以计算得到^[1]

$$n = \frac{1}{2\Delta z \Delta \sigma_0} \ln \left[\frac{p(z, \lambda_{\text{on}})}{p(z + \Delta z, \lambda_{\text{on}})} \cdot \frac{p(z + \Delta z, \lambda_{\text{off}})}{p(z, \lambda_{\text{off}})} \right] \quad (1)$$

式中, n 是臭氧浓度, Δz 是距离分辨率, $\Delta \sigma_0$ 是差分吸收截面, $p(z, \lambda)$ 是回波信号强度. 可以认为 $\Delta z \Delta \sigma_0$ 为常量, 臭氧浓度由公式后面部分确定, 可将其定义为

$$\Omega = \ln \left[\frac{p(z, \lambda_{\text{on}})}{p(z + \Delta z, \lambda_{\text{on}})} \frac{p(z + \Delta z, \lambda_{\text{off}})}{p(z, \lambda_{\text{off}})} \right] \quad (2)$$

因此在接下来的分析中我们将重点讨论 Ω .

对于背景噪音确定没有一个统一标准. 回波信号前 3~4 个数据点(激光脉冲电信号)平均值可以视为背景噪音; 假设 δ_{on} 和 δ_{off} 为对应波长“on”和“off”下回波信号的背景强度, Ω 的不确定性可以解释为

$$\begin{aligned} \epsilon = \Omega(\epsilon) - \Omega &= \ln \left[\frac{p(z, \lambda_{\text{on}}) + \delta_{\text{on}}}{p(z + \Delta z, \lambda_{\text{on}}) + \delta_{\text{on}}} \cdot \frac{p(z + \Delta z, \lambda_{\text{off}}) + \delta_{\text{off}}}{p(z, \lambda_{\text{off}}) + \delta_{\text{off}}} \right] - \ln \left[\frac{p(z, \lambda_{\text{on}})}{p(z + \Delta z, \lambda_{\text{on}})} \cdot \frac{p(z + \Delta z, \lambda_{\text{off}})}{p(z, \lambda_{\text{off}})} \right] \\ &= \ln \left[1 + \frac{\delta_{\text{on}}}{p(z, \lambda_{\text{on}})} \right] - \ln \left[1 + \frac{\delta_{\text{on}}}{p(z + \Delta z, \lambda_{\text{on}})} \right] + \ln \left[1 + \frac{\delta_{\text{off}}}{p(z, \lambda_{\text{off}})} \right] - \ln \left[1 + \frac{\delta_{\text{off}}}{p(z + \Delta z, \lambda_{\text{off}})} \right] \end{aligned} \quad (3)$$

式中, $\Omega(\epsilon)$ 是包括了背景信号影响的臭氧浓度, Ω 是没有背景信号影响的臭氧浓度真实值.

在夜间测量臭氧时, 在低空, 信噪比高, 背景强度远小于激光雷达信号. 因此认为

$$\epsilon = \frac{\delta_{\text{on}}}{p(z, \lambda_{\text{on}})} - \frac{\delta_{\text{on}}}{p(z + \Delta z, \lambda_{\text{on}})} + \frac{\delta_{\text{off}}}{p(z, \lambda_{\text{off}})} - \frac{\delta_{\text{off}}}{p(z + \Delta z, \lambda_{\text{off}})} \quad (4)$$

“on”和“off”波长间隔足够小(通常波长对两波长之差设定在小于 5 nm)因此背景强度和望远镜光学效率在“on”和“off”波长下大概相等. 在夜间观测时, 两个间隔小的紫外波长背景强度可以定义为 δ , 并假设 $\delta/p \ll 1$. 把回波信号前的激光脉冲电信号当作背景噪音, 方程(4)简化为

$$\epsilon = \delta \left(\frac{1}{p(z, \lambda_{\text{on}})} - \frac{1}{p(z + \Delta z, \lambda_{\text{on}})} + \frac{1}{p(z + \Delta z, \lambda_{\text{off}})} - \frac{1}{p(z, \lambda_{\text{off}})} \right) \quad (5)$$

理论上认为 $\frac{p(z, \lambda)}{p(z + \Delta z, \lambda)} \approx e^{2\alpha\Delta z}$, 其中 α 是 λ 处

的衰减系数.

由于 $\Delta z \ll z$, 方程(5)变为

$$\epsilon = \delta \left(\frac{1}{p(z, \lambda_{\text{on}})} (1 - e^{2\alpha_{\text{on}}\Delta z}) - \frac{1}{p(z, \lambda_{\text{off}})} (1 - e^{2\alpha_{\text{off}}\Delta z}) \right) \quad (6)$$

令 A 和 B 分别代表两个概念 $1 - e^{2\alpha_{\text{on}}\Delta z}$ 和 $1 - e^{2\alpha_{\text{off}}\Delta z}$. 在测量时, 忽略吸收截面依赖于温度的变化. 常规激光雷达观测时认为臭氧浓度廓线背景值在 45~60 ppb, 测量误差为 10%, 且在 1 000~4 000 km 的范围上较为稳定^[3-4]. 因此在 1 000~4 000 km 消光系数接近恒定值. 臭氧的测量一般都在晴空下进行, 此时气溶胶含量较小. 影响消光系数的主要是分子, 在晴空进行激光雷达观测时, 距离校正信号($I * r^2$)总是光滑的, 以恒定的比例衰减, 主要是因为晴空条件下气溶胶含量低且几乎均匀分布. 如果回波信号不光滑, 便说明气溶胶是非均匀分布, 此时臭氧观测结果不可靠, 存在气溶胶引起的误差. 气溶胶误差这一问题不在本文讨论范围内. 距离分辨率 Δz 通常定为 75 m 或 150 m^[3-4, 10]. 消光系数与回波信号相比与距离的相关性很小. 所以粗略认为 A 和 B 是恒值. 则有

$$\epsilon = \delta \left(\frac{A}{p(z, \lambda_{\text{on}})} - \frac{B}{p(z, \lambda_{\text{off}})} \right) \quad (7)$$

该式表明背景信号的影响与背景强度(δ)和括号中的数相关, 为了减少背景信号的影响, 可以让背景强度变得更小或者是让“on”波长与“off”波长的回波信号强度比 $\frac{p(z, \lambda_{\text{on}})}{p(z, \lambda_{\text{off}})}$ 接近于 $\frac{A}{B}$.

A 和 B 可以用衰减系数 α_{on} 和 α_{off} 计算得到^[10]

$$\alpha_{\text{on}} = n\sigma_{\text{O}_3}(\lambda_{\text{on}}) + \alpha_{\text{m, on}} + \alpha_{\text{a, on}} \quad (8)$$

$$\alpha_{\text{off}} = n\sigma_{\text{O}_3}(\lambda_{\text{off}}) + \alpha_{\text{m, off}} + \alpha_{\text{a, off}} \quad (9)$$

式中, n 是臭氧数密度(浓度), $\sigma_{\text{O}_3}(\lambda_{\text{on}})$ 和 $\sigma_{\text{O}_3}(\lambda_{\text{off}})$ 分别是“on”和“off”波长的臭氧吸收截面; $\alpha_{\text{m, on}}$ 和 $\alpha_{\text{m, off}}$ 分别是“on”和“off”波长的分子消光; $\alpha_{\text{a, on}}$ 和 $\alpha_{\text{a, off}}$ 分别是“on”和“off”波长的气溶胶消光.

根据式(6)~(9)假设臭氧浓度在 1 000~4 000 km 范围上背景值是均匀的, 气溶胶含量也均匀, A/B 与距离的相关性很小($\sim 1\%$)可忽略.

结合式(1)式(2)和式(7)得到背景信号的影响

$$\epsilon_{\text{background}} = \frac{1}{2\Delta z \Delta \sigma_0} \frac{B}{p(z, \lambda_{\text{on}})/\delta} \cdot \left(\frac{A}{B} - \frac{p(z, \lambda_{\text{on}})}{p(z, \lambda_{\text{off}})} \right) \quad (10)$$

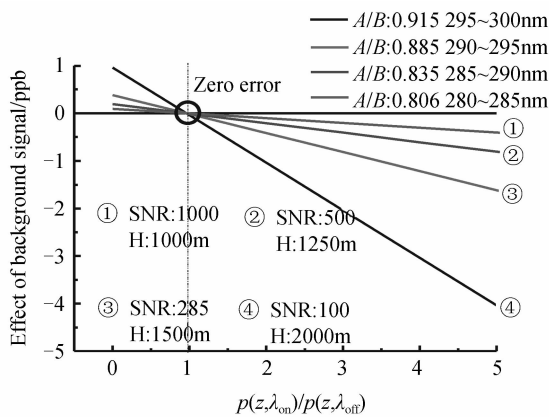
从式(10)中可以看出背景信号的影响由两个因素决定, 一个是噪音比的信号 $p(z, \lambda_{\text{on}})/\delta$ (或者背景强度), 另一个是回波信号强度比 $\frac{p(z, \lambda_{\text{on}})}{p(z, \lambda_{\text{off}})}$. 假设背

景噪音十分小,当回波信号强度比等于 A/B 时背景信号的影响趋近于 0. A/B 的值随波长对变化,即它的值在不同波长对下是可变的(见表 1 和图 1),当 $\lambda_{on} = \lambda_{off}$ (定标时)时,它的值为 1. 所以令回波信号强度比 $\frac{p(z, \lambda_{on})}{p(z, \lambda_{off})}$ 接近 A/B , 从而使得背景信号的影响最小化,即使此时不能准确得知背景噪音的大小,如果信号比背景信号大很多,则背景信号对臭氧的测量,特别是夜间的测量,影响很小.

表 1 模拟参量

Table 1 Simulation parameter

Wavelength pairs	A/B	Absorption cross section
280~285 nm	0.806	280 nm~ $3.96 \times 10^{-22} \text{ m}^2$
285~290 nm	0.835	285 nm~ $2.35 \times 10^{-22} \text{ m}^2$
290~295 nm	0.885	290 nm~ $1.30 \times 10^{-22} \text{ m}^2$
295~300 nm	0.915	295 nm~ $7.01 \times 10^{-23} \text{ m}^2$
		300 nm~ $3.49 \times 10^{-23} \text{ m}^2$
Δz		150 nm
n_{O_3}		60 ppb
$P(z, \lambda)/\delta(\text{SNR})$	1 000 at 1 000 m; 500 at 1 250 m; 285 at 1 500 m; 100 at 2 000 m	

图 1 模拟结果
Fig. 1 Simulation results

2 模拟

在理论分析的基础上,本文模拟四种不同的波长对对背景信号的影响.在模拟过程中,假设均匀的气溶胶含量的误差、大气状态和激光稳定性产生的统计误差和由于光路调试产生的仪器系统误差都很小,都可以忽略不计.模拟参量在表 1 中列出.截面的值来自于文献[11],尽管吸收截面具有温度相关性,通常差分吸收激光雷达测量 1 000~4 000 km 范围的臭氧时认为大气温度的影响是可忽略的^[3,10]. $\frac{p(z, \lambda)}{\delta}$ 或者信噪比(SNR)在 1 000 m 处设为 1 000,在 1 250 m 处设为 500,1 500 m 处设为 285,2 000 m 处设为 100.1 000、500、285、100 这些

值与 1 000 m、1 250 m、1 500 m、2 000 m 高度序列下实际雷达回波信号的衰减率相同,分别为 0.28、0.14、0.08、0.02.

模拟结果见图 1.图 1 表明波长对回波信号强度比 $\frac{p(z, \lambda_{on})}{p(z, \lambda_{off})}$ 与不同高度下 SNR 之间的关系.将波长对之间的波长差设置为小于 5 nm,这样两波长的气溶胶散射性质几乎相同,两回波信号之间的强度差只由臭氧吸收差异决定,两波长回波信号强度随高度的衰减率也相同,此时波长对的回波信号强度比 $\frac{p(z, \lambda_{on})}{p(z, \lambda_{off})}$ 应该可视为恒值.在臭氧观测前,用示波器进行光束调试,确保激光光束位于望远镜视场角(FOV)内.所有的 A/B 的线都穿过 x 轴($y=0$). y 表示背景信号的影响,把 y 上的点($x=A/B$)叫做零误差点.这意味着当回波信号比接近于 A/B 时,背景信号的影响降到最小(接近于 0).从图 1 可见: A/B 的值接近于 1,在 $\lambda_{on} = \lambda_{off}$ (定标时)等于 1.因此可以调整两波长激光功率使得回波信号强度比接近 A/B 来抑制背景信号的影响.由图 1 可见,当回波信号强度减小的时候背景误差会增大.但当回波信号十分微弱时,观测结果没有物理意义.模拟结果也表明背景信号的影响与波长对的选择相关,不同波长对的 A/B 的值也在改变.图 1 中四组线①~④随着不同高度下信噪比的变化以不同的斜率衰减.

3 实验结果

差分吸收激光雷达系统采用两个可调谐染料 Nd:YAG 激光器和一个 50 cm 直径的牛顿光学望远镜. Nd:YAG 激光器采用 10 Hz 的频率,每个染料激光器可以交替发出两个波长(λ_a, λ_b).对臭氧进行观测时,选取 280 nm 和 285 nm 分别作为 on 和 off 的波长.每次观测包含一系列五个廓线,每个廓线在 10 min 的观测中占到 2 min 的积分时间.2000 年 11 月,在日本东京电力中央研究所对日本狛江市(北纬 $35^{\circ}38'$,东经 $139^{\circ}35'$)上空的臭氧进行 24 h 连续观测.臭氧浓度廓线由式(1)计算得到.臭氧吸收截面在 280 nm 波长下为 $3.96 \times 10^{-22} \text{ m}^2$,285 nm 下为 $2.35 \times 10^{-22} \text{ m}^2$,所以 $\Delta\sigma = 1.16 \times 10^{-22} \text{ m}^2$ ^[16].获得的回波信号做如下处理:1)减去回波信号前的激光电子背景噪音;2)每 20 个数据点做一次平均,得到空间分辨率为 $\Delta z = 150 \text{ m}$;3)浓度通过式(1)计算得到.

图 2 是 $\lambda_{on} = 280 \text{ nm}$ 和 $\lambda_{off} = 285 \text{ nm}$ 下臭氧观测的回波信号.在图 2(a)中,on 和 off 波长回波信

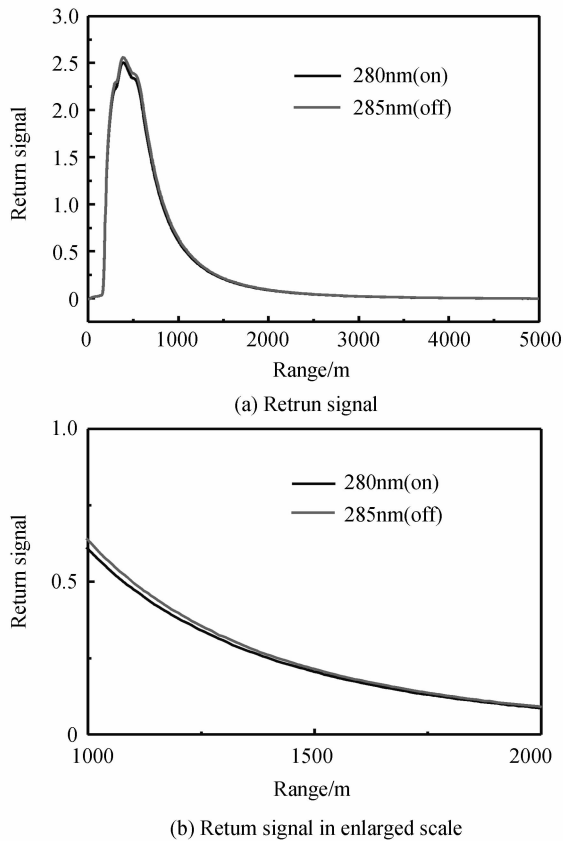


图2 回波信号强度比为 0.96

Fig. 2 Return signal intensity ratio is 0.96

号强度几乎相等. 图2(b)将 1 000 m 到 2 000 m 的范围放大,与图 2(a)相对应. 在图 2(b)中回波信号强度比 $\frac{p(z, \lambda_{on})}{p(z, \lambda_{off})}$ 峰值为 0.96. 本文尝试将不同的值设为背景强度进行数据处理. 例如取回波信号前的激光脉冲电信号或者最大距离处的信号为背景噪音. 在图 2 中,回波信号前的电信号差不多为 0.009 mV, 最大距离 (5 km) 的信号大概为 0.009 3 mV. 所以根据图2将背景噪音值取 0.009 mV, 0.009 15 mV, 0.009 3 mV. 图 3 是对应图 2(a)和 (b)的通过式(1)计算得到的臭氧浓度廓线. 图 3(b)是图 3(a)局部从 1 000 m 到 2 000 m 的放大. 图 3 中,对应背景强度 0.009 mV, 0.009 15 mV, 0.009 3 mV 的臭氧浓度廓线分别用符号 *a*、*b* 和 *c* 表示. 符号 *d* 表示没有减去背景强度的廓线. 从图 3(b)可以看出上述四种廓线几乎相同. 他们在 1 000 m 至 2 000 m 的范围上重叠,这意味着取合适的回波信号比 $\left[\frac{p(z, \lambda_{on})}{p(z, \lambda_{off})}, 0.96 \right]$ 时背景噪音的影响很小,可以忽略. 在背景噪音未知的情况下,合适的回波信号强度比使得背景噪音对臭氧浓度廓线的影响非常小以至于可以忽略. 换句话说,合适的回波信号强度比确保了臭氧观测的准确. 调节激光能量使波长对 (280, 285) 在示波器上显示的回波信号比接近于 0.96;

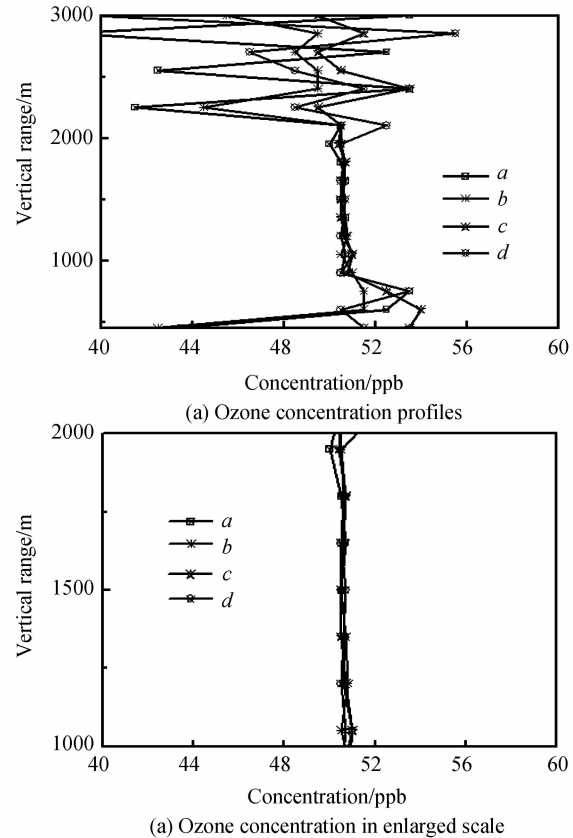


图3 激光雷达测量所得臭氧浓度廓线

Fig. 3 Measured ozone concentration profiles

从图 3 中可以看出背景信号的影响被抑制. 在合适的回波比下背景误差可以忽略(测量结果几乎与背景值无关),因此在图 3 中减去背景噪音和没有减去背景噪音的臭氧廓线几乎相同.

4 讨论与实现方法

1) 本文的理论公式推导是在参考文献[1]式(1)的基础上,考虑两种情况之差(一种包含背景噪音的臭氧浓度,另一种是假设没有背景噪音的臭氧浓度)进一步计算得到的,理论计算结果的物理意义是由于背景光噪音的存在导致的臭氧浓度测量的量化误差.

2) 在对流层中存在大量非均匀不稳定的气溶胶层,对臭氧探测会造成一定的影响,本文应用激光波长对为 (280 nm, 285 nm), 符合 $\Delta\lambda = 285 - 280 \leq 5$ nm, 两波长间隔小于 5 nm, 可以排除气溶胶对臭氧结果的干扰. 然而在平流层的臭氧探测中,可以用波长对 (308 nm, 355 nm) 探测大气臭氧,因为平流层中滞留的气溶胶层一般来说是均匀的,这样的气溶胶层对臭氧探测的影响要小很多.

3) 本文中使用的激光波长对 (280 nm, 285 nm) 是用 532 nm 激光泵浦 Rhodamine 610 染料激光再二次倍频后获得. 在进行实验数据采集之前,除常规的光路调试之外,主要是通过微调激光的传输方向,

利用示波器观测对回波信号的波形进行适时观测, 确保两波长的回波信号峰值比为 0.96, 然后开始实验数据采集. 通过示波器的观测的目的是直观、适时、减低调试时间. 在实际的激光雷达操作中, 首先要将激光光束校准使得两个相同波长下的回波信号在示波器上重叠, 但其实是定标测量, 目的是校正激光雷达系统, 然后改变其中一个波长, 调节两波长的激光脉冲功率, 在示波器上获得合适的回波信号强度比, 使其接近于 A/B , 来抑制背景信号的影响同时确保臭氧观测的准确度. 示波器上的回波信号强度比包含微弱的背景信号 δ , 有 $\frac{p(z, \lambda_{\text{on}}) + \delta}{p(z, \lambda_{\text{off}}) + \delta}$. 若 $p(z, \lambda_{\text{on}}) \gg \delta$, $p(z, \lambda_{\text{off}}) \gg \delta$, 存在 $\frac{p(z, \lambda_{\text{on}}) + \delta}{p(z, \lambda_{\text{off}}) + \delta} \approx \frac{p(z, \lambda_{\text{on}})}{p(z, \lambda_{\text{off}})}$. 实际上, 示波器上的回波信号强度比表示的正是以上分析的回波信号强度比.

4) 背景噪音对臭氧浓度廓线的影响依赖于背景噪音和回波信号强度比 $\left[\frac{p(z, \lambda_{\text{on}})}{p(z, \lambda_{\text{off}})} \right]$. 背景噪音的影响与波长对的选择有关, 我们可以根据 A/B 的值与波长对的关系来抑制背景信号的影响. 小的波长间隔可以使得难以表征气溶胶的影响最小化, 合理的波长对使得 SO_2 的影响最小化^[4]. 通常波长间隔设为小于 5 nm, SO_2 浓度背景值大概在 1~2 ppb^[4], 非常小, 此时 SO_2 对臭氧观测的影响可以忽略. 如果在白天进行观测, 随着波长降到小于 300 nm, 具有很大影响的太阳辐射背景迅速降低. 这个问题在本文中不作讨论, 在今后的研究中予以考虑. 在夜间观测臭氧时, 背景强度较弱而且对波长的依赖可以忽略. 因此两波长的背景强度可以认为是相同的.

5) 对流层低空, 在夜间进行臭氧观测时, 背景噪音可以粗略认为是稳定的. 传统臭氧观测认为臭氧, 除了火山排放和高浓度空气污染, 都是 45~60 ppb (臭氧的背景值), 观测误差为 10%. 式(8)和式(9)的计算表明 45~60 ppb 的臭氧浓度 A/B 的变化的差值约为 1%. 因此, 可以调整两个波长的激光脉冲功率来获得合适的回波信号比使其接近于 A/B , 从而抑制背景误差. 在臭氧分布不均匀时, 这种方法还需要在未来的研究中进一步改善.

6) 除了背景噪音的影响, 实际观测误差还包括气溶胶和其他物质的影响, 以及系统定标观测相关的系统误差, 与大气状态变化相关的统计误差等.

5 结论

在大气臭氧的夜间差分吸收激光雷达观测中, 可以结合通过示波器适当调节强吸收回波信号与弱吸收回波信号的强度比, 可以减小或抑制噪音信号对臭氧探测准确度的影响.

参考文献

- [1] HU Huan-ling, WANG Zhi-en, WU Yong-hua, *et al.* Stratosphere ozone measurements by UV differential absorption lidar [J]. *Atmospheric Science*, 1998, **22**(5): 701-708.
胡欢陵, 王志恩, 吴永华, 等. 紫外差分吸收激光雷达测量平流层臭氧[J]. *大气科学*, 1998, **22**(5): 701-708.
- [2] HU Shun-xing, HU Huan-ling, WU Yong-hua, *et al.* Troposphere ozone measurements by L625 differential absorption lidar [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **24**(5): 507-601.
胡顺星, 胡欢陵, 吴永华, 等. L625 差分吸收激光雷达探测对流层臭氧 [J]. *光学学报*, 2005, **24**(5): 507-601.
- [3] FUKUCHI T, NAYUKI T, CAO Nian-wen, *et al.* Differential absorption lidar system for simultaneous measurement of O_3 and NO_2 : system development and measurement error estimation [J]. *Optical Engineering*, 2003, **42**(1): 98-104.
- [4] CAO Nian-wen, LI Shu-shun, FUKUCHI T, *et al.* Measurement of tropospheric O_3 , SO_2 and aerosol from a volcanic emission event using new multi-wavelength differential absorption lidar techniques[J]. *Applied Physics B*, 2006, **85**(1): 163-167.
- [5] FUJII T, FUKUCHI T, CAO Nian-wen, *et al.* Trace atmospheric SO_2 measurement by multiwavelength curvefitting and wavelength optimized dual differential absorption lidar[J]. *Applied Optics*, 2002, **41**(3): 524-531.
- [6] WANG Zhi-en, NAKANE H, HU Huan-ling, *et al.* Three wave length dual differential absorption lidar method for stratospheric ozone measurements in the presence of volcanic aerosols[J]. *Applied Optics*, 1997, **36**(6): 1245-1252.
- [7] SASANO Y. Simultaneous determination of aerosol and gas distribution by DIAL measurements [J]. *Applied Optics*, 1988, **27**(13): 2640-2641.
- [8] KOVALEV V, MCELROY J. Differential absorption lidar measurement of vertical ozone profiles in the troposphere that contains aerosol layers with strong backscattering gradients: a simplified version[J]. *Applied Optics*, 1994, **33**(36): 8393-8395.
- [9] WANG Zhi-en, ZHOU Jun, HU Huan-ling, *et al.* Evaluation of dual differential absorption lidar based on raman-shifted Nd : YAG or KrF laser for tropospheric ozone measurements[J]. *Applied Physics B: Lasers and Optics*, 1996, **62**(2): 143-147.
- [10] CAO Nian-wen, FUJII T, FUKUCHI T, *et al.* Estimation of differential absorption lidar measurement error for NO_2 profiling in the lower troposphere[J]. *Optical Engineering*, 2002, **41**(1): 218-224.
- [11] MOLINA L. Absolute absorption cross sections of ozone in the 185 to 350 nm wavelength range [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1986, **91**(D13): 14501-14508.

Noise Effect on Ozone DIAL Night Time Measurement in the Troposphere

CAO Nian-wen¹, YANG Feng-kai¹, SHI Jian-zhong¹, Tetsuo Fukuchi²

(1 *School of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China*)

(2 *Electrical Physics Department, Komae Research Laboratory, Central Research Institute of the Electric Power Industry, Tokyo, Japan*)

Abstract: The uncertainty of ozone differential absorption lidar (DIAL) measurements due to the effect of background noise is presented. The effect of background noise on ozone concentration profiles is proportional to the background intensity and the ratio of return signal intensities at “on” and “off” wavelength. Analysis suggests that an appropriate return signal intensity ratio can make the effect of background signal very small, negligible. The simulations based on the analysis coincide with the experimental results. The experimental results show that the impact of background signal is negligible at an appropriate return signal intensity ratio of 0.96 at wavelength pair (280 nm, 285 nm). In case of unknown background intensity, we can adjust the laser pulse energy levels at the two wavelengths to obtain an appropriate return signal intensity ratio on the oscilloscope to suppress the impact of background signal and ensure the accuracy of night time ozone measurements.

Key words: Differential absorption lidar (DIAL); Ozone; Background noise