

光雷达探测距离较远。当气溶胶消光系数达到 0.2 km^{-1} 时, 激光传输距离到 8km 处 $W_{ram}^2(CO_2)$ 值接近为零, 而当气溶胶消光系数达到 0.4 km^{-1} 时, 激光传输距离到 4km 处 $W_{ram}^2(CO_2)$ 值接近为零。采用美国标准大气模式情况下, 激光传输距离可达到 10km 左右 $W_{ram}^2(CO_2)$ 值才接近为零, 表明激光雷达探测距离较远。

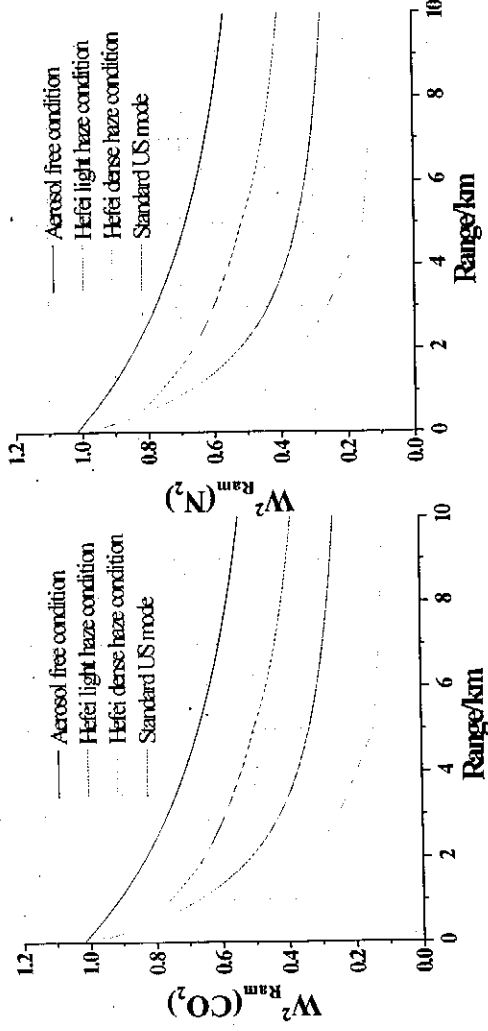


图 5.7 垂直方向 $W_{ram}^2(CO_2)$, $W_{ram}^2(N_2)$ 值随距离变化关系

如图 5.7 所示, 由于受大气分子和气溶胶粒子分布特点的影响, 激光雷达进行垂直方向探测时受大气分子和气溶胶粒子的消光作用要比水平方向探测时小, $W_{ram}^2(CO_2)$ 和 $W_{ram}^2(N_2)$ 的值随距离的衰减程度弱, 即具有较远的探测距离。随着探测高度的增加, 大气分子和气溶胶粒子在高层 (0-10km) 的分布越来越小, 因此激光在高层大气介质传输时受到的散射消光非常弱。考虑到激光雷达工作期间大多选择在晴朗无云的夜晚工作, 因此以上的讨论分析没有考虑大气中云团和高空卷云等物质的消光影响。

§5.4.2 探测二氧化碳拉曼激光雷达最大探测距离确定

将探测二氧化碳拉曼激光雷达的各个参数代入到信噪比公式中可以求出激光雷达在不同工作方式下、不同天气条件下的最大探测距离, 如图 5.8 所示为水平方向扫描时的最大探测距离, 左图 20000 次积分, 右图 40000 次脉冲积分情况。可以看出由于不同天气条件下的大气消光作用不同, 导致拉曼激光雷达探测距离也有较大差别, 最大差别可达到 700 米。当激光雷达采用 40000 次脉冲积分时的探测距离要比 20000 次脉冲积分时的信噪比要高, 相应的探测距离也较远, 当激

光雷达进行探测时的大气消光模式采用为美国标准大气时,采用 40000 次脉冲积分时的探测距离要比 20000 次积分时远 200 米左右,对于其它天气情况下,次数较多脉冲积分时的探测距离也比积分次数小时的探测距离远 100~200 米。

如图 5.9 所示为垂直方向扫描时的最大探测距离,左图 20000 次积分,右图 40000 次脉冲积分情况。可以看出由于不同天气条件下的大气消光作用不同,导致拉曼激光雷达探测距离也有较大差别,最大差别可达到 1000 米。当激光雷达采用 40000 次脉冲积分时其探测距离要比 20000 次脉冲积分时的信噪比要高,相应的探测距离也较远,当采用美国标准大气模式模拟激光雷达探测性能时,采用 40000 次脉冲积分时的探测距离要比 20000 次积分时远 400 米左右,对于其它天气情况下,次数较多脉冲积分时比积分次数小时的探测距离远 500 米左右。

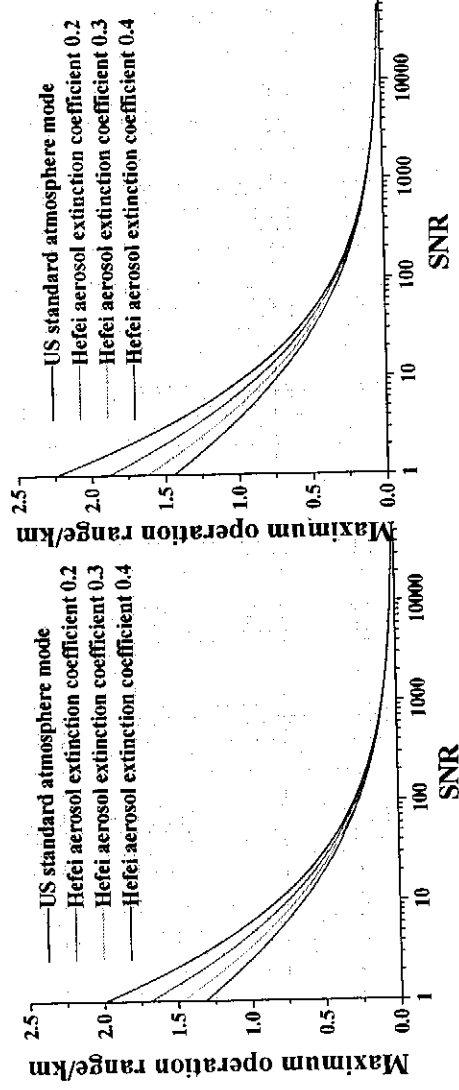


图 5.8 探测二氧化碳拉曼激光雷达水平方向扫描时最大探测距离。左图 20000 次积分,右图 40000 次脉冲积分。

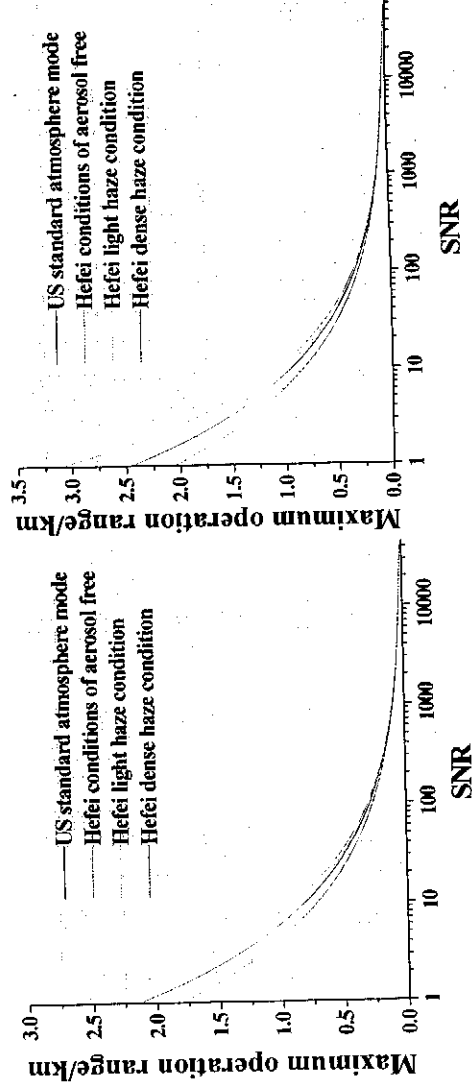


图 5.9 探测二氧化碳拉曼激光雷达垂直方向扫描时最大探测距离。左图 20000 次积分,右图 40000 次脉冲积分。

通过对图 5.8 和 5.9 中的数据曲线进行比较可以看出,在相同脉冲积分次数和相

同大气消光作用下,垂直扫描时的探测高度要远于水平方向扫描时的探测距离。这主要是由于大气分子密度分布以及气溶胶粒子分布随高度的增加而呈现递减的趋势,造成高层大气的消光作用小于低层大气的消光作用,当激光雷达在垂直扫描时穿过低层消光作用大的大气层后,受到高层大气弱的消光衰减作用,当激光雷达水平方向扫描时,激光光束一直在消光作用较大的大气层中传输,受到大气较强的衰减,造成探测距离较近。在 20000 次脉冲积分情况下,以采用美国中纬度标准大气模式为例,二者探测距离差别达 100 米左右,而当天气情况较差,即大气消光系数较大时,二者探测距离差别可达到 200 米左右;在 40000 次脉冲积分情况下,以采用美国中纬度标准大气模式为例,二者探测距离差别达 200 米左右,而当天气情况较差,即大气消光系数较大时,二者探测距离差别可达到 500 米左右。

§5.4.3 探测二氧化碳拉曼激光雷达最小可探测浓度

最小可探测浓度是表征探测二氧化碳拉曼激光雷达探测性能的一个重要参数,它主要描述拉曼激光雷达的探测精度随距离的变化关系,根据雷达信噪比公式,将拉曼激光雷达的器件参数代入公式可得到在不同天气情况和不同扫描方式下拉曼激光雷达的最小可探测浓度与距离的关系。

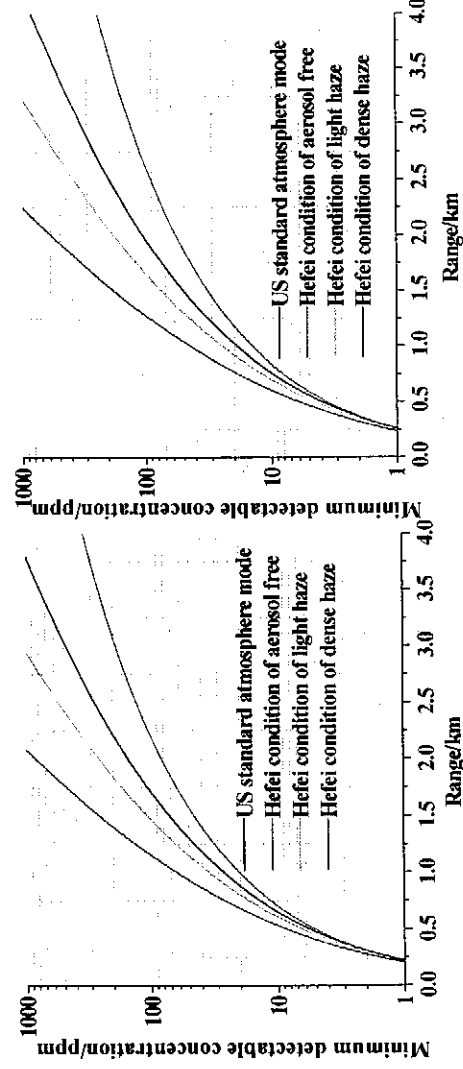


图 5.10 探测二氧化碳拉曼激光雷达水平方向扫描时最小可探测浓度与探测距离关系。左图 20000 次积分,右图 40000 次脉冲积分。

如图 5.10 所示,给出了不同天气情况下探测二氧化碳拉曼激光雷达水平方向扫描时雷达的最小可探测浓度与探测距离的关系,其中左图为 20000 次脉冲积分,右图为 40000 次脉冲积分。可以看出拉曼激光雷达最小可探测浓度随探测距离的增加而迅速增加,不同天气状况下大气消光作用不同导致雷达最小可探测浓

度差别较大,大气消光作用弱的天气情况下拉曼激光雷达最小可探测浓度随距离的变化趋势相对较慢,大气消光作用强的天气情况下最小可探测浓度随距离的变化趋势相对较强。当采用 40000 次脉冲积分时,最小可探测浓度随探测距离的变化趋势要比 20000 次脉冲积分趋势要弱,表明当采用大的积分次数时,拉曼激光雷达的探测精度要优于采用较小脉冲积分次数采集时的情况。

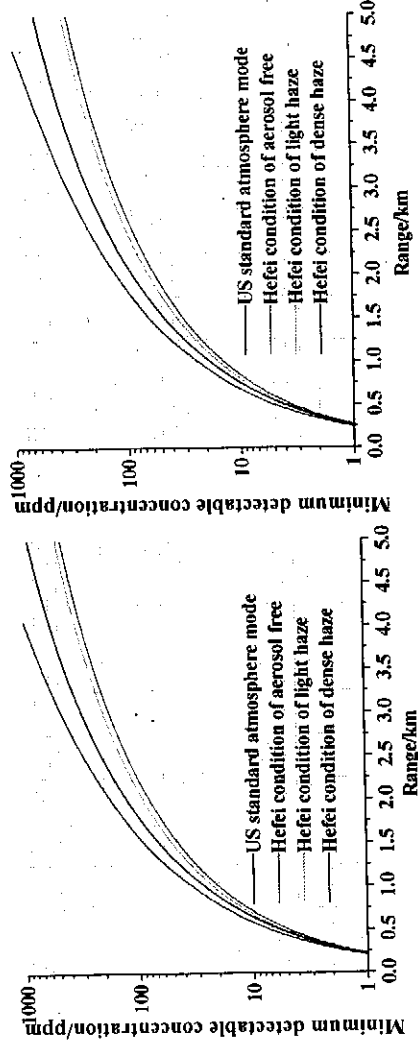


图 5.11 探测二氧化碳拉曼激光雷达垂直方向扫描时最小可探测浓度与探测距离关系。左图 20000 次积分,右图 40000 次脉冲积分。

图 5.11 所示,给出了不同天气情况下探测二氧化碳拉曼激光雷达垂直方向扫描时雷达的最小可探测浓度与探测距离的关系,其中左图为 20000 次脉冲积分,右图为 40000 次脉冲积分。可以看出拉曼激光雷达最小可探测浓度随探测距离的增加而迅速增加,不同天气状况下大气消光作用不同导致雷达最小可探测浓度差别较大,大气消光作用弱的天气情况下拉曼激光雷达最小可探测浓度随距离的变化趋势相对较慢,大气消光作用强的天气情况下激光雷达最小可探测浓度随距离的变化趋势相对较强。但是二者的变化趋势明显小于水平扫描时的情况,这主要是由于大气分子密度分布以及气溶胶粒子分布随高度的增加而呈现递减的趋势,造成高层大气的消光作用小于低层大气的消光作用,当激光雷达在垂直扫描时穿过低层消光作用大的大气层后,受到高层大气弱的消光衰减作用,当激光雷达水平方向扫描时,激光光束一直在消光作用较大的大气层中传输,受到大气较强的衰减,造成信噪比急剧下降,导致最小可探测浓度随探测距离的变化趋势较强。当采用 40000 次脉冲积分时,最小可探测浓度随探测距离的变化趋势要比 20000 次脉冲积分趋势要弱,表明当采用大的积分次数时,拉曼激光雷达的探测精度要优于采用较小脉冲积分次数采集时的情况。值得注意的是,当采用较大脉冲积分

次数时,拉曼激光雷达相应的采集时间也要增长,造成实时性能有所降低,因此拉曼激光雷达进行污染物监测时要根据被测污染物浓度的变化特点适当选择积分时间,由 LI7500 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ 分析仪测得的二氧化碳夜变化数据可以看出,大气中二氧化碳含量相对稳定,因此可以适当加长拉曼激光雷达的采集时间,在实际操作过程中,选择 40000 次积分(时间 33 分钟)是完全可行的。如前所述激光雷达水平方向和垂直方向扫描时最小可探测浓度随距离的分布具有较大差别,主要原因是由于低层大气的消光作用要强于高层大气的消光作用。大气的消光作用可分为两部分:一部分为大气分子的消光,另一部分为气溶胶粒子的消光作用。下面具体的分析估算大气分子和气溶胶粒子的消光作用对拉曼激光雷达最小可探测浓度的影响。

如图 5.12 所示,该图表示假设气溶胶粒子数为零,即不存在气溶胶粒子的理想情况下,激光雷达在水平方向和垂直方向扫描时最小可探测浓度随距离的变化关系,如(a)图所示不同扫描方式下,两最小可探测浓度曲线基本重合,该图给出了二者的相对误差,在探测高度达到 3km 处相对误差不超过 5%,该结果显示在忽略气溶胶消光影响条件下,拉曼激光雷达在水平和垂直方向扫描时的最小可探测浓度差别较小,表明拉曼激光雷达的最小可探测浓度受气溶胶影响较大,大气分子消光作用影响较弱。

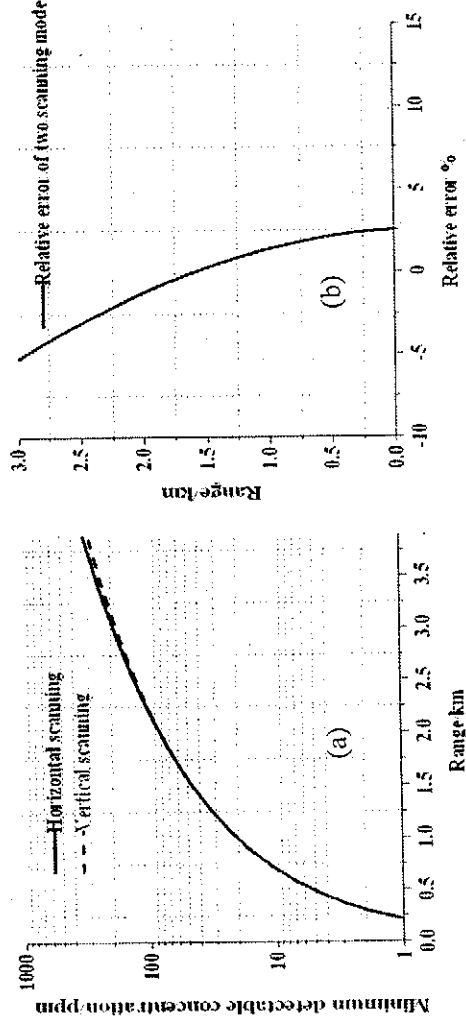
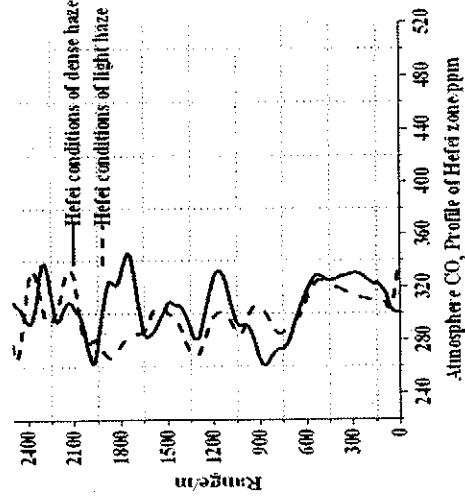


图 5.12 (a) 拉曼激光雷达在水平和垂直方向扫描时忽略气溶胶粒子消光作用时最小可探测浓度随探测距离关系, (b) 二者的相对误差

表 5.2 拉曼激光雷达探测性能指标常数

	水平方向扫描		垂直方向扫描	
	20000	40000	20000	40000
脉冲累积次数	20000	40000	20000	40000
探测距离最大差别/km	0.4	0.5	0.4	0.5
最小可探测浓度 范围/ppm	1.0km	20—60	15—45	20—35
	1.5km	45—260	30—180	45—90
			30—60	

表 5.2 给出了拉曼激光雷达在不同天气状况及不同扫描方式下的最大探测距离和最小可探测浓度的范围,在距离 1.5km 处,垂直方向扫描且脉冲累积次数达到 40000 次时由于受不同天气消光作用影响,最小可探测浓度范围为 30~60ppm,最大探测距离差别可达到 500 米。图 5.13 给出了合肥地区能见度较好和较差两种天气情况下拉曼激光雷达测得的 CO_2 浓度廓线,可以看出在能见度较差情况下测量得到的二氧化碳廓线稳定性要差于能见度较好时测量得到廓线,因此拉曼激光雷达进行探测时,为了获得较为可靠的二氧化碳浓度廓线,应选择晴朗无云能见度较好的天气情况下进行探测。

图 5.13 合肥地区不同天气情况下测量得到 CO_2 廓线

第六章 拉曼激光雷达探测对流层底部二氧化碳实验

§ 6.1 拉曼激光雷达测量步骤

利用拉曼激光雷达测量低空中二氧化碳分布实验需要遵循既定的程序和步骤, 进行多方面的准备工作, 包括激光器的致冷装置开启, 发射光路和接收光路的同轴调节, 光电倍增管工作温度的设定和放大器及光子计数器参数的调试等。拉曼激光雷达测量实验的主要步骤如下:

§6.1.1 激光器的开启准备工作

拉曼激光雷达中采用的 Quantel Brillinat B Nd:YAG 激光器, 具有较大的输出功率和较好的工作性能, Nd:YAG 激光器是一种闪光灯泵浦的固体激光器, 它采用超净水内外循环相结合的制冷方式进行制冷, 制冷系统正常工作是激光器能量输出并保持稳定的前提, 该激光器的工作温度设定为 30°C 。首先, 启动制冷系统和激光器电源工作半小时以上, 让整个系统保持稳定, 第二步: 开启激光器闪光灯进行泵浦。轻按激光器控制盒上的 Flashlamp 栏上的 Start 按钮开启闪光灯, 闪光灯开启后, 激光器的温度会有所上升, 一般情况下上升到 33°C 左右, 然后开始下降, 经过五分钟左右温度降至 30°C , 此时可以开启 Q-switch 栏上的 Start 按钮便可输出 532nm 波长激光, 通过调节 Q-delay 开关进行激光能量调节输出。

§6.1.2 发射系统光学组件的调整

图 6.1 所示为激光器发射光路图, 发射系统光学组件包括 45° 反射镜, 三倍频晶体、扩束镜等。实验过程中需要对这些光学器件方位进行精确调整, 其中包括倍频晶体的位置、温度参数进行调节, 使激光器输出的三倍频光的转换效率达到最佳状态。其次对其它光学器件的方位进行精确调整以尽量减小光的能量损失。图中红色标记处为同步触发系统。

1、扩束系统的调整。扩束镜的作用是对激光束进行扩束以降低能量密度, 维持系统安全工作; 同时压缩减小激光器光束的发散角, 以提高探测距离。

调整的具体方法是, 经过扩束镜的激光束经平面反射镜水平反射后, 入射到 200m 远处的另一平面反射镜上反射回来, 调整扩束系统的凸透镜和凹透镜之间的距离, 通过荧光纸对比出射光斑与反射光斑的大小, 当二者大小近似相等时,

可以认为出射光为平行光。

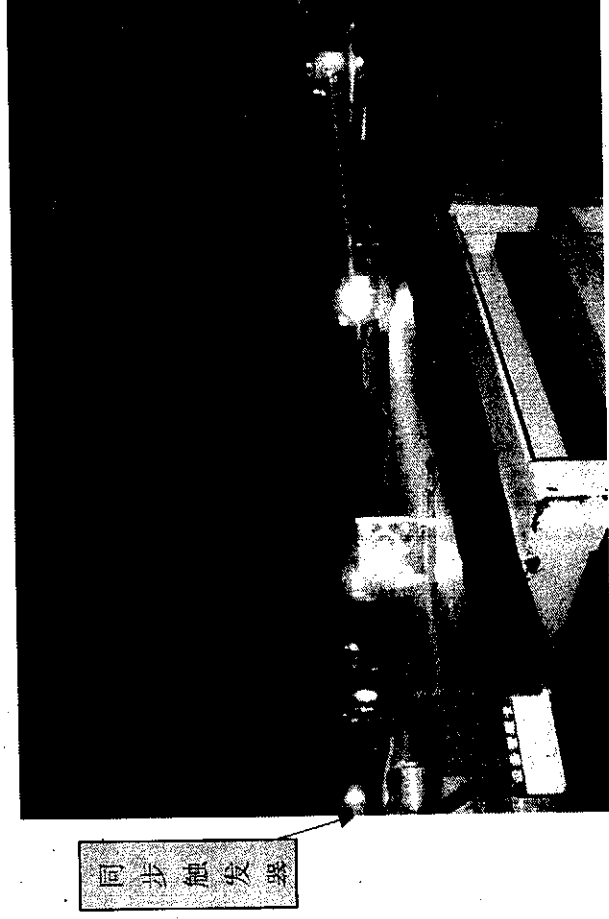


图 6.1 拉曼激光雷达光路发射场景

2、发射激光束与接收光学望远镜同轴调整。二氧化碳拉曼激光雷达系统是一个同轴系统，大气后向散射光沿着激光出射光轴返回接收光路，由于三维光束扫描单元的原因，采用同轴系统设计可以缩小拉曼激光雷达体积。但是，同轴系统必须要保证激光出射光轴与接收光轴同轴，需要通过激光光束方向调整装置来完成，谭锟研究员根据手动准直对光的基本原理，结合自动对光的算法研发了自动准直对光系统。该准直对光系统主要由电机驱动导向镜、立方角锥棱镜、逐行扫描 CCD 相机、计算机控制系统以及监视器组成。立方角锥棱镜具有入射光按照原光路方向返回的特点，它的作用是模拟大气后向散射回波信号返回望远镜的过程。电机驱动导向镜系统具有二维扫描功能，由电机转动控制导向镜镜面的角度，使入射到 45° 导向镜的光经角锥棱镜反射后入射到望远镜上，然后经望远镜汇聚进小孔光阑后，表明调整适当，此时发射光束与接收光学望远镜轴线已经完全平行。该调节过程由计算机自动控制，显示器显示逐步对光操作过程，可视化程度高。电机驱动导向镜的转动调节幅度受编订设计的软件控制，软件编写中采用了自动对光算法，分次逐步驱动对光路进行调整。图 6.2 为自动对光系统的电机驱动导向镜和编写的控制软件图。值得注意的是，在自动对光过程中，为保护 CCD 相机的安全，激光器能量不能太高，Q 延时开关设定在 400us 即可。

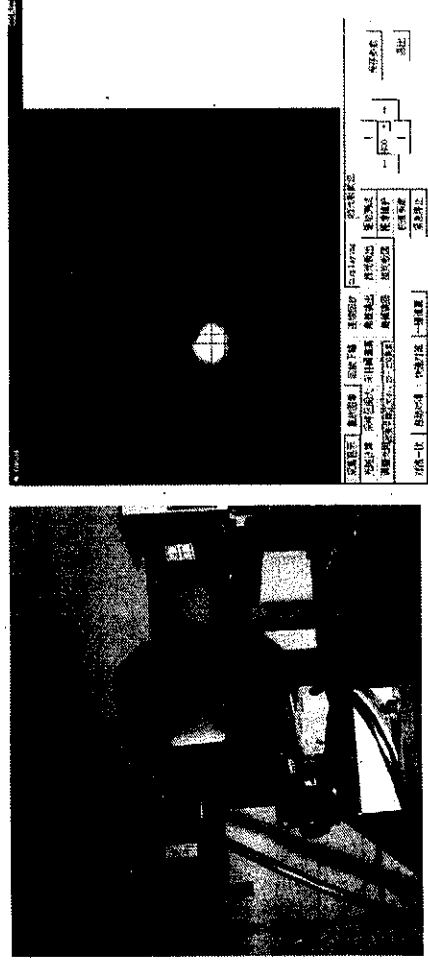


图 6.2 自动对光系统电机驱动向导镜和控制

§6.1.3 信号采集系统的参数设定

信号采集接收系统包括光电倍增管及其组件、前置放大器和光子计数器。要恰当设置每一器件的工作参数，并保证其工作环境处于最佳状态，以获得最佳的信号采集能力，主要步骤如下：

1、设定 PMT 的致冷温度、放大倍数和放大器的工作电压和电流

拉曼激光雷达信号采集系统所用的光电倍增管为英国 Electron tubes 公司产的 9214B 和 9813B 型，这两种 PMT 在该 CO_2 和氮气拉曼散射波段具有 28% 左右的量子效率，采用半导体制冷以减小暗电流噪声。因此光电倍增管在工作前需进行致冷。9214B 的额定工作电压为 1250V，9813B 的额定工作电压为 1900V。前置放大器型号为 phillips 6954 型，配置低噪声电源，工作电压为 15V，电流为 0.15A。对于光电倍增管来讲，其噪声主要有暗电流噪声、阳极电阻产生的热噪声等。暗电流噪声是指光电倍增管加上电压后，在无光照情况下输出的电流，主要是光电阴极和打拿极的热电子发射产生的。把光电倍增管致冷（一般工作温度低于 -20°C ），可以有效地减小暗电流噪声。

2、设定光子计数器的阈值

光子计数卡是 MCA-3 P7882 型，MCA 的含义为 Multichannel Analyzer。光子计数卡附有 Server 软件，它既可以单独采集信号，也可以在调光时监测回波信号的光子数。P7882 光子计数器是一种非常灵敏的高速光子计数卡，实验过程中阈值设定十分重要。设置过低，不能有效滤除干扰信号，形成有用信号被淹没的现象；反之，阈值设置过高时，在滤除噪声的同时，有用信号也被截止，形成有用信号不能完全接收现象。在实验中的阈值的设置方法是：在接收系统的正常工

作状态下阻断发射光，同时开启光子计数器采集，逐渐调整光子计数器阈值，使其恰好没有噪声信号为最佳状态，为了确定选择的阈值是否合适，选取临界值进行测试，当设定的阈值稍稍高于临界值时，所采集的信号会有突变。图 6.3 为光子计数器的阈值设定界面。

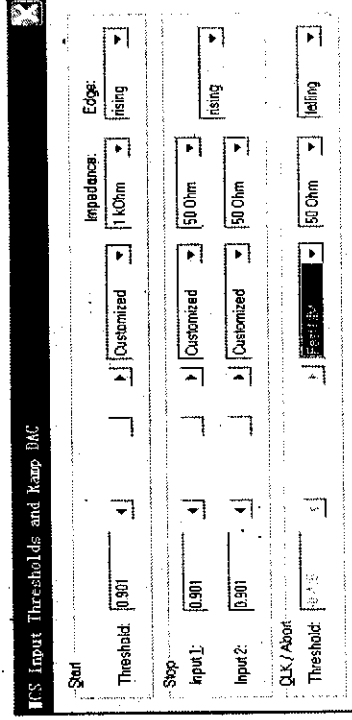


图 6.3 光子计数卡 P7882 阈值参数设定

在采集之前，光子计数器还需要对探测的距离、距离分辨率以及采集的次数进行设置，如图 6.4 所示。当系统的光子计数卡仅仅设定一个通道工作时，采样时间间隔（Dwelltime）最小可以设置为 100ns，相当于距离分辨率 0.015km。将激光器 Q-Switch 延迟调至常规工作时的参数 240us，恢复激光器发射脉冲能量，拉曼激光雷达便可以进入测量状态。图 6.4 为采集卡采集界面设定和信号采集时的工作界面。

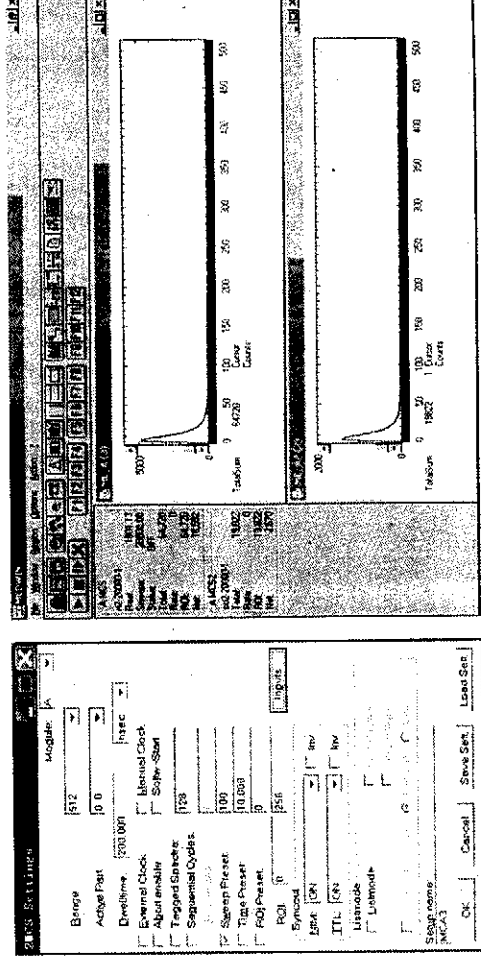


图 6.4 光子计数器工作参数设定界面和工作采集界面

§ 6.2 拉曼激光雷达进行大气二氧化碳测量

按照前面所描述的测量步骤与参数设定方法，探测二氧化碳拉曼激光雷达在各项准备工作完毕之后即可进行信号的采集。

§6.2.1 拉曼原始信号的采集

采用双通道采集方式对氮气和二氧化碳拉曼信号同时采集,为消除天空背景噪声对雷达探测的影响,探测二氧化碳拉曼雷达需在晴朗无云的夜晚进行探测以获得最佳的探测结果。该激光雷达系统设定距离分辨率为 30m,脉冲累积次数 30000 次,垂直扫描方式。

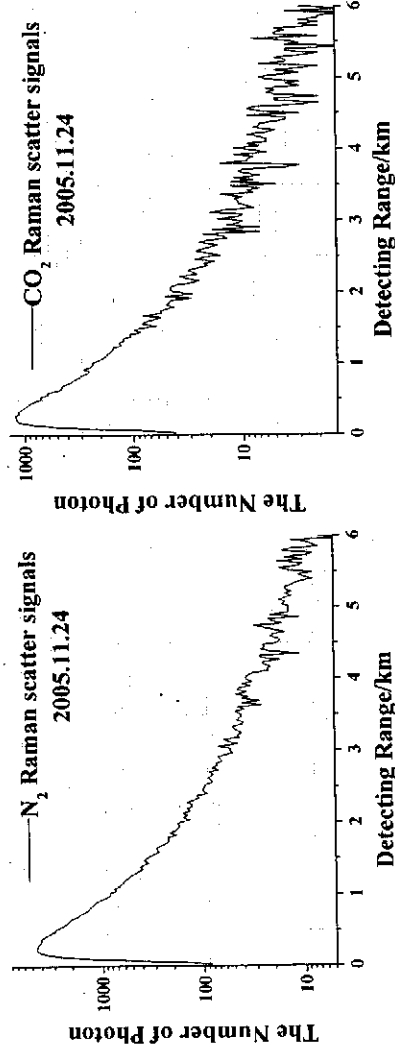


图 6.5 拉曼激光雷达探测到的氮气和二氧化碳拉曼信号

由图 6.5 可以看出,拉曼雷达系统采集到的氮气拉曼回波信号比二氧化碳拉曼回波信号要强的多,两信号随探测距离的增加信噪比随之减小,在探测距离 6km 处信噪比下降至 2,且由于大气波动的影响导致两信号都有起伏,在数据处理过程中要采用数据平滑或小波去噪等方法消除大气波动带来的影响^[71,72]。

§6.2.2 拉曼激光雷达信号的数据处理

拉曼激光雷达测量采集到原始信号需要经过一系列的处理方法才能得到二氧化碳在大气中的含量分布。一般来讲拉曼激光雷达数据处理步骤包括:原始信号背景扣除、信号平滑、数据反演、系统常数标定、透过率修正、误差分析等。

(1) 原始信号背景扣除

由于二氧化碳拉曼信号十分微弱,如果在信号中掺杂背景噪声,将会严重影响测量的精度和可靠性。拉曼雷达系统光子计数器接收的信号会掺杂天空背景噪声、光电倍增管暗电流噪声和热噪声等。随着探测高度的增加,大气回波信号将越来越弱,通常在一定距离以后的回波信号已经不再随高度而变化了,因此,我们可取该距离以后信号的平均值作为背景信号。另外一种获得背景噪声信号的办法是阻断激光器发射光路,其余器件在正常条件下工作,此时采集到的信号可作为背景信号。

探测二氧化碳的拉曼激光雷达数据采集系统采用的光子计数器进行采集, 因此需要恰当设定阈值电压来实现背景噪声信号的抑制。一般来讲, 合适的阈值电压能有效抑制背景噪声, 在实验过程中通过设定阈值电压可将背景噪声抑制在 1~2 个光子左右, 在这种情况下背景噪声对信号反演精度影响较小。

(2) 信号平滑

回波信号扣除背景噪声后, 大气起伏和电子学系统的噪声干扰仍有部分存在, 激光雷达原始信号经过平滑处理可消除由于大气波动对信号造成的影响, 尤其是接收大气 CO_2 拉曼散射这样较弱回波信号, 由于大气的波动往往引起信号采集的很大波动, 因此对原始回波信号的平滑有利于提高测量精度。平滑的原则是: 在不引起信号较大失真的情况下, 尽可能的减小随机噪声。平滑的手段是采用中值滤波法对回波信号进行平滑, 其公式表示为^[23]:

$$P'_i = \frac{P'_{i-(j-1)/2} + \dots + P'_{i-1} \cdot (j-2) + P'_i \cdot j + P'_{i+1} \cdot (j-2) + \dots + P'_{i+(j-1)/2}}{(j^2 + 1)/2} \quad (6.1)$$

式中, i 是第 i 个数据点, j 是平滑因子, P_i 为第 i 个数据点的激光雷达测量的回波信号的数值。考虑到回波信号与距离的平方成反比, 近距离很快衰减, 而远距离衰减较慢, 因而如果按照统一平滑点数进行数据平滑, 要么没起到较好的平滑效果, 要么会使信号有较大失真, 所以我们采用了近距离平滑点数较远距离少的分段平滑方法。当然不同地区不同大气结构所采取的平滑点数是不同的。图 6.6 为图 6.5 中所示的原始数据经平滑后的数据结果, 从中可以看出, 原始信号经过平滑处理后, 可以把大气起伏、电子学、干扰光的随机噪声滤除出去, 对提高数据的可靠性及探测精度极为有利。

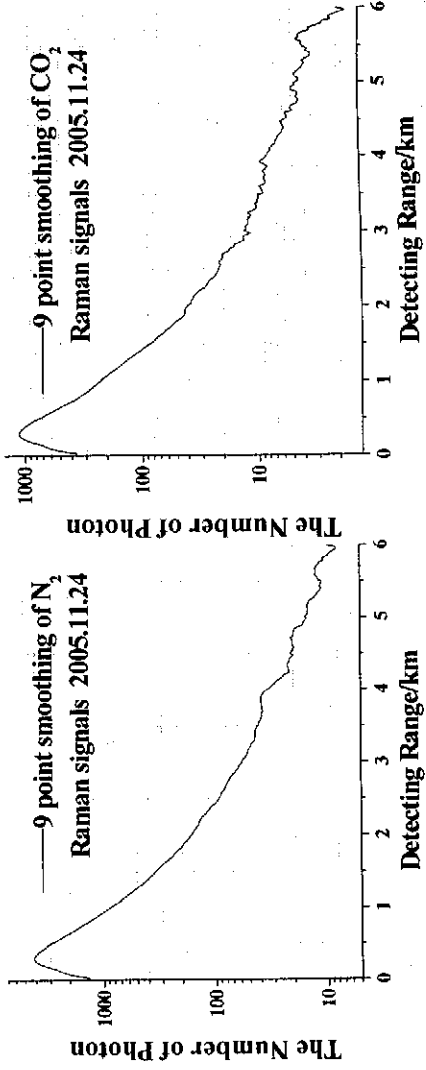


图 6.6 平滑处理后的氮气和二氧化碳拉曼信号

(3) 拉曼雷达信号的初步反演

拉曼散射激光雷达探测距离为 z 处的 CO_2 混合比表达式为:

$$w(z) = C_w \Delta q^w(z_0, z) \frac{S_{\text{CO}_2}(z)}{S_{\text{N}_2}(z)} \quad (6.2)$$

$$\text{其中 } C_w = \frac{k_{\text{N}_2}}{k_{\text{CO}_2}} \frac{\sigma_{\text{N}_2}(\pi)}{\sigma_{\text{CO}_2}} \frac{M_{\text{CO}_2}}{M_{\text{dry}}} \frac{n_{\text{N}_2}}{n_{\text{dry}}}, \quad Dq^w(z_0, z) = \frac{q(\lambda_{\text{N}_2}, z_0, z)}{q(\lambda_{\text{CO}_2}, z_0, z)}$$

系统常数, 该常数常采用与其它仪器对比后定标得出其准确结果。 M_{CO_2} 表示二氧化碳分子的分子量, M_{dry} 表示干空气的分子量。 $Dq^w(z_0, z)$ 为氮气分子和二氧化碳分子两拉曼散射波长的大气透过率差别, 在数据处理过程中, 当两波长相近时可以忽略透过率差别的影响。

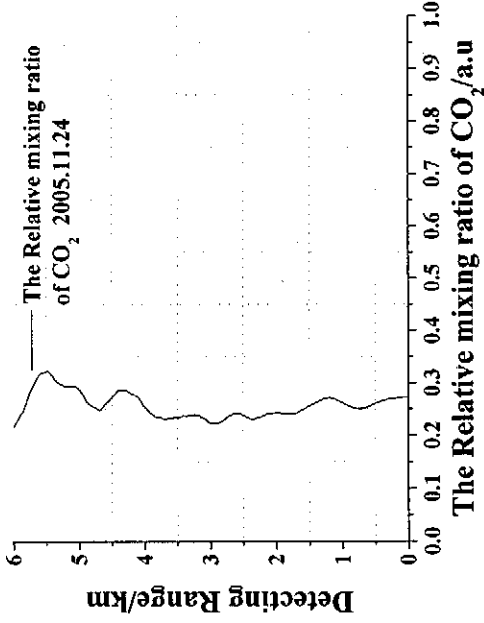


图 6.7 未经定标的二氧化碳相对浓度垂直分布

(4) 拉曼雷达系统常数标定

拉曼激光雷达信号处理过程中, 雷达系统常数的精确标定对准确反演二氧化碳浓度分布结果非常重要, 如上所述步骤 (3) 只是给出了 CO_2 浓度的相对分布结果。按照 CO_2 浓度分布拉曼激光雷达方程的表述, 图 6.7 只是给出了 $\frac{S_{\text{CO}_2}(z)}{S_{\text{N}_2}(z)}$ 的空间分布, 要得到 CO_2 浓度分布的精确结果需要对系统常数 C_w 进行精确标定。

$$\text{拉曼激光雷达系统常数的表示式为: } \frac{k_{\text{N}_2}}{k_{\text{CO}_2}} \frac{\sigma_{\text{N}_2}(\pi)}{\sigma_{\text{CO}_2}} \frac{M_{\text{CO}_2}}{M_{\text{dry}}} \frac{n_{\text{N}_2}}{n_{\text{dry}}}, \quad \text{其中 } \sigma_{\text{CO}_2}(\pi),$$

$\sigma_{\text{N}_2}(\pi)$ 等参数的值可由实验室进行测量测定, M_{CO_2} 表示二氧化碳的分子量, 取

为 44, M_{dry} 表示干空气的分子量, 取为 29, $\frac{n_{\text{N}_2}}{n_{\text{dry}}}$ 表示氮气在干空气中的数密度

之比, 可通过单位换算, 转换成体积比, 其值取为 78%。 k_{CO_2} , k_{N_2} 为两通道的通常数, 它包括在 CO_2 分子和氮气分子拉曼散射波段处系统的光学效率、望远镜的有效截面、光电倍增管的光谱效率以及激光输出能量的乘积, 因此对 k_{CO_2} ,

k_{N_2} 两参数确定之后便可确定出雷达系统常数, 称为绝对定标法; 另一种是相对定标法, 包括大气模式定标、无线电探空仪定标、卫星数据定标、火箭探空定标以及定点定标等。关于探测二氧化碳拉曼雷达的定标工作将在后面详细讨论, 考虑到二氧化碳在大气中分布相对稳定的特点, 我们对上面处理的数据采用大气模式定标方法。设定合肥地区二氧化碳浓度分布符合大气中二氧化碳分布的基本规律, 合肥地区二氧化碳含量在空气的体积比一般为 360~400ppm 之间。通过定标后的二氧化碳含量分布结果如图 6.8 所示。

可以看出拉曼激光雷达测

得的二氧化碳含量分布基本稳

定, 并且拉曼激光雷达探测污染

物的一个优点充分体现出来: 得

益于拉曼激光雷达数据处理方

法的特点, 拉曼激光雷达探测可

消除激光雷达几何因子的影响,

消除激光雷达探测盲区, 得到近

地面污染物的数据。需要指出的

是该数据结果没有考虑大气透过率的修正, 要得到较为准确的二氧化碳含量分布需要对当时的大气消光数据进行处理, 并应用到拉曼雷达信号数据处理中, 该工作在拉曼雷达信号透过率修正部分中详细论述。

(5) 拉曼雷达信号大气透过率修正

大气对光波具有明显的消光作用, 大气消光具有下列基本特点:

- (a) 在干洁大气中, 大气消光决定于空气密度和光通过的大气层厚度。
- (b) 当大气中有气溶胶粒子以及云雾粒子群时, 其消光作用增强很大。

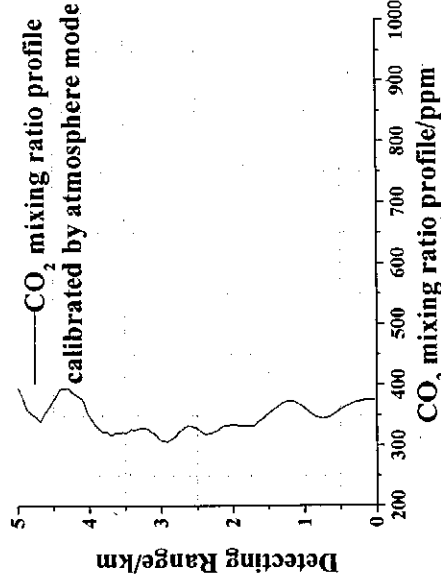


图 6.8 大气模式定标后拉曼雷达探测 CO_2 浓度廓线

(c) 在地面基本上观测不到波长 $\lambda < 0.3$ 微米以下的短波太阳紫外辐射。

(d) 在地面观测到的太阳光谱辐射中具有明显的气体吸收带结构。

大气对太阳短波辐射和地表长波辐射的消光作用主要是由大气中各种气体成份以及气溶胶粒子的吸收与散射所造成的。理论与观测实验都表明, 大气不同成份与不同物理过程造成的消光效应具有线性叠加的特性。

由探测二氧化碳浓度分布拉曼激光雷达方程可以看出, 激光雷达探测受到大气消光作用的影响, 一方面波长为 λ_0 的激发光发射到大气中受到大气中大气分子和气溶胶以及云雾粒子的散射和吸收影响, 另一方面所产生的拉曼散射光也将受到上述消光因素的影响。N₂ 和 CO₂ 拉曼散射信号受到的大气衰减可表示为:

$$Q(S_{N_2}) = q(\lambda_0, z_0, z)q(\lambda_{N_2}, z_0, z) \quad Q(S_{CO_2}) = q(\lambda_0, z_0, z)q(\lambda_{CO_2}, z_0, z) \quad (6.3)$$

其中

$$q(\lambda_0, z_0, z) = \exp\left[-\int_{z_0}^z \alpha_{\lambda_0}(z')dz'\right]$$

$$q(\lambda_{N_2}, z_0, z) = \exp\left[-\int_{z_0}^z \alpha_{\lambda_{N_2}}(z')dz'\right]$$

$$q(\lambda_{CO_2}, z_0, z) = \exp\left[-\int_{z_0}^z \alpha_{\lambda_{CO_2}}(z')dz'\right]$$

结合消光作用具有线性叠加的特性, 上式中所用到的消光系数可以分解表示为:

$$\alpha(r, \lambda_0) = \alpha_m(r, \lambda_0) + \alpha_A(r, \lambda_0)$$

$$\alpha(r, \lambda_{N_2}) = \alpha_m(r, \lambda_{N_2}) + \alpha_A(r, \lambda_{N_2})$$

$$\alpha(r, \lambda_{CO_2}) = \alpha_m(r, \lambda_{CO_2}) + \alpha_A(r, \lambda_{CO_2})$$

m 代表大气分子的消光系数, A 代表气溶胶的消光系数。 λ_0 , λ_{N_2} , λ_{CO_2} 分别代表拉曼激光雷达的激发波长、氮气拉曼散射波长和二氧化碳分子拉曼散射波长。

从地面观测到的太阳光谱中有光强特别减弱的一些光波段, 这都是由于大气分子吸收引起的。图 6.9 是根据观测资料得出的整层大气及其主要气体成份的吸收透射率。在两个波段大气是相当透明的。他们分别是 0.4~0.7 微米和 8~12 微米 (除了 9.6 微米 O₃ 吸收带), 因而被称之为可见光窗口与红外窗口。这两个窗口在大气系统辐射收支中有重要意义。

探测二氧化碳拉曼激光雷达所工作的波段位于 386.7nm 和 371.6nm, 从上图可以看出这两个波段受大气分子吸收作用可以忽略, 因此在该拉曼激光雷达信

号数据处理过程中,关于大气透过率修正主要是考虑大气分子和气溶胶散射消光不同对信号反演造成的影响。

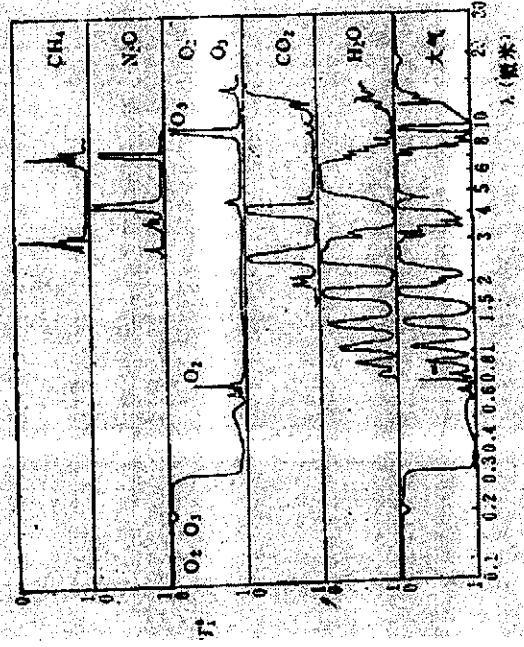


图 6.9 整层大气及主要成分吸收透过率图

由拉曼激光雷达处理方法可以看出,将二氧化碳回波信号表达式与氮气拉曼散射回波信号表达式相比进行整理后得到大气透过率修正项表达式:

$$Dq^w(z_0, z) = \frac{q(\lambda_{N_2}, z_0, z)}{q(\lambda_{CO_2}, z_0, z)} = \exp\left\{ \int_{z_0}^z [\alpha_m(\lambda_{CO_2}, z_0, z) - \alpha_m(\lambda_{N_2}, z_0, z)] - [\alpha_A(\lambda_{CO_2}, z_0, z) - \alpha_A(\lambda_{N_2}, z_0, z)] dz \right\} \quad (6.4)$$

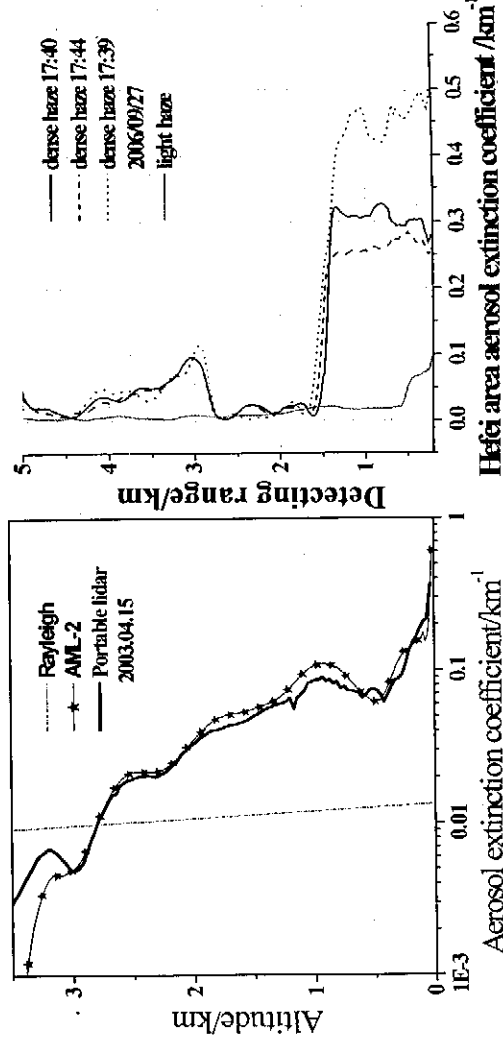


图 6.10 AML-2、Portable Lidar 和 RML 激光雷达测量的气溶胶消光系数 图 6.11 合肥地区不同天气下气溶胶消光系数

大气分子消光系数可以由标准大气或探空资料得到,而气溶胶的消光系数

的探测是一项相对复杂的工作,中科院安徽光机所研制的 AML-2 车载激光雷达^[74]、PML 激光雷达和 RML 激光雷达^[75]探测并总结出了合肥地区的气溶胶消光系数变化的基本规律。图 6.10 所示为上述三种雷达(532nm)实测的合肥地区的气溶胶垂直方向上的大气消光系数,图示为夜晚实验数据。随着天气情况的不同,大气中气溶胶粒子的分布也会有较大变化,图 6.11 所表示的是 AML-2 激光雷达测量的不同天气情况的气溶胶消光系数,测量波长为 532nm。可以看出气溶胶主要分布在近地面到 1.5km 高度范围内,晴朗天气状态下气溶胶的消光系数比阴霾天气下小的多,此时大气的消光作用主要是大气分子消光起主要贡献。

另外,大气分子消光系数的计算采用中纬度地区美国标准大气模式的计算公式^[76]:

$$\beta_m(z) = 1.54 \times 10^{-3} \left(\frac{532}{\lambda}\right)^4 \exp\left(-\frac{z}{7}\right) \quad (6.5)$$

$$\beta_a(z) = \left\{ 2.47 \times 10^{-3} \exp\left(-\frac{z}{2}\right) + 5.13 \times 10^{-6} \exp\left[-\frac{\left(z-20\right)^2}{6^2}\right] \right\} \left(\frac{532}{\lambda}\right) \quad (6.6)$$

式中 $\beta_m(z)$, $\beta_a(z)$ 分别为空气分子和气溶胶粒子的后向散射系数,相应的消光后向散射比为 $8\pi/3$ 和 50,图 6.12 给出了中纬度美国标准大气模式下气溶胶和大气分子的消光系数。

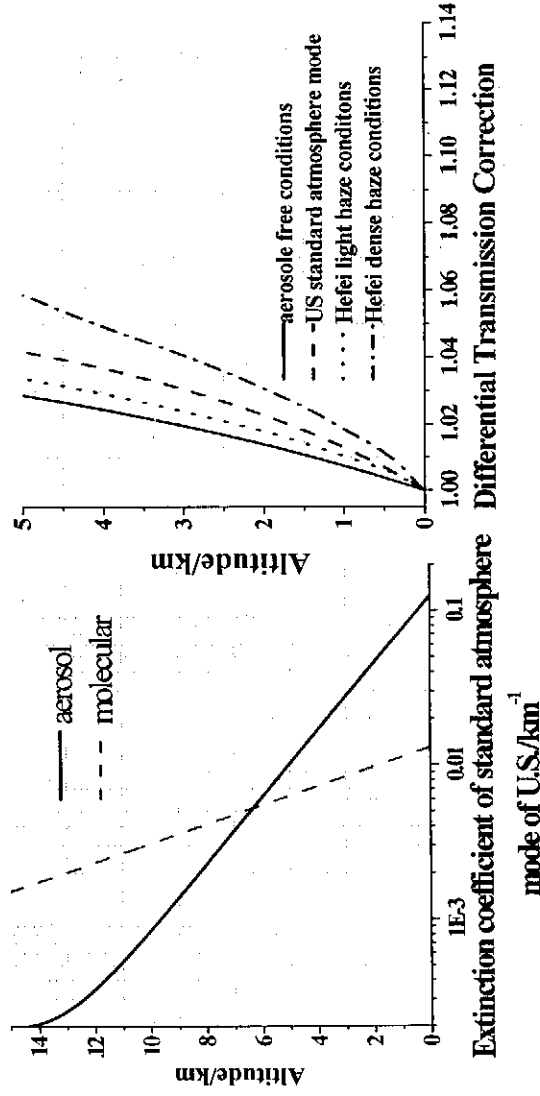


图 6.12 中纬度美国标准大气模式消光系数 图 6.13 拉曼雷达探测 CO₂ 大气透过率修正项

图 6.13 中列出了不同天气情况下拉曼激光雷达探测二氧化碳的大气透过率修正项。所用四种天气状况下的大气消光系数:第一种是假定不含有气溶胶粒

子的天气状况,事实上这种天气状况为一种理想的天气状况,模拟计算中只需考虑大气分子的消光影响。第二种天气情况采用美国标准大气模式的大气消光系数。第三种情况为合肥地区有轻度阴霾时的大气消光系数,第四种情况为合肥地区重度阴霾时的大气消光系数,合肥地区不同天气情况下的消光数据由 AML-2 激光雷达, MPL 和 RML 激光雷达测得。可以看出,以探测距离 5km 处为例:在第四种天气状况下拉曼雷达受大气透过率修正项最大,引起探测结果的误差可达到 6%;利用标准大气模式模拟计算得到大气透过率修正项引起探测结果误差可达到 4%;合肥地区轻度阴霾天气条件下大气透过率修正项引起探测结果误差可达到 3.2%;不考虑气溶胶消光影响情况下大气透过率修正项引起探测结果误差小于 3%。因此在拉曼雷达数据处理过程中要考虑大气透过率修正项的影响,尤其是天气情况能见度受气溶胶消光影响大的情况下,需要考虑当时天气状况的因素,有利于提高激光雷达测量的精确度和可靠性。

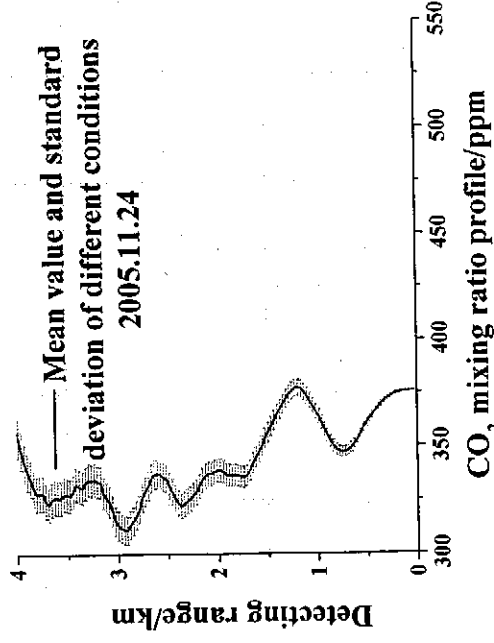


图 6.14 不同天气状况下雷达探测 CO_2 廓线均值和标准偏差

图 6.14 所示为拉曼雷达探测到的一组二氧化碳浓度廓线经不同天气条件下透过率修正后的均值和标准偏差结果,随着探测距离的增加,偏差也随之增大,结果表明在探测距离 4km 处由于透过率修正引起的测量结果偏差可达到 9 ppm。

图 6.15 所示为拉曼雷达探测到的另外一组二氧化碳浓度廓线经不同天气条件下透过率修正后的结果,可以看出经过率修正后得到的浓度廓线结果要比未经修正的结果偏大。

(6) 拉曼雷达信号误差分析

探测二氧化碳拉曼激光雷达方程可以表示为:

$$w(z) = C_w \Delta q^w(z_0, z) \frac{S_{co_2}(z)}{S_{N_2}(z)} \quad (6.7)$$

其中 $C_w = \frac{k_{N_2}}{k_{CO_2}} \frac{\sigma_{N_2}(\pi)}{\sigma_{CO_2}(\pi)} \frac{M_{CO_2}}{M_{dry}} \frac{n_{N_2}}{n_{dry}}$ 表示雷达系统的系统常数, 需经过与其它仪

器对比定标后确定, $Dq^w(z_0, z) = \frac{q(\lambda_{N_2}, z_0, z)}{q(\lambda_{CO_2}, z_0, z)}$ 表示两拉曼散射波长对大气透过率不同

引起的修正项, $\frac{S_{co_2}(z)}{S_{N_2}(z)}$ 表示雷达系统采集到的后向拉曼散射信号强度。根据雷

达信号误差传递公式^[78]表示, 探测二氧化碳拉曼雷达系统的误差可表示为:

$$\left(\frac{\delta w}{w} \right)^2 = \left(\frac{\delta S}{S} \right)^2 + \left(\frac{\delta T}{T} \right)^2 + \left(\frac{\delta C_w}{C_w} \right)^2 \quad (6.8)$$

$\left(\frac{\delta S}{S} \right)^2$ 表示由于拉曼回波信号的不确定度对雷达探测引起的误差影响, $\left(\frac{\delta T}{T} \right)^2$ 表

示在不同天气状况下由于两拉曼散射波长对大气透过率不同引起的误差影响,

$\left(\frac{\delta C_w}{C_w} \right)^2$ 表示由于定标常数不确定性引起的误差影响。

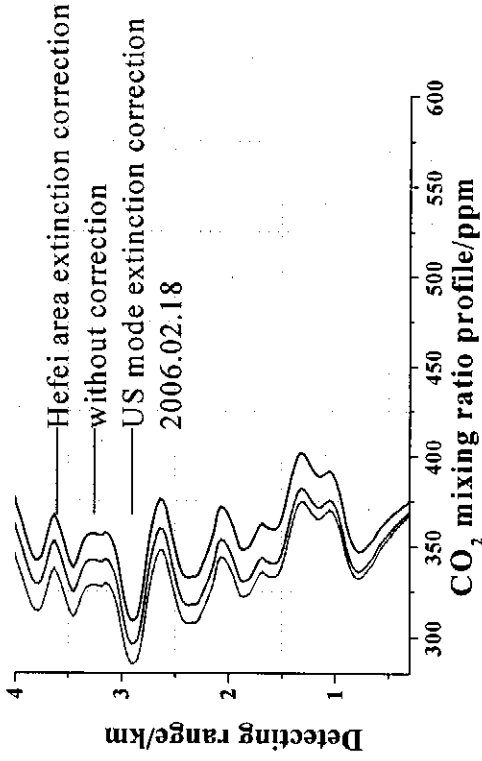


图 6.15 二氧化碳浓度廓线经不同情况下大气透过率修正结果

§ 6.3 拉曼雷达信号的数据处理编程

为方便数据处理人员对探测到的二氧化碳回波信号进行实时处理, 本人编写

了 Raman Lidar (拉曼激光雷达) 探测大气中二氧化碳浓度空间分布的数据处理软件。该软件采用 Visual Basic 6.0 计算机语言进行编程设计。可用于 Raman Lidar 探测大气中二氧化碳浓度空间分布的数据处理软件, 对于 Raman Lidar (拉曼激光雷达) 探测大气中的其它气体的数据处理也可运用该软件。软件编写过程中遵循了拉曼激光雷达信号处理的基本方法, 主要特点有:

- (1) 该软件采用中值滤波的方法对原始数据进行平滑处理, 平滑点数可自由选择。尽可能的消除因大气不稳定性造成的回波信号的剧烈波动, 并对探测结果进行了大气分子消光影响修正, 使探测结果更加真实的反映实际 CO_2 浓度分布。
- (2) 该软件采用最小二乘法进行数据处理, 使探测误差达到最小, 更加真实的反映出 CO_2 气体的浓度分布。
- (3) 该软件在进行数据处理的过程中, 遇到除数为零的数据点时, 能够自行中止, 跳出循环, 确保程序处理的正常运行。
- (4) 该软件能够对处理好的数据结果进行实时保存、显示, 且显示数值的纵横坐标任意可调, 对用户提供了极大的方便。

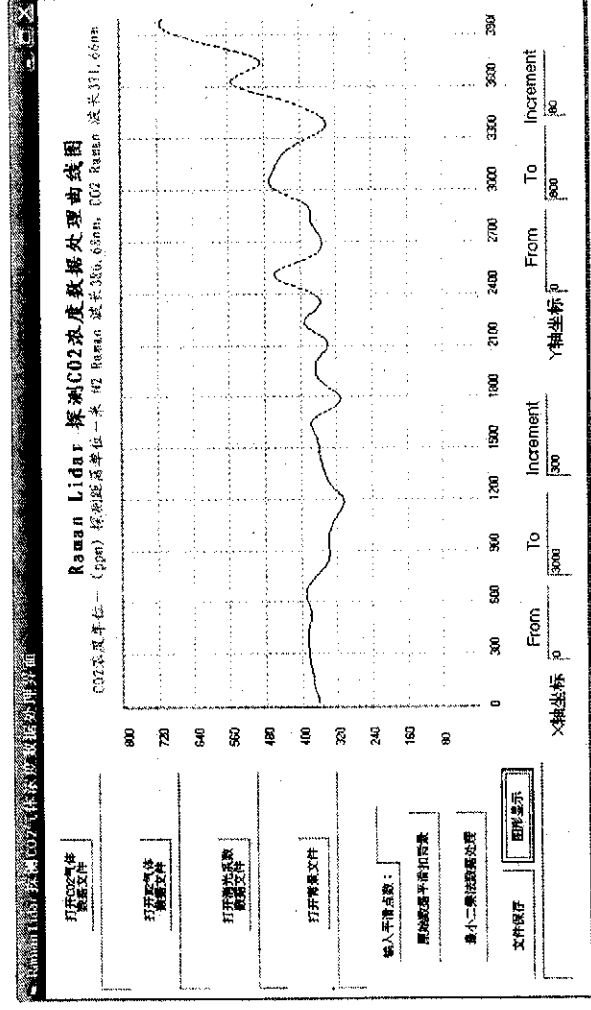


图 6.16 探测二氧化碳拉曼雷达数据处理软件界面

第七章 拉曼激光雷达系统常数标定及对比实验测量

§ 7.1 拉曼激光雷达系统常数标定方法简介

激光雷达大气污染监测具有传统的取样和接触式测量难以具备的优点,它能够实现大范围的大气污染进行连续、实时、快速的遥感监测,具有很高的时空分辨率,可以快速获得污染物水平范围的分布以及垂直结构,进行污染物排放源的非接触式监测和对污染物扩散进行跟踪。激光雷达大气污染测量系统将越来越多地应用于大气污染的监测和研究,已成为大范围快速监测大气环境的新一代高技术手段^[78-81]。在激光雷达进行大气污染监测过程中,对激光雷达测量得到的原始信号按照相应的处理方法进行处理方能得到大气污染物的空间分布,其中关键的一步就是对雷达系统常数进行标定。

对探测二氧化碳浓度分布拉曼激光雷达来讲,探测污染物的浓度分布与可表

示为三部分的乘积,包括系统常数: $C_w = \frac{k_{N_2}}{k_{CO_2}} \frac{\sigma_{N_2}(\pi)}{\sigma_{CO_2}(\pi)} \frac{M_{CO_2}}{M_{dry}} \frac{n_{N_2}}{n_{dry}}$, 透过率修正项:

$Dq''(z_0, z) = \frac{q(\lambda_{N_2}, z_0, z)}{q(\lambda_{CO_2}, z_0, z)}$, 原始信号比值: $\frac{S_{CO_2}(z)}{S_{N_2}(z)}$ 。探测的二氧化碳浓度分布与信号比

值成正比,经大气透过率修正和常数定标后可得到测量污染物在大气中的绝对分布。透过率修正项可由标准大气模式或者当时测量大气消光系数经过数值模拟得到。对于雷达系统常数的标定,一般有两种方法:绝对定标法和相对定标法。

从原理上讲,拉曼激光雷达的系统常数可以通过绝对定标的方法精确确定出来,只需对系统常数表达式中的各个参数的值进行确定,然后将各个值代入表达式中求出即可。Vaughan等人^[82]在1988年提出了水汽拉曼雷达的绝对定标方法,各个器件在两拉曼散射波长处的透过率通过精密仪器测量得到,两通道所用的滤光片的峰值透过率由生产厂家提供,将测量得到的器件透过率结果与滤光片峰值透过率相乘便得到两个通道的透过率。水汽和氮气的拉曼散射截面的值由Penney

和Lapp等人通过实验精确确定^[83]。 $\frac{M_{H_2O}}{M_{dry}} \frac{n_{N_2}}{n_{dry}}$ 值的大小可以通过代入相应的值来

确定。值得说明的是Vaughan的定标方法中要求光电倍增管在氮气和水汽的拉曼

散射波长的量子效率相等,绝对定标方法受到仪器测量精度以及环境温度变化影响较大,厂商提供的滤光片透过率曲线假定为一成不变,因此不能解决系统变化带来的透过率变化问题,例如系统的老化问题、光学元件的替代以及系统常规修正都会导致透过率的变化,最终导致系统常数的改变。Whiteman等人讨论了望远镜光学系统结构变化对系统常数的影响,并指出系统光学元件的改变是短期内导致系统常数改变的主要原因^[42]。在上述的绝对定标方法中,精确测定拉曼散射截面显得非常重要,而且考虑散射截面与温度的关系也需要考虑,因此综上所述,绝对定标的方法在实际操作上有比较大的困难,需要确定的参数太多,而且各个参数随环境以及工作条件的改变而改变,导致系统常数经常发生变化。Vanessa Sherlock等人^[84]提出了一种新的绝对定标的办法:该方法依赖于将仪器功能函数进行分解,雷达定标因子可重新表示成两部分的乘积,一部分描述仪器透过率和探测效率,另一部分描述为与波长相关的Raman后向散射截面随仪器函数的变化。在此定标方法中需要两种外部光源:太阳光天顶角散射光和氙弧灯。该方法的定标结果与Vaisala H-Humicap无线电探空仪对比误差小于15%,短期和长期内的系统常数变化误差分别小于4%和6%,此结果比相对定标的精度要高。

从实际操作上讲,通过与其它探测仪器进行比对然后确定拉曼雷达系统常数的相对定标方法更有利于实际操作。相对定标一般可分为:大气模式定标、无线电探空仪定标、卫星数据定标、火箭探空资料定标、单点仪器定标等方法。大气模式定标所用到的对比资料来源于当地长期累计的气象探空资料,假定当时的探测情况符合同一时期内本地的大气模式,如图7.1所示,测温激光雷达在进行定标过程中就可以采用本地多年来积累的温度数据或者大气温度模式开展激光雷达系统的定标。对于测量二氧化碳拉曼激光雷达来讲,二氧化碳的含量相对来说比较稳定,因此可以利用大气模式对二氧化碳拉曼激光雷达系统进行标定,但是利用模式定标会引入较大的误差,因为大气的参数受多方面因素影响,实时测量时的数据与模式会有一定的出入,因此这种定标方法的可信度不高。在相对定标过程中比较常用的是无线电探空仪对比定标。激光雷达在测量的同时,在附近释放无线电探空仪,然后将雷达数据与探空仪数据进行比对,从而可以实现对雷达系统常数的标定,图7.2所示为水汽拉曼激光雷达与无线电探空仪对比结果。卫星定标是利用卫星数据与激光雷达数据对比,此方法具有一定的局限性,考虑到

卫星轨道的运转周期,只有当卫星运转到与激光雷达探测所在地重合时才能开展对比实验,因此在对比时间上必须进行充分考虑。安徽光机所L625多波长激光雷达探测高空温度、臭氧以及气溶胶的消光系数等参数与HALOE、SAGEII卫星数据进行对比定标。单点仪器定标是将探测仪器放置在激光雷达发射光路上,将仪器采集的数据与激光雷达数据进行对比。以探测二氧化碳为例,常用的对比仪器有LI-7500 CO₂/H₂O分析仪、IAQ Monitor空气质量监测仪等。当激光雷达水平方向扫描时利用此方法进行对比比较方便,可靠性高。但是激光雷达在垂直方向上探测时,利用此方法定标具有一定的局限性,可采用将探测仪器装配在系留艇悬空的办法与激光雷达数据进行对比。

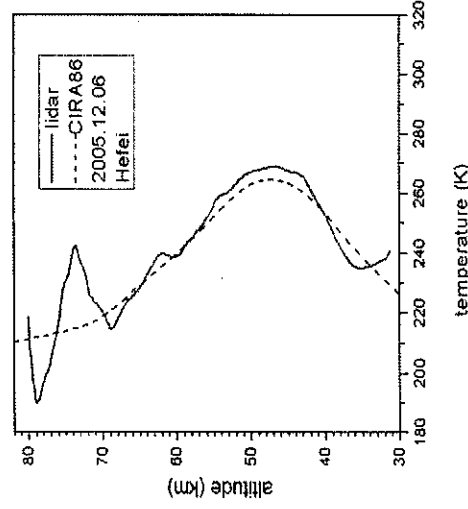


图 7.1 利用温度模式对激光雷达定标

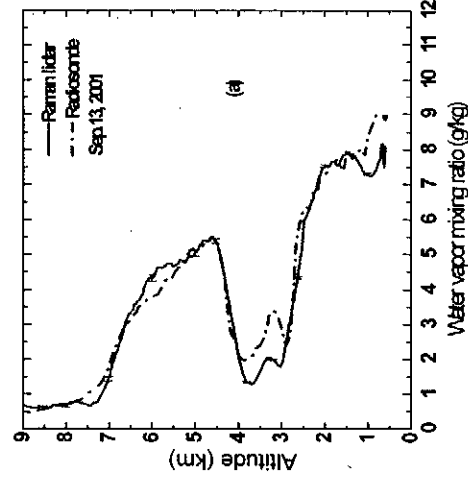


图 7.2 无线电探空仪对激光雷达定标

§ 7.2 探测二氧化碳拉曼激光雷达系统常数标定

在拉曼激光雷达整个系统研制过程中,系统的常数定标工作具有非常重要的意义,一方面该常数的精确确定对于激光雷达精确反演大气参量具有直接的影响,由激光雷达方程可以看出被测污染物的含量与系统常数成正比例关系,雷达系统常数的改变将会直接引起测量污染物含量反演的变化。另一方面,激光雷达系统常数的稳定性也是衡量激光雷达性能是否稳定的参数之一,从原理上讲,激光雷达的系统常数应当保持一个定值,但是随着激光雷达工作环境的变化和各个器件参数的老化,激光雷达的系统常数会有稍许的波动,因此激光雷达在工作一段时间之后需要进行系统常数校正,校正的周期一般在两个月左右。基于实验室现有的实验条件,对研制的探测二氧化碳浓度分布的拉曼激光雷达采用相对定标

的方法,使激光雷达与 LI7500 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ 分析仪进行对比从而确定其系统常数。

LI-7500 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ 分析仪是 Li-cor 公司生产的一种高速、高精性的 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ 气体分析仪,能够在苛刻的空气中测量 CO_2 和 H_2O 的绝对浓度大小。该仪器主要应用于全球气候变化和生态研究中,确定农田或自然景观,如森林冠层、草地、沙漠、海洋等的 CO_2 和 H_2O 的含量。仪器外观以及操作界面如图 7.3 所示。其主要技术特征如下:

1、2cm 的开路传感器头; 2、高精度性、低误差; 3、稳定的校正; 4、可选择的 5、10 或 20Hz 的频率; 5、可准确测量绝对密度; 6、操作的环境温度为 -25 至 +50 度; 7、容易固定; 8、容易设置和监控的 Windows 软件界面; 9、RS-232 的最大输出为 20Hz; 10、用户可以自定义与其它传感器相关的时间间隔;

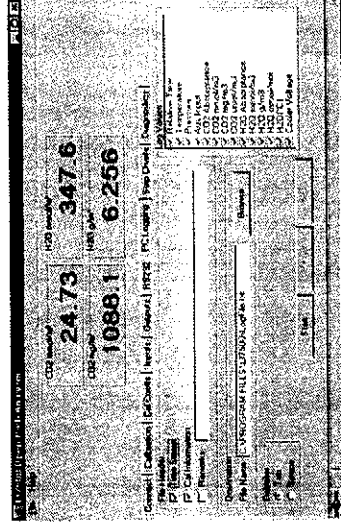
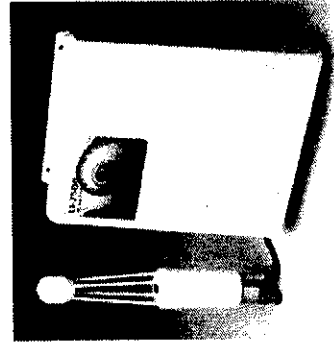


图 7.3 LI-7500 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ 分析仪外观以及操作界面外观

操作箱中密封的外部传感器允许电源、RS-232 和 DAC 输出、模拟输入以及同步测量设备的接口与之相连接。LI-7500 是一台绝对的气体分析仪,意味着气体通过分析器头开放路径时, CO_2 和 H_2O 的绝对浓度值通过光源(传感器头下部叶室)和探测器(传感器头部的上部叶室)之间吸收红外辐射的差值得到。

拉曼激光雷达与 LI-7500

进行定标实验时,选择天气情况较好的晚上,将 LI-7500 分析仪安置在 30m 的实验高塔上进行测量,自动存储数据,调整激光雷达扫描方位,与水平方向成 5° 方向扫描,并且使光路经过 LI-7500 放置地点,保证对两台

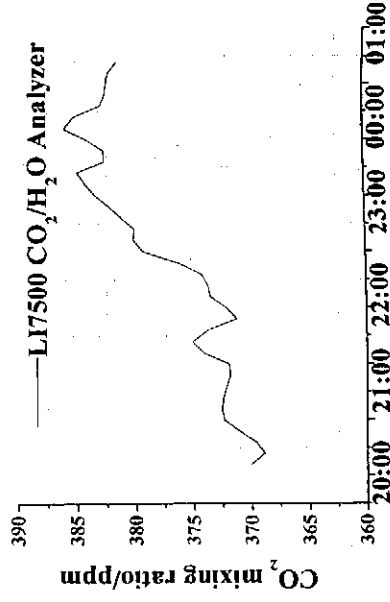


图 7.4 LI7500 测得二氧化碳浓度变化曲线

仪器对同一地点的大气进行探测,以提高对比的可信度。LI-7500 分析仪采集得到的二氧化碳浓度如图 7.4 所示。二氧化碳拉曼激光雷达相对定标具体过程如下:

- 1、将采集到的水平方向上二氧化碳和氮气拉曼原始信号平滑处理。
- 2、将二氧化碳拉曼平滑信号与氮气平滑信号相比,得到信号的比值 $\frac{S_{CO_2}(z)}{S_{N_2}(z)}$ 。
- 3、考虑到LI-7500分析仪与激光雷达相距30米,取30-60米处两拉曼信号比值 $\frac{S_{CO_2}(0.03 \sim 0.06)}{S_{N_2}(0.03 \sim 0.06)}$ 的平均值作为与分析仪对比的数据。
- 4、将拉曼信号比值与分析仪数据对比,得到其中的对应比例系数 k_1 。
- 5、采用不同时间进行多次对比分析,得到一系列对应比例系数 $k_2, k_3, \dots, k_n$ 。
- 6、将得到的所有比例系数进行求平均处理,均值确定为最终的雷达系统常数。
- 7、将该系统常数与两拉曼信号比值 $\frac{S_{CO_2}(z)}{S_{N_2}(z)}$ 相乘就可得到 CO_2 浓度廓线。

值得说明的是,由于LI7500 CO_2/H_2O 分析仪与雷达距离较近因此忽略了大气

透过率差别的影响,即忽略 $Dq^*(z_0, z) = \frac{q(\lambda_{N_2}, z_0, z)}{q(\lambda_{CO_2}, z_0, z)}$ 的影响。

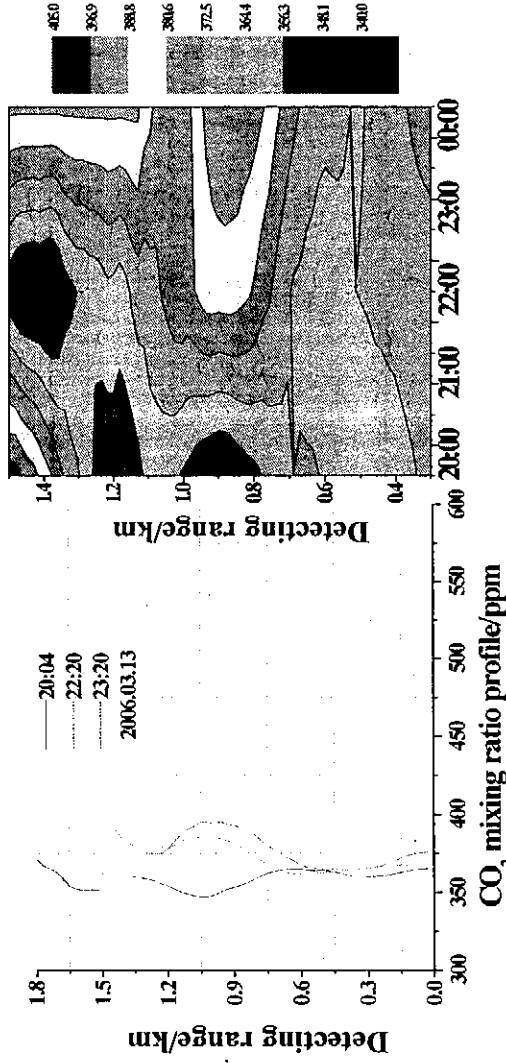


图 7.5 拉曼雷达水平方向测得的二氧化碳浓度廓线及时间演化

由图 7.4 和 7.5 可以看出,二氧化碳浓度在夜晚有增大的趋势,激光雷达与 LI7500 分析仪测得的二氧化碳浓度具有一定的吻合性。图 7.5 中激光雷达采集的数据距离分辨率为 30 米,累计脉冲 200000 次。

激光雷达垂直扫描时的定标方法与水平时类似,将激光雷达测得的底部数据

与观测塔上的分析仪数据相比较,从而得到雷达系统常数。通常情况下,雷达系统常数是距离无关的常数,因此采用了单点数据对比的处理方法,与无线电探空仪对比定标方法相比较来看,单点定标方法具有一定的局限性,可采取一定的方法进行验证:将若干个分析仪摆放在激光雷达水平方向的发射光路上,分别与激光雷达测量数据相对比,从而可以验证激光雷达系统常数是否与距离有关;激光雷达垂直扫描时,可将几个探测器挂在系留艇上,得到垂直方向上的某段距离的数据,并与激光雷达数据相对比,从而验证激光雷达常数是否与距离相关。

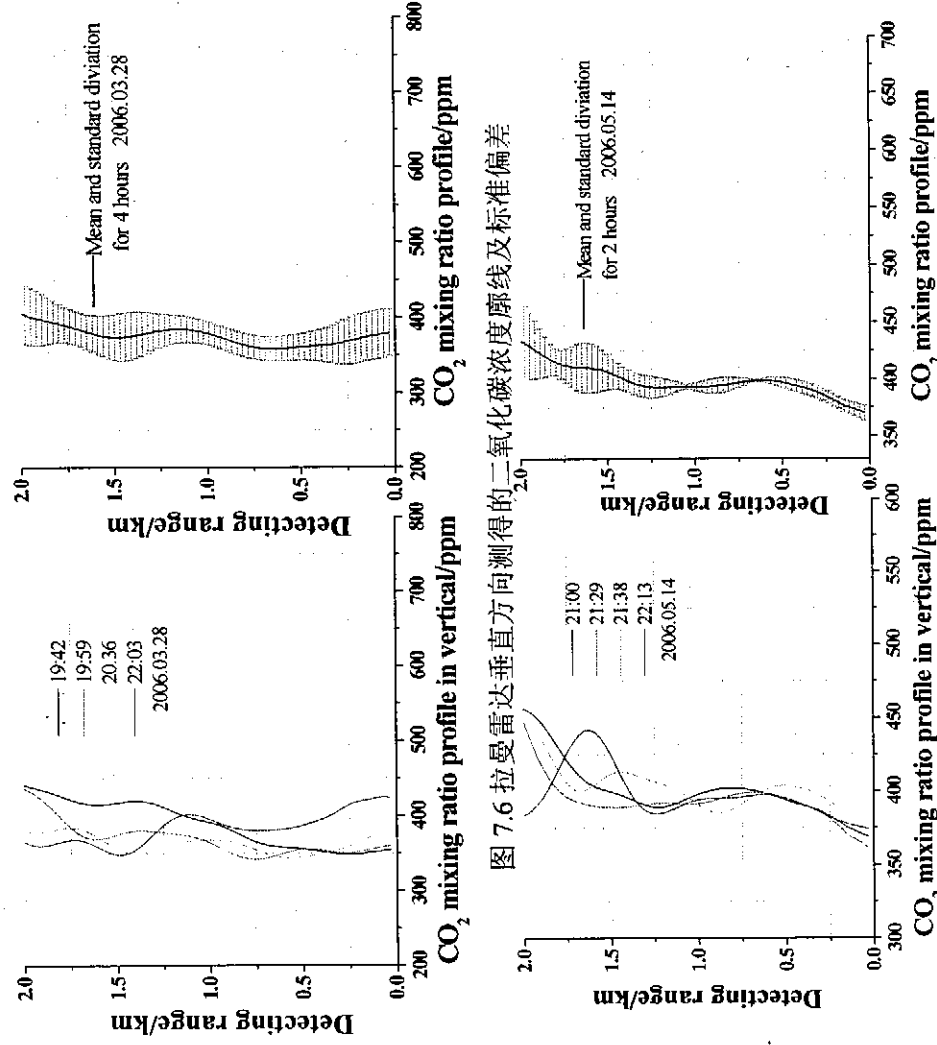


图 7.6 拉曼雷达垂直方向测得的二氧化碳浓度廓线及标准偏差

图 7.7 拉曼雷达垂直方向测得的二氧化碳浓度廓线及标准偏差

图7.6~7.8分别给出了合肥地区董铺岛(31.9°N,117.17°E)三天夜晚垂直方向上二氧化碳浓度分布以及测量数据的标准偏差。该标准偏差包含了二氧化碳夜间随时间演化的影响。可以看出合肥地区二氧化碳浓度含量是相对稳定的,在个别高度上具有一定起伏,测量得到二氧化碳浓度在350~400ppmv之间。由于受环境和动植物呼吸作用以及人类活动的影响,二氧化碳浓度在夜间有上升的趋势,这是因为董铺岛植被丰富,白天植物光合作用强烈,吸收大气中的二氧化碳,造

成二氧化碳浓度降低,到了夜间光合作用减弱,同时植物呼出二氧化碳,造成浓度上升。该激光雷达能较好的得到合肥地区上空二氧化碳浓度分布廓线,具有较高的可靠性,且经过两个月的时间,系统基本保持稳定,能较好的满足探测要求。

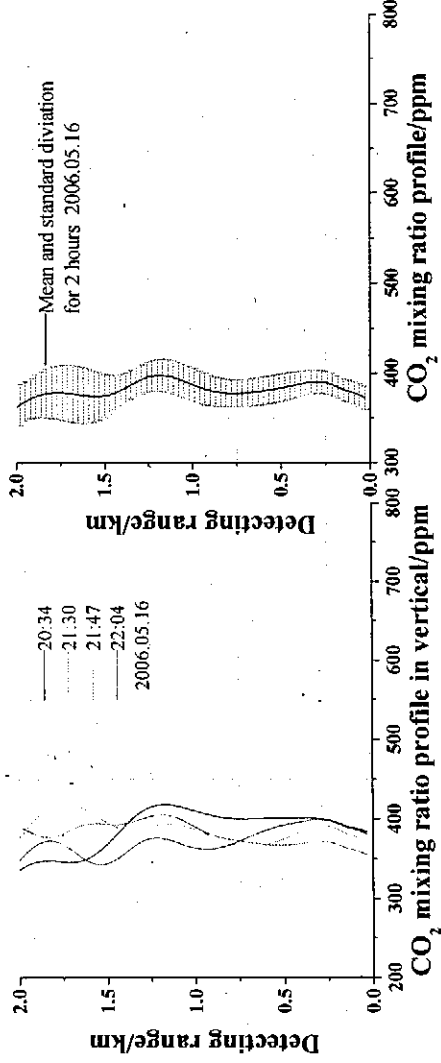


图 7.8 拉曼雷达垂直方向测得的二氧化碳浓度廓线及标准偏差

由于当时激光器闪光灯的泵浦次数已接近6000万次,造成激光器发射能量下降,经测量此时的发射能量为30mJ,造成激光雷达探测距离减小,为提高激光雷达的探测比,应提高激光器的发射能量。

§ 7.3 二氧化碳拉曼激光雷达系统常数标定新方法

§7.3.1 二氧化碳拉曼激光雷达定标方法概述

在二氧化碳拉曼激光雷达整个系统研制过程中,系统的常数定标工作具有非常重要的意义,从原理上讲,激光雷达的系统常数应当保持一个定值,但是随着激光雷达工作环境的变化和各个器件参数的老化,激光雷达的系统常数会有些许的波动,因此激光雷达在工作一段时间之后需要进行系统常数校正,校正的周期

一般在两个月左右。通过对原有实验系统进行改进,在原雷达系统的基础上增加三维扫描装置,实现二氧化碳拉曼雷达三维扫描功能,提出了一种适用于二氧化碳拉曼扫描激光雷达定标的简便方法,该方法在定标过程中需要结合使用 LI7500 CO₂/H₂O

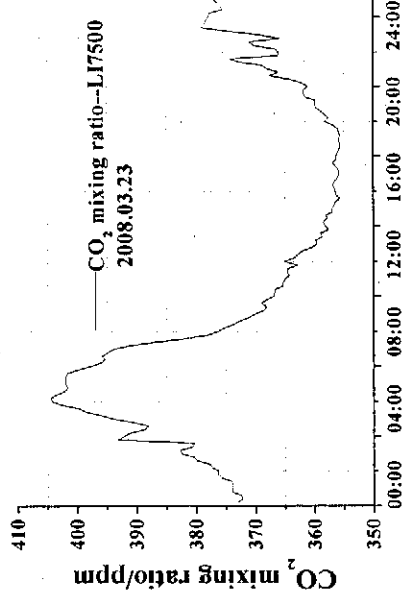


图 7.9 LI7500 测量的 CO₂ 混合比随时间变化

分析仪的二氧化碳探测结果。

拉曼激光雷达与 LI-7500 进行定标实验时, 选择天气情况较好的晚上, 将 LI-7500 分析仪安置在 30m 的实验高塔上进行测量, 自动存储数据, 调整激光雷达扫描方位, 与水平方向成 5° 方向扫描, 并且使光路经过 LI-7500 放置地点, 保证对两台仪器对同一地点的大气进行探测, 以提高对比的可信度。LI-7500 分析仪采集得到的二氧化碳混合比浓度如图 7.9 所示。

针对该拉曼激光雷达具有三维扫描的功能, 将激光雷达在水平和垂直两个方向上交叉扫描, 然后结合 LI7500 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ 分析仪的二氧化碳测量数据进行雷达系统常数标定, 具体定标过程如下:

1、将激光雷达在水平方向上扫描。适当调节激光雷达扫描方位, 使雷达光束以水平方向发射, 同时确保光路经过 LI7500 分析仪附近位置, 采集得到水平方向上的二氧化碳和氮气拉曼信号。

2、将水平方向上二氧化碳拉曼信号与氮气信号进行适当平滑处理后相除, 得到

$$\text{信号的比值} \frac{S_{\text{CO}_2}(z)}{S_{\text{N}_2}(z)}。$$

3、将激光雷达在垂直方向上扫描。采集垂直方向上的二氧化碳和氮气拉曼信号。将垂直方向上二氧化碳拉曼信号与氮气信号进行适当平滑处理后相除, 得

$$\text{到信号的比值} \frac{S_{\text{CO}_2}(z)}{S_{\text{N}_2}(z)}, \text{ 重复进行水平和垂直方向扫描。}$$

4、考虑到 LI-7500 分析仪与激光雷达相距 30 米, 且二氧化碳分布相对均匀, 取

$$\text{水平方向 30-300 米处两拉曼信号比值} \frac{S_{\text{CO}_2}(0.03 \sim 0.3)}{S_{\text{N}_2}(0.03 \sim 0.3)} \text{ 的平均值与分析仪数据}$$

对比, 得到水平方向的对应比例系数 C_1 。

5、取垂直方向 60 米处两拉曼信号比值 $\frac{S_{\text{CO}_2}(0.06)}{S_{\text{N}_2}(0.06)}$ 的值与分析仪数据对比, 得到垂直

方向的对应比例系数 C_2 。

6、采用不同时间进行多次对比分析, 得到一系列对应比例系数 $C_3, C_4, \dots, C_n$ 。

7、分析比例系数 $C_3, C_4, \dots, C_n$ 之间的相关性, 并将比例系数进行适当处理 (取平均) 后得到最终的比例系数, 该比例系数即为最终的雷达系统常数。

8、将该系统常数与两拉曼信号比值 $\frac{S_{\text{CO}_2}(z)}{S_{\text{N}_2}(z)}$ 相乘就可得到拉曼雷达测量的二氧化碳

碳浓度分布廓线。

值得说明的是,由于LI7500 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ 分析仪与雷达距离较近因此忽略了大气透过率差别的影响,即忽略 $Dq^*(z_0, z)$ 的影响,同时考虑到二氧化碳在时间上相对稳定,通常分别取水平方向和垂直方向的几组信号的平均值与LI7500 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ 分析仪数据进行对比标定。

§7.3.2 二氧化碳拉曼激光雷达定标实验

如前所述,二氧化碳拉曼激光雷达的定标过程可以简单概括为由水平方向与垂直方向联合定标过程。图 7.10 所示为二氧化碳拉曼激光雷达在 2008. 03. 23 晚上进行定标的实验数据,左图表示的水平方向的测量得到的两组二氧化碳浓度廓线,右图表示的是垂直方向上测量得到的两组二氧化碳浓度廓线,这四条曲线都是未经定标的实验结果,分别表示为 A, B, C, D 线,各条曲线对应的时间在图中标出。

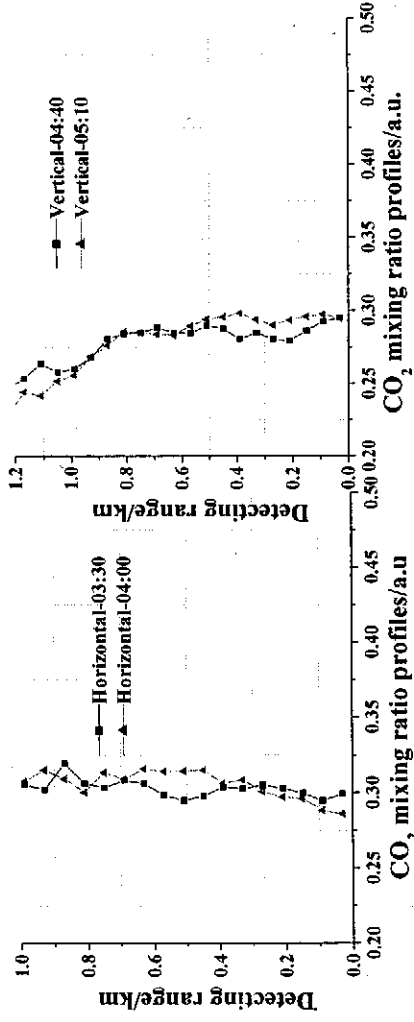


图 7.10 二氧化碳拉曼激光雷达测量二氧化碳相对浓度分布

将水平和垂直方向的拉曼激光雷达信号比值 $\frac{S_{\text{CO}_2}(z)}{S_{\text{N}_2}(z)}$ 分别相加取平均,并与相应时间内 LI7500 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ 分析仪数据进行对比后可得到两个准系统常数,其值分别为 1255 和 1285,准常数之间的相关性大小为 97.7%,拉曼激光雷达系统常数终值取为准系统常数的均值: 1270,标准偏差为 21。将定标常数乘以上述四组曲线中可得到水平和垂直方向上水汽混合比的绝对值,如图 7.11 所示左图为定标后拉曼雷达测量得到在水平方向上的二氧化碳浓度廓线,可以看出在水平方向一定范围内 (<1km) 二氧化碳浓度变化较小,接近于均匀分布状态。右图给

出了两组曲线的平均值及标准偏差大小,需要说明的是该图图包含了二氧化碳浓度随时间演化的过程,可以看出二氧化碳浓度在水平方向上变化较为均匀。

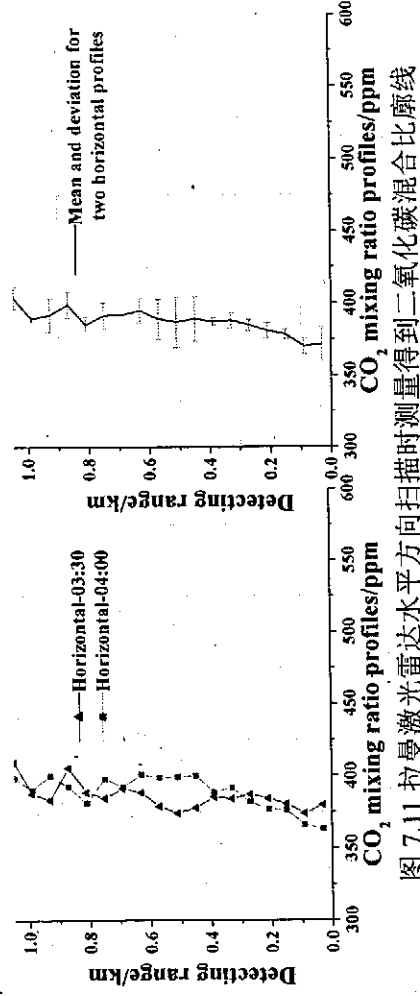


图 7.11 拉曼激光雷达水平方向扫描时测量得到二氧化碳混合比廓线

如图 7.12 所示左图为定标后二氧化碳拉曼雷达测量得到在垂直方向上的二氧化碳浓度廓线,可以看出在垂直方向上二氧化碳浓度具有少许递减的趋势。右图给出了两组曲线的平均值及标准偏差大小,需要说明的是右图包含了二氧化碳浓度随时间演化的过程。二氧化碳浓度具有少许递减的趋势的可能原因因为:该数据是在凌晨 3~5 点测量得到的,当时天气情况良好,大气活动稳定,大气中的二氧化碳分子比重为 44,比空气的比重要大,因此会有沉降的现象发生。由图 7.11 和 7.12 可以看出,拉曼激光雷达探测污染物的一个优点充分体现出来,拉曼激光雷达探测可消除激光雷达几何因子的影响,消除激光雷达探测盲区,得到近地面污染物的数据。激光雷达在垂直测量时,得到的二氧化碳浓度在近地面的数据结果大小与水平测量时得到的数据相吻合,充分验证了雷达测量的可靠性以及所提出的定标方法的合理性。

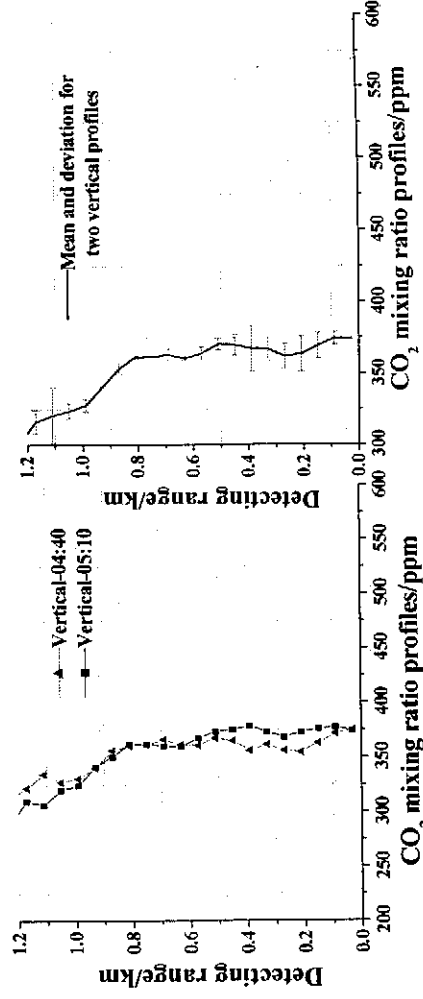


图 7.12 拉曼激光雷达垂直方向扫描时测量得到二氧化碳浓度廓线

值得说明的是,上述提出的二氧化碳拉曼激光雷达定标方法与本论文中第八

章的车载拉曼水汽激光雷达标定方法相一致,只是由于二氧化碳拉曼散射光谱信号较水汽拉曼散射信号更弱,因此在数据处理定标过程中一般采用多组平均的办法,这一点与水汽拉曼激光雷达定标有所不同。该定标方法还需要进行大量的实验以证明其可行性和精确性。

§ 7.4 探测二氧化碳拉曼激光雷达测量误差分析

§7.4.1 拉曼激光雷达误差理论

设被测量 N 是 A, B, C 等自变量的函数,即 $N = F(A, B, C, \dots)$ 则被测量的相对误差为^[103]:

$$\left(\frac{\delta N}{N}\right)^2 = \left(\frac{\partial F}{\partial A}\right)^2 \left(\frac{\delta A}{F}\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial B}\right)^2 \left(\frac{\delta B}{F}\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial C}\right)^2 \left(\frac{\delta C}{F}\right)^2 + \dots \quad (7.1)$$

常见的误差传递公式:

$$\begin{aligned} (1) N = AB \quad \text{则} \quad \left(\frac{\delta N}{N}\right)^2 &= \left(\frac{\delta A}{A}\right)^2 + \left(\frac{\delta B}{B}\right)^2 & (2) N = A/B \quad \text{则} \quad \left(\frac{\delta N}{N}\right)^2 &= \left(\frac{\delta A}{A}\right)^2 + \left(\frac{\delta B}{B}\right)^2 \\ (3) N = \frac{A^m}{B^n} \quad \text{有} \quad \left(\frac{\delta N}{N}\right)^2 &= \left(m \frac{\delta A}{A}\right)^2 + \left(n \frac{\delta B}{B}\right)^2 & (4) N = A \pm B \quad \text{则} \quad \left(\frac{\delta N}{N}\right)^2 &= \frac{\delta A^2 + \delta B^2}{(A \pm B)^2} \end{aligned} \quad (7.2)$$

§7.4.2 探测二氧化碳 Raman 激光雷达的误差计算

根据误差传递理论可以得到激光雷达测量 CO_2 混合比的误差主要是由回波信号 S 、透过率修正指数函数 T 和标定常数 C_w 三项的相对不确定度共同作用的结果。拉曼激光雷达测量二氧化碳浓度混合比误差公式可表示为:

$$\left(\frac{\delta w}{w}\right)^2 = \left(\frac{\delta S}{S}\right)^2 + \left(\frac{\delta T}{T}\right)^2 + \left(\frac{\delta C_w}{C_w}\right)^2 \quad (7.3)$$

回波信号的相对不确定度 $\delta S/S$ 由两部分组成: 氮气拉曼回波信号和二氧化碳拉曼回波信号的不确定度, 满足如下关系表达式:

$$\left(\frac{\delta S}{S}\right)^2 = \left(\frac{\delta N_{\text{CO}_2}}{N_{\text{CO}_2}}\right)^2 + \left(\frac{\delta N_{\text{N}_2}}{N_{\text{N}_2}}\right)^2 \quad (7.4)$$

式中, N_{CO_2} , N_{N_2} 为 CO_2 和氮气 Raman 回波信号的计数值, δN_{CO_2} , δN_{N_2} 为 CO_2 和氮气 Raman 回波信号的不确定度。

忽略放大器和光子计数器引起的信号不确定度, 那么 CO_2 拉曼回波信号和氮气拉曼回波信号的随机相对不确定度可表示如下:

$$\frac{\delta N_{CO_2}}{N_{CO_2}} = \frac{\sqrt{N_{CO_2} + N_D + N_B}}{N_{CO_2}} \quad (7.5)$$

$$\frac{\delta N_{N_2}}{N_{N_2}} = \frac{\sqrt{N_{N_2} + N_D + N_B}}{N_{N_2}} \quad (7.6)$$

式中, N_D 为光电倍增管的暗计数; N_B 为天空背景辐射产生的计数, N_{CO_2} ,

N_{N_2} 、 N_D 、 N_B 均是在发射大量激光脉冲情况下的累加值, 将(7.5)和(7.6)式代入(7.4)式, 即可得到拉曼雷达回波信号相对不确定度 $\delta S/S$ 。

图 7.13 所示为 2008 年 3 月 24 号晚拉曼雷达测量的二氧化碳和氮气的回波信号的不确定度表示, 从中可以看出, 氮气回波信号不确定度要比二氧化碳回波信号小一些。在探测距离 2km 处, 氮气回波信号的偏差小于 5%, 而二氧化碳回波信号的偏差可达到 8% 左右。右图为根据误差传递公式推导出拉曼雷达回波信号相对不确定度 $\delta S/S$ 的表示。数据表明, 随着距离上升不确定度也在增加, 在探测距离 2km 处, 其最大值达到了 10%。

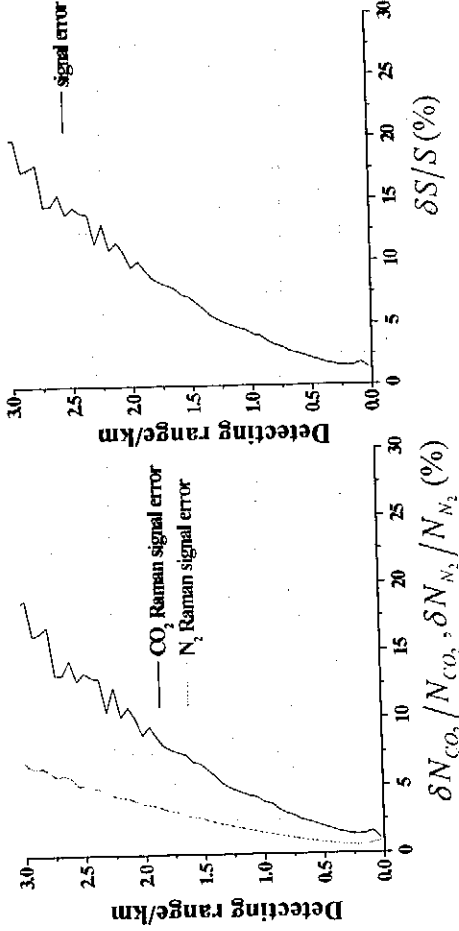


图 7.13 二氧化碳拉曼激光雷达回波信号不确定度

大气透过率修正函数的相对不确定度 $\delta T/T$ 可由大气透过率修正函数进行适当推导得出, 大气透过率项表示如下:

$$T(R_0, R) = \Delta_q^w(R_0, R) = \frac{q(\lambda_2, R_0, R)}{q(\lambda_1, R_0, R)} \quad (7.7)$$

$$\tau_A(\lambda_x, R_0, R) = \int_{R_0}^R \alpha_a(\lambda_x, z) dz, \quad \tau_M(\lambda_x, R_0, R) = \int_{R_0}^R \alpha_m(\lambda_x, z) dz \quad (7.8)$$

$$q(\lambda_x, R_0, R) = \exp[-\tau_A(\lambda_x, R_0, R) - \tau_M(\lambda_x, R_0, R)] \quad (7.9)$$

其中, λ_x 为 Raman 散射波长, $\tau_A(\lambda_x, R_0, R)$ 为高度 R_0 和 R 之间 λ_x 波长的大气气溶胶光学厚度, $\tau_M(\lambda_x, R_0, R)$ 为高度 R_0 和 R 之间 λ_x 波长的空气分子散射光学厚度。

大气气溶胶光学厚度和空气分子散射光学厚度的波长依赖性分别为^[104]:

$$\tau_A(\lambda_x, R_0, R) = \tau_A(\lambda_{532}, R_0, R) \left(\frac{\lambda_x}{\lambda_{532}} \right)^{-B} \quad (7.10)$$

$$\tau_M(\lambda_x, R_0, R) = \tau_M(\lambda_{532}, R_0, R) \left(\frac{\lambda_x}{\lambda_{532}} \right)^{-4} \quad (7.11)$$

将(7.10)和(7.11)式代入(7.9)式, 得 λ_x 波长的大气透射率:

$$q(\lambda_x, R_0, R) = \exp \left[-\tau_A(\lambda_{532}, R_0, R) \left(\frac{\lambda_{532}}{\lambda_x} \right)^B - \tau_M(\lambda_{532}, R_0, R) \left(\frac{\lambda_{532}}{\lambda_x} \right)^4 \right] \quad (7.12)$$

设 $B=1$, 将(7.12)式代回(7.7)式后, 即可得到大气透射修正函数与 λ_{532} 波长的气溶胶光学厚度之间的关系:

$$T = \exp \left\{ \tau_A(\lambda_{532}, R_0, R) \left(\frac{\lambda_{532}}{\lambda_1} - \frac{\lambda_{532}}{\lambda_2} \right) + \tau_M(\lambda_{532}, R_0, R) \left[\left(\frac{\lambda_{532}}{\lambda_1} \right)^4 - \left(\frac{\lambda_{532}}{\lambda_2} \right)^4 \right] \right\} \quad (7.13)$$

根据误差传递公式可得到上式中 T 的相对不确定度:

$$\left(\frac{\delta T}{T} \right)^2 = \left(\frac{\lambda_{532}}{\lambda_1} - \frac{\lambda_{532}}{\lambda_2} \right)^2 [\delta \tau_A(\lambda_{532}, R_0, R)]^2 + \left[\left(\frac{\lambda_{532}}{\lambda_1} \right)^4 - \left(\frac{\lambda_{532}}{\lambda_2} \right)^4 \right]^2 [\delta \tau_M(\lambda_{532}, R_0, R)]^2 \quad (7.14)$$

由(7.14)式可以看出, λ_1 和 λ_2 相差越近, 误差越小。大气气溶胶和空气分子散射光学厚度的不确定度一般可假定为:

$$\delta \tau_A(\lambda_{532}, R_0, R) = 0.5 \tau_A(\lambda_{532}, R_0, R) \quad (7.15)$$

$$\delta \tau_M(\lambda_{532}, R_0, R) = 0.1 \tau_M(\lambda_{532}, R_0, R) \quad (7.16)$$

对于探测二氧化碳拉曼激光雷达, $\lambda_1 = 386.7 \text{ nm}$ 对应于氮气分子拉曼散射中心波长, $\lambda_2 = 371.6 \text{ nm}$ 对应于二氧化碳分子拉曼散射中心波长。将 AML-2 车载

激光雷达测量的合肥地区气溶胶和大气分子的消光数据作为大气透过率修正项模拟时的消光数据, 同时利用中纬度美国标准大气模式的消光数据作为参考数据。将(7.16)和(7.17)式代入(7.15)式, 即可得到大气透过率修正函数的相对不确定度 $\delta T/T$, 如图 7.14 所示为采用不同大气模式下透过率修正项的不确定度表示。 $\delta T/T$ 数值虽然也随着高度的增加而增大, 但在拉曼雷达作用的近地面 ($<3\text{km}$) 小于 0.5% (以美国标准大气模式为例), 因此它对二氧化碳混合比对不确定度的影响很小。

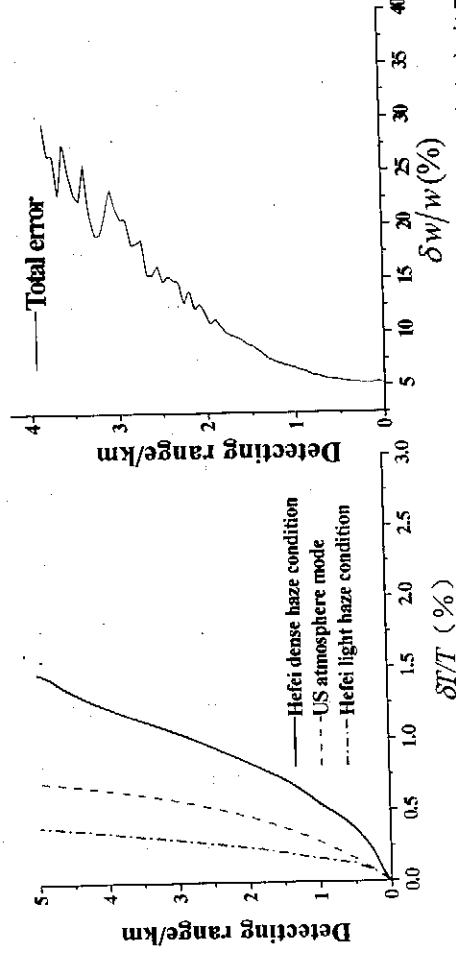


图 7.14 大气透过率修正函数的不确定度 图 7.15 拉曼雷达总的不确定度表示

拉曼雷达定标常数误差分析 $\delta C_w/C_w$ 。对于拉曼雷达的定标主要是与其它仪器进行对比实验, 因此标定常数 C_w 的误差主要由对比仪器 (CO_2 分析仪) 的精度有限造成。 N 次标定后标定常数 C_w 的不确定度可由下面公式给出 (假设每一标定常数的不确定度相等)。

$$\left(\delta C_w\right)^2 = \frac{1}{N-1} \sum \left(C_{wi} - \bar{C}_w\right)^2 \quad (7.17)$$

上式中, N 为测量的次数, C_{wi} 为第 i 次测量产生的标定常数, $\bar{C}_w$ 为 N 次标定后的平均标定常数, δC_w 为标定常数的不确定度。

对于标定常数的相对不确定度 $\delta C_w/C_w$ 与高度无关, 经计算大约在 5% 左右。根据误差传递公式, 把三种误差进行综合分析, 依据式 (7.4) 得到拉曼激光雷达探测二氧化碳的相对不确定度, 具体如图 7.15 所示。从图中可以看出,

随着距离的增加,拉曼激光雷达探测结果的不确定度在增大,这是由于信噪比降低的结果。在1km以下,回波信号较强,不确定度小于7%,随着距离增加,回波信号减弱,各种噪声相对增加,使误差增加,到3km处不确定度将达到20%。

§ 7.5 气溶胶消光系数拉曼激光雷达测量

大气气溶胶主要集中在大气边界层中,对大气环境、气候辐射和光在大气中的传输等有重要影响。一方面是它自身的污染特性,即它可以被人们直接吸入呼吸道内而影响人们的身体健康。同时,它通过对太阳光的散射和吸收而影响地面能见度,并与酸雨的形成、烟雾事件的发生及臭氧层破坏等密切相关。因此,气溶胶对于农业、交通和人类的生存环境等都带来严重的影响。另一方面,气溶胶通过太阳辐射的散射和吸收而影响地—气系统的辐射收支。激光雷达利用气溶胶粒子对激光的散射和衰减作用,可以测量气溶胶的体后向散射或消光系数随高度的分布。基于Rayleigh—Mie散射原理研制的激光雷达可以实现大气中气溶胶消光系数的测量,与此同时可以利用Raman激光雷达采集的氮分子的拉曼散射信号反演大气中气溶胶粒子的消光系数,同时结合Raman—Mie散射方法探测气溶胶散射比及体后向散射系数^[104]。探测二氧化碳浓度分布的拉曼激光雷达能同时采集大气中的氮分子以及二氧化碳分子拉曼散射回波信号,氮分子拉曼散射信号受到大气中气溶胶及大气分子消光的影响,因此可以利用氮分子回波信号反演大气中气溶胶消光系数。

§7.5.1 Raman激光雷达探测对流层气溶胶消光系数原理

若记 λ_0 为发射激光波长, λ_{N_2} 为氮分子振动Raman散射波长, 则氮分子

Raman散射回波可由激光雷达方程表示为:

$$P(\lambda_{N_2}, z) = C\beta_{N_2}(z) \times O(z) \times Q_m(\lambda_{N_2}, \lambda_0, z) \times Q_p(\lambda_{N_2}, \lambda_0, z) \times Q_o(\lambda_{N_2}, \lambda_0, z) / z^2 \quad (7.18)$$

其中 $Q_m(\lambda_{N_2}, \lambda_0, z) = \exp\{-\int_{z_0}^z (\alpha_m(\lambda_0, z') + \alpha_m(\lambda_{N_2}, z')) dz'\}$

$$Q_p(\lambda_{N_2}, \lambda_0, z) = \exp\{-\int_{z_0}^z (\alpha_p(\lambda_0, z') + \alpha_p(\lambda_{N_2}, z')) dz'\}$$

$$Q_o(\lambda_{N_2}, \lambda_0, z) = \exp\{-\int_{z_0}^z (\alpha_o(\lambda_0, z') + \alpha_o(\lambda_{N_2}, z')) dz'\} \quad \beta_{N_2}(z) = \sigma_{N_2} N_{N_2}(z)$$

上式中 $P(\lambda_{N_2}, z)$ 为 N_2 分子振动Raman回波信号强度; C 为系统常数; $\beta_{N_2}(z)$ 为

N_2 分子振动 Raman 后向散射系数; $O(z)$ 为发射激光束和接收视场之间的几何重叠系数, 又称几何因子; $Q_m(\lambda_{N_2}, \lambda_0, z)$, $Q_p(\lambda_{N_2}, \lambda_0, z)$ 和 $Q_o(\lambda_{N_2}, \lambda_0, z)$ 分别对应为分子、气溶胶和臭氧对 N_2 Raman 回波的大气透过率; $\alpha(z)$ 为消光系数; 下标 m、p 和 o 分别代表分子、气溶胶和臭氧。 $\sigma_{N_2}(z)$ 和 $N_{N_2}(z)$ 为 N_2 分子振动 Raman 散射截面和数密度。由方程(7.18)看出, Raman 散射回波与气溶胶后向散射无关, 而主要受气溶胶消光系数的影响。 N_2 分子在 0~100 km 高度大气中的混合比可视为常数。假定气溶胶消光指数随波长的关系为: $\alpha_p(\lambda) \propto \lambda^{-\nu}$, ν 称气溶胶消光波长指数, 它一般在 0.5~2.0 之间, 常假设为常数 1.0^[106]。由第五章给出的氮气和二氧化碳拉曼信号测量实验结果表明该 Raman 激光雷达的过渡区约为 0~0.5km, 0.5km 以上高度的回波全在接收望远镜的视场内, 即 $O(z)$ 为 1。记大气分子的数密度为 $N(z)$, 由探空或模式数据给出。则可由方程 (7.18) 可得到气溶胶消光系数 $\alpha_p(\lambda_0, z)$ 的表达式:

$$\alpha_p(\lambda_0, z) = \frac{1}{1 + \left(\frac{\lambda_{N_2}}{\lambda_0}\right)^{-\nu}} \left\{ \frac{d}{dz} \left[\ln \frac{N(z)}{P(\lambda_{N_2}, z) z^2} \right] - \alpha_m(\lambda_0, z) \left[1 + \left(\frac{\lambda_{N_2}}{\lambda_0}\right)^{-4} \right] \right\} \quad (7.19)$$

§7.5.2 氮气分子拉曼散射信号反演气溶胶消光系数实例

利用氮气拉曼散射信号反演气溶胶消光系数过程中, 用到了大气分子的数密度模式和大气分子消光系数模式, 该模式均选用 1976 年美国标准大气模式。由于几何因子的影响, 利用该方法反演气溶胶消光系数时, 从饱和区开始的实验数据能够正确反演气溶胶消光系数, 在过渡区的实验数据, 如果不经几何因子修正, 则不能正确反演气溶胶消光系数。在反演过程中假定气溶胶消光波长指数为 1.0。图 7.16 和 7.17 给出了二氧化碳拉曼激光雷达测量的氮气拉曼分子反演气溶胶的消光系数示意图, 其中左图为垂直扫描测量情况, 右图为水平扫描测量情况^[107]。可以看出在垂直方向上测量时, 测量得到的气溶胶消光系数随高度分布具有层状结构, 随着高度的增加, 气溶胶消光系数呈现递减的趋势。在水平方向扫描时, 测量得到的气溶胶分布具有一定的均匀性, 消光系数随距离变化不明显, 随时间呈现一定的变化。气溶胶消光系数的变化与当时天气状况密切相关, 天气活动活

跃时气溶胶分布变化也相对较快, 天气活动缓慢时, 气溶胶分布变化较慢^[68]。

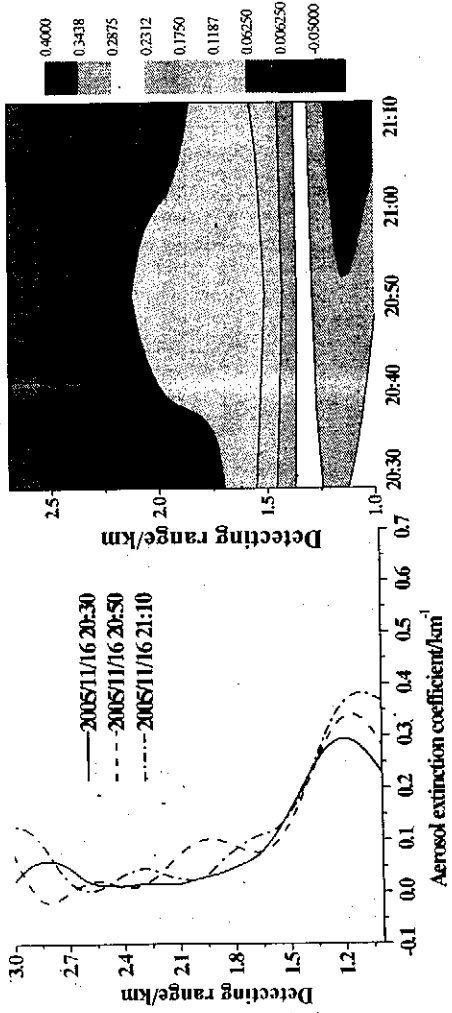


图 7.16 氮气分子反演垂直方向气溶胶消光系数以及时间演化图

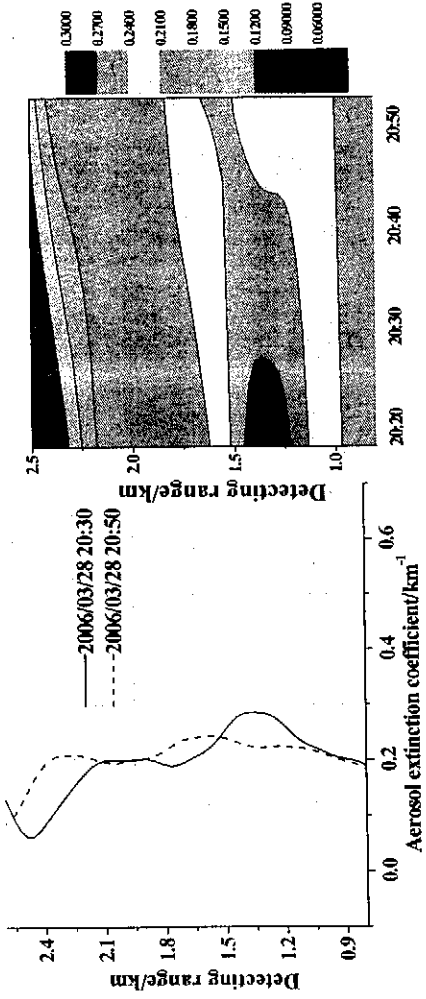


图 7.17 氮气分子反演水平方向气溶胶消光系数以及时间演化图

§7.5.3 氮气拉曼信号反演气溶胶消光系数不确定性

在 Raman 方法求解气溶胶消光系数时, 其不确定性因素包括 Raman 回波信号噪声、气溶胶消光波长指数及分子密度和消光系数的不确定性等。若只考虑 Raman 回波信号的随机起伏和噪声, 则气溶胶消光系数的不确定性可表示为:

$$\delta\alpha_p(z) = \sqrt{\left[\frac{\delta P(z)}{P(z)}\right]^2 + \left[\frac{\delta P(z+\Delta z)}{P(z+\Delta z)}\right]^2} \quad (7.20)$$

氮气拉曼回波信号的不确定度由图 7.13 所示, 可以看出在 2km 距离处, 氮气拉曼散射信号不确定度小于 5%。拉曼激光雷达采用距离分辨率为 30 米, 脉冲累计次数为 30000 次。在用 Raman 方法求解气溶胶消光系数时, 可以进行直接微分(differential)或者用最小二乘法线性性(linear fit)及多项式拟合(polynominal fit)处理项。它们的结果基本一致, 相差很小^[105]。这表明方程(7.20)的解对上述算法

并不敏感,故我们在数据处理中采用了直接微分法。

在用Raman方法方程(7.20)求解气溶胶消光系数时,对气溶胶消光波长指数 ν 往往取经验常数,但它可能与实际值存在差异,因此会带来一定的不确定性。分子的消光和密度取气象探空实测数据时较好,但是许多激光雷达站无实时探空资料,故常取大气模式,这样它会因与实际大气不同而对计算气溶胶消光系数带来差别。另外, Raman散射回波强度通常较弱,其信号的统计起伏及背景噪声会带来统计误差。当波长指数 ν 偏大时,气溶胶消光系数值也偏大。当 ν 分别取1和0.3时,用它们得到的气溶胶消光系数的相对差别小于2.8%。由此看来,气溶胶消光波长指数 ν 大小不确定性带来的影响并不大^[105]。

当采用不同模式的分子数密度和消光系数进行反演气溶胶消光数据时,得到的气溶胶消光数据具有一定的差别,当用冬季分子模式时,它与用探空分子数据计算的气溶胶消光系数的相对差别在2km以上基本上小于10%。由于该模式分子消光系数偏大,故用它计算出的气溶胶消光系数偏小。而用夏季分子模式时,气溶胶消光系数的差别在大部分高度上小于5%,可见,当分子模式与实际大气相差较大时,会给气溶胶消光系数计算带来较大影响。

§7.5.4 数据处理编程

采用Visual Basic 6.0计算机预言对数据处理程序进行编程,其中大气分子数密度和大气分子消光系数数据可以根据不同情况选择输入,气溶胶波长指数可以在0~3之间任意设定,该软件具有数据显示保存功能,能够实现氮气球拉曼信号反演气溶胶消光系数。

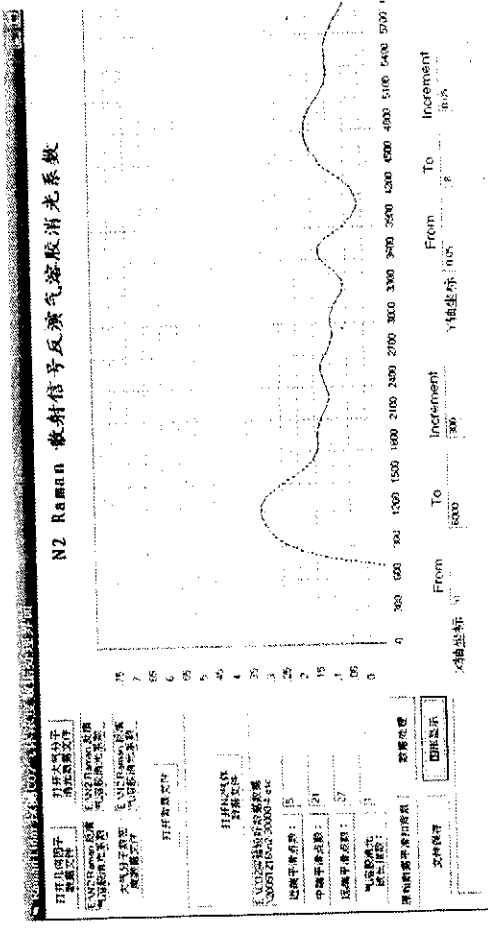


图 7.18 氮气分子反演气溶胶消光系数编程界面

第八章 车载拉曼激光雷达近地面水汽测量研究

§8.1 大气中水汽含量的不同参量描述

大气中的水汽含量很少, 占整个空气的体积比约为0.1~3%, 但是它却是大气中时空变化最活跃的成分, 随着温度、气压的不同有显著的变化。

§8.1.1 大气湿度的参量描述

表示大气中水汽含量多少的物理量称为大气湿度或简称湿度。下面介绍几种主要的湿度参量。

水汽压 (e): 表示大气中的水汽分压强, 即大气中水汽所产生的那一部分压力, 它是大气压力的一部分, 常用单位为hPa。

饱和水汽压 (E): 一定温度条件下, 当空气中的水汽含量达到饱和状态时, 称为饱和空气。饱和空气中的水汽压叫做饱和水汽压, 常用单位为hPa。当空气中水汽含量超过饱和水汽压时, 且存在可湿性表面或微小的核心物质以使水汽分子能碰撞合并时, 水汽就开始发生凝结。饱和水汽压 E 分为纯水平液面饱和水汽压 E_w 和纯水平冰面饱和水汽压 E_i 。

饱和水汽压是温度的函数, 通常采用经验公式计算饱和水汽压, 例如 Goff-Grattch 饱和水汽压公式, 从1947年起, 世界气象组织就推荐使用 Goff-Grattch 水汽压方程。该方程是以后多年世界公认的最准确的公式。

对于水平面上的饱和水汽压可表示为:

$$\begin{aligned} \log E_w = & 10.79574 \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) - 5.02800 \log \left(\frac{T}{T_0}\right) + 1.50475 \times 10^{-4} \left[1 - 10^{-8.2969 \left(\frac{T}{T_0} - 1\right)}\right] \\ & + 0.42873 \times 10^{-3} \left[10^{\frac{4.76955 \left(1 - \frac{T_0}{T}\right)}{T}}\right] + 0.78614 \end{aligned} \quad (8.1)$$

上式为1966年世界气象组织发布的国际气象用表所采用。其中 $T_0 = 273.16\text{K}$, 为水的三相点温度。Michell Instruments Ltd中使用的饱和水汽压计算公式具有两种形式, 简化公式如下 (饱和水汽压的单位: Pa)

$$\text{在水面上: } \ln e_w(t) = \ln 611.2 + \frac{17.62t}{243.12 + t} \quad (8.2)$$

其中温度范围是: $-45^{\circ}\text{C} \sim +60^{\circ}\text{C}$; 不确定度小于 $\pm 0.6\%$; 置信空间在 95%。图 8.1 给出了 Goff-Grattch 公式和 Michell Instruments Ltd 两种模式情况下的饱和水汽压随温度变化关系, 可以看出二者的差别非常小, 且随温度升高饱和水汽压也随之增大。

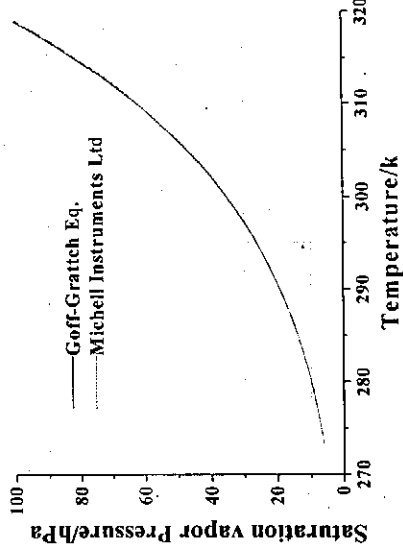


图 8.1 模拟计算的饱和水汽压随温度变化

绝对湿度 (a_h): 表示单位体积湿空气中含有的水汽质量, 即水汽密度, 单位为 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 或 $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。它表征了空气中水汽的绝对含量, 空气中水汽含量愈多,

绝对湿度愈大。水汽压 e 与绝对湿度 a_h 之间有关系式 $a_h = \frac{M_{H_2O} e}{R^* T}$, 式中 $M_{H_2O} =$

18 表示水汽分子量, 将水汽分子量和通用气体常数 R^* 的数值代入可得到:

$$a_h (\text{g} / \text{m}^3) = 217 \frac{e(\text{hPa})}{T(\text{K})} \quad (8.3)$$

相对湿度 (f): 表示空气中实际水汽压 e 与同温度下饱和水汽压 E 之比值 (用

百分数表示) 称为相对湿度, 即: $f = \frac{e(\text{hPa})}{E(\text{hPa})} \times 100\%$, 相对湿度的大小表示空气

湿度饱和的程度。

水汽混合比 (w): 包含在同一体积内的水汽质量 m_w 与干空气质量 m_d 之比,

即 $w = \frac{m_w}{m_d}$, 称为水汽混合比, 单位为 g / kg 。水汽混合比 w 与水汽压 e 和气压 P 之

间有关系式: $w(\text{g} / \text{kg}) = 622 \frac{e(\text{hPa})}{(P - e)(\text{hPa})}$ 。

饱和差 (d): 在某一温度下, 空气的饱和水汽压与实际水汽压之差称为饱和差, 即 $d = E - e$, 饱和差单位为 hPa , 它直接表示了实际空气距离饱和的程度, 与水面蒸发能力密切相关, 是水面蒸发计算中常用的湿度参量。

露点 (t_d): 当空气中水汽含量不变且气压一定时, 若气温不断降低则空气

将逐渐接近饱和,当气温降低致使空气刚好达到饱和时的温度称为露点温度,简称露点,其单位与气温相同。显然,实际空气的水汽压 $e(t)$ 等于其露点温度时的饱和水汽压 $E(t_d)$ 。在气压一定时,露点的高低仅与空气中的水汽含量有关,水汽含量愈多,露点温度愈高,故而可以用露点温度表示空气的湿度。空气实际温度和露点温度之差 $(t-t_d)$ 称为温度露点差。温度露点差也是描述空气距离饱和程度的参量,在饱和空气中 $t-t_d=0$,在未饱和空气中 $t-t_d>0$,温度露点差越大即相对湿度愈小,反之相对湿度愈大。

§ 8.2 测量水汽含量常用方法

水汽含量测量的方法比较多,比较常用的方法有如下几种:

1. 无线电探空仪

无线电探空仪是一种气象遥测仪器,它可以将感应的气象要素值转变为无线电信号,不断地向地面发送。地面的接收设备将信号收录、处理,从而取得温、压、湿垂直分布的探测结果。目前,五九型转筒式电码探空仪(GZZ₂型探空仪)是常用的一种探空仪。该探空仪使用的湿度感应器是鼓膜状肠衣,其中心固定有连杆,连杆与传力架焊接并与扭力弹簧连接,使肠衣处于绷紧状态。当大气中的湿度变化时,肠衣的形变使固定在传力架上的指针移动位置。电码筒相当于一个刻度盘,用来表示温、压、湿指针的位置,同时又是一个转换器,能把指针位置转换为探空电码,由发射机变成电波发出。当码筒转动发出一组温、压、湿信号后,扇形接触片就与参考信号簧片接触,发出一长声的参考信号,按照温、压、湿参考信号的顺序,可以辨别出各要素的电码。

五九型探空仪使用的肠衣测湿元件性质不稳定,相对湿度的平均偏差可达±5%。由于肠衣的滞后系数随温度降低而加大,在低温时测湿误差很大,在-30℃以下几乎很难使用。另外,无线电探空仪进行垂直探测时,由于风的作用,探空仪并不在测站上空垂直上升,到达高空时,水平飘移可达数十至上百公里。这样测量结果与测站上空垂直方向上的湿度数值有一定的差别。现在有的探空仪的测湿元件采用碳湿敏片,由于生产技术等原因,碳湿敏元件的稳定性差别较大,在高湿到低湿,或从低湿到高湿的变化中,因灵敏度下降而无法测出湿度变化量。

2. 太阳光谱辐射计

太阳光谱辐射计是用来测量太阳直接辐射光谱特性的仪器。它测量不同波长的太阳直接辐射随太阳高度角的变化。水汽在近红外有一系列的吸收带,太阳辐射通过大气层,除受到分子的Rayleigh散射及气溶胶消光而削弱外,在水汽吸收带内还受到水汽的吸收而衰减。假设两个波长,一个在水汽的吸收带内(工作波长),另一个在吸收带外(参考波长),且两个波长足够靠近。利用在地面测得这两个波长的直接辐射比值和大气外界的这两个波长的直接辐射比值,就可以获得水汽吸收引起的辐射衰减,进而获得大气中水汽的总量,也称大气可降水量。

目前,在太阳光谱辐射计中一般采用水汽的 $0.94\mu\text{m}$ 吸收波长作为工作波长^[91],以 $0.88\mu\text{m}$ 作为参考波长。太阳光谱辐射计在这两个波长输出电压的比值可表示如下^[92]:

$$\frac{V(0.94, t)}{V(0.88, t)} = \frac{V_0(0.94)}{V_0(0.88)} \exp\{-K[w(t)m(t)]^z\} \quad (8.4)$$

式中 $V(0.94, t)$ 和 $V(0.88, t)$ 为地面上太阳光谱辐射计在 t 时刻这两个波长的测量值, $V_0(0.94)$ 和 $V_0(0.88)$ 为与大气层顶的辐射强度对应的太阳光谱辐射计读数, K 为水汽平均吸收系数, z 为指数项, $m(t)$ 和 $w(t)$ 分别为 t 时刻的大气相对质量和大气可降水量。大气可降水量可以表示为:

$$W(t) = \left(\frac{1}{m(t)}\right) \cdot \left\{ \left(\frac{1}{K}\right) \left[\ln \frac{V_0(0.94)}{V_0(0.88)} - \ln \frac{V(0.94, t)}{V(0.88, t)} \right] \right\}^{1/z} \quad (8.5)$$

上式中的 $m(t)$ 从测量的时间计算获得, $V_0(0.94)/V_0(0.88)$ 可以通过太阳光谱辐射计的标定得到, K 和 z 可通过模式式水汽平均透过率和可降水量之间的关系获得。太阳光谱辐射计虽然可以测量大气可降水量的瞬时值,但它不可能得到大气中水汽的垂直分布廓线。

3. 微波辐射计

微波辐射计是微波遥感的接收装置,它利用天线来接收天空一定频率的微波辐射,根据接收到的微波辐射能量得到天空的亮温 T_b 。水汽在波长 $\lambda = 1.35\text{cm}$ (频率 $\nu = 22.35\text{GHz}$)的辐射和大气的蒸汽含量成正比,将微波辐射计进行扫角观测,仰角 θ 由 0° 到 90° 之间变化,就可以观测到大气的亮温 $T_b(\theta)$,因此可以测得水汽随高度分布的廓线。根据辐射传输方程有:

$$T_h(\theta, \nu) = T_{h_0}(\theta, \nu) \exp\left(-\int_0^\infty \alpha \sec \theta dz\right) + \int_0^\infty T(z) \alpha \sec \theta \exp\left(-\int_z^\infty \alpha \sec \theta dz\right) dz \quad (8.6)$$

将上式分部积分后得到:

$$T_h(\theta, \nu) = T_0 + \int_0^\infty \left(\frac{\partial T}{\partial z}\right) \exp\left(-\int_z^\infty \alpha \sec \theta dz\right) dz \quad (8.7)$$

其中 T_0 是地面温度, α 是吸收系数, 在 $\lambda = 1.35\text{cm}$ 波段, 氧吸收系数远小于水汽吸收系数, 可以忽略不计。水汽的吸收系数 α 是水汽密度的函数, $\alpha_{H_2O} = Aq$, A 是温、压、频率的函数, 它可以通过计算得到; q 为比湿。在大气温度层结已知的情况下, 通过一系列微波辐射计亮温 $T_b(\theta, \nu)$ 的观测值, 可将右方吸收系数中比湿随亮温分布反演出来。

当 5mm 和 1.35cm 两频率微波辐射计同时观测时, 可以通过温度、湿度相互迭代反演出大气湿度及温度层结。通过这种方法获得的比湿, 在 $1000\text{--}700\text{hPa}$ 之内, 误差约为 17% , 在 500hPa 以下误差要大一些。

美国 NASA 的 J03 微波辐射计 (WVR) 系统^[93] 用于水汽吸收线中心 22.235GHz 附近的三种频率 20.7GHz 、 22.7GHz 和 31.4GHz 。频率在 22.7GHz 的测量得到的水汽含量比 20.7GHz 和 31.4GHz 两种频率高出 7% 左右。

4. 卫星遥感大气湿度层结和总含水量

目前, 人造卫星的气象遥感已成为气象观测的重要组成部分, 并投入业务使用。气象卫星使用可见光、红外及微波波段进行气象参数的遥感探测。为了能得到全球的图象, 遥感仪器已逐渐发展为扫描成像观测。卫星遥感大气中水汽的含量, 在红外波段常用 $6.3\mu\text{m}$ 或 $18\text{--}23\mu\text{m}$ 的水汽吸收带, 在微波波段常用 $1.35\mu\text{m}$ 水汽吸收带。在红外波段, 卫星上接收到的辐射能量为:

$$I_\nu(z \rightarrow \infty) d\nu = - \int_0^\infty \left(\frac{\partial B_\nu(T)}{\partial z}\right) \exp\left(-\int_z^\infty \alpha \sec \theta dz\right) dz \quad (8.8)$$

在微波波段, 用亮温表示卫星接收到的辐射能量:

$$T_h(\theta, \nu) = (x-1)T_0(\theta, \nu) \exp\left(-\int_0^\infty \alpha \sec \theta dz\right) - \int_0^\infty \left(\frac{\partial T}{\partial z}\right) \exp\left(-\int_z^\infty \alpha \sec \theta dz\right) dz \quad (8.9)$$

$I_\nu d\nu$ 是 ν 与 $\nu + d\nu$ 之间的辐射强度, $B_\nu(T)$ 是 Planck 函数。 α 为水汽吸收系数。

x 为地面辐射率 (在红外波段, $x=1$), θ 是天顶角。

在红外和微波波段的水汽吸收带中, 水汽的吸收系数 α_{H_2O} 正比于比湿 q , 因

此根据上两式左方一系列辐射能量（或亮温）值，可将右方吸收系数中的比湿 q 反演出来。然而，由于水汽变化量大，积分方程对于水汽分布的反应不灵敏，因此反演湿度的误差比较大。

我国风云二号静止卫星上安装的核心遥感探测仪器就是具有可见光、红外和水汽光谱特性的三通道扫描辐射计（VISSR），它可以获得白天可见光云图、昼夜红外云图和水汽分布图。

5、GPS系统监测水汽含量分布

GPS是Global Positioning System的简称，即全球卫星定位系统。GPS是由美国国防部开发的星基无线电导航系统，能全天候提供三维位置、速度和时间参数。GPS系统测量水汽含量的原理与方法如下：可当GPS信号穿越对流层大气时，会受其影响而产生信号延迟，与大气参数有关的折射率也将发生变化。由于信号延迟和大气参数之间具有很好的相关性，因而可用GPS技术以遥感的方式来探测大气参数，研究对流层大气。近年来由于GPS软、硬件技术的飞速发展，GPS精密测量的精度越来越高，从而可求得较为精确的对流层延迟值，进而算出较为精确的大气垂直积分水汽含量(IWV, Integrated Water Vapor)^[94-97]。

由于存在着源于卫星钟、卫星轨道、接收机钟和载波相位观测等方面的误差，在观测方案和解算模型建立过程中它们必须予以考虑。比较简单的非差载波相位的观测方程表示如下：

$$\tilde{\rho} = \rho + \delta\rho_{ion} + \delta\rho_{trop} + c \cdot \delta\delta_{IR} - c \cdot \delta\delta_{ts} - \lambda \cdot N_0 \quad (8.10)$$

其中 c 为光速， λ 为载波信号波长， $\tilde{\rho}$ 为接收机载波相位观测量， ρ 为卫星至接收机的实际距离， $\delta\rho_{ion}$ 为电离层延迟， $\delta\rho_{trop}$ 为电离层延迟的影响在精密测量时采用双频技术消除。利用电离层延迟与频率的平方成反比的简单关系，消除后的精度达毫米级。 $\delta\rho_{trop}$ 为对流层延迟，对流层延迟作为遥感大气的未知量来求解，其误差由其他几项的误差来确定。求解以后划分为静力延迟和湿项延迟两项。 $\delta\delta_{IR}$ 为接收机钟差， $\delta\delta_{ts}$ 为卫星钟差， N_0 为载波相位的整周未知数。

如果建立了利用双频接收机观测来消除电离层误差、基线测量双差分消除接收机钟差和卫星钟差的观测方案，并考虑了星历问题的解决办法，解决了“整周变

跳”和整周未知数的求解问题,就可以建立精确定位和大气层中性延迟的求解模型^[98]。任意观测角度的中性延迟 $\delta\rho_{\text{rep}}$ 解出后,可通过变换函数映射到中性天顶延迟 Z_n 。变换函数 $m(\theta)$ (θ 为卫星对接收机仰角)描述了天顶与任一角度大约 $\csc(\theta)$

的关系,并包含了曲线因折射而弯曲以及地球的球形订正过程。并且在 $\theta > 15^\circ$ 的情况下,湿项和静力变换函数差异很小,可以用同一个形式来描述。从中性天顶延迟中减去静力天顶延迟项 z_h 而得到湿项天顶延迟 z_w ,其数值大约为 $0 \sim 40\text{cm}$,进而采用以下关系式获得水汽总量(PW)^[99]:

$$PW = \prod \cdot Z_w \quad (8.11)$$

PW定义为气柱内所有水汽折算为液态水时的水柱高,代表水汽的积分总量。常数比例 $\prod$ 大约为0.15,即1cm的PW可引起大约6.5cm的信号延迟。精确的形式和参数可通过地面气温的观测和历史资料的统计而建立:

$$\prod = 10^6 [R_v (\frac{k_3}{T_m} + k'_2)]^{-1} \quad (8.12)$$

$R_v = 461.495\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$, 为水汽的气体常数。 $k'_2 = k_2 - m \cdot k_1$, m 为水汽和干空气的分子量比, k_1 , k_2 , k_3 源于大气折射率 N 的表达式:

$$N = k_1 \cdot (\frac{P_d}{T}) + k_2 \cdot (\frac{P_v}{T}) + k_3 \cdot (\frac{P}{T^2}) \quad (8.13)$$

P_d 和 P_v 分别为干空气和水汽的分压, T 为绝对温度。 T_m 为一个加权平均温度,按下定义: $T_m = \int (P_v/T) dz / \int (P_v/T^2) dz$, 积分沿着整个大气垂直路径。参数 T_m 虽然随季节和地区变化,但可通过地面温度 T_s 的观测来估算: $T_m = a + b \cdot T_s$, 或由数值天气预报提供,其精度较高。

6. 差分吸收激光雷达(DIAL)探测水汽垂直分布

差分吸收(DIAL)激光雷达使用两个激光波长同时进行测量,其中一个位于气体的吸收线内(λ_{on}), 另一个位于吸收线翼上(λ_{off})。将所得的信号进行比较,把所考虑的气体的吸收从大气其它消光成分中区分出来,这样就可以获得该气体的浓度。

由差分吸收(DIAL)激光雷达方程,可计算出被探测气体浓度 $n(z)$ 的表达式:

$$n(z) = \left(\frac{-1}{2\Delta\sigma} \right) \frac{d}{dz} \ln \frac{P(\lambda_{on}, z)}{P(\lambda_{off}, z)} - \left(\frac{1}{2\Delta\sigma} \right) \frac{d}{dz} \ln \frac{\beta(\lambda_{on}, z)}{\beta(\lambda_{off}, z)} - \frac{1}{\Delta\sigma} [\alpha(\lambda_{on}, z) - \alpha(\lambda_{off}, z)] \quad (8.14)$$

式中, $\Delta\sigma$ 吸收截面差, $P(\lambda_x, z)$ 表示波长为 λ_x 高度为 z 处的大气回波信号强度,

$\beta(\lambda_x, z)$ 表示波长为 λ_x 高度为 z 处的大气后向散射系数, $\alpha(\lambda_x, z)$ 表示波长为 λ_x 高度为 z 处除被探测气体外的大气消光系数。

$$\beta(\lambda_x, z) = \beta_A(\lambda_x, z) + \beta_M(\lambda_x, z) \quad \alpha(\lambda_x, z) = \alpha_A(\lambda_x, z) + \alpha_M(\lambda_x, z) \quad (8.15)$$

下标A和M分别表示气溶胶和分子参量, 下标x表示on和off参量。

由于水汽在可见及近红外区有许多分立吸收线, 这为利用差分吸收激光雷达技术提供了基本条件。但是由于这些分立吸收线线宽较窄, 造成了较大的水汽探测误差。这些误差主要^[100]为:

- (1) 水汽吸收截面随温度变化所产生的误差。
- (2) 水汽吸收线的中心频率随温度变化所产生的误差。
- (3) 激光大气分子相互作用而产生的多普勒展宽对有效吸收截面的影响。

7. 拉曼 (Raman) 激光雷达

拉曼 (Raman) 激光雷达作为探测大气中水汽含量垂直分布的一种重要手段, 在近十几年来已得到了广泛的应用^[42,45,46,48]。它根据Raman散射频移只取决于散射分子的成分, 而与入射光波长无关的特点, 由Raman散射回波强度的大小确定大气中水汽的浓度。

六十年代末到七十年代初, Melf等人^[45]使用Q开关红宝石激光器的倍频光束(波长347.2nm, 输出能量40mJ)和一台直径为40cm的牛顿式接收望远镜, 观测了大气中水汽和氮气的Raman后向散射信号, 获得了地面至3km的水汽混合比垂直廓线。随后, Cooney使用了一台倍频Q开关红宝石激光器和一台直径为75cm的接收望远镜, 探测了大气绝对湿度的垂直分布。美国NASA Goddard空间飞行中心(Space flight center)的SRL (Scanning Raman Lidar)激光雷达^[42]始建于1990年初, 该激光雷达具有直径为0.76m, 相对孔径为f/4.8的Dall-Kirkham望远镜系统, 激光器采用XeF, 激光波长为351nm, 重复频率为400HZ, 功率为24W。该激光雷达接收系统能够同时接收主激光波长、水汽、氮气和氧气的一级Stokes Raman波长等四个波长的回波信号, 水汽的探测在夜间进行。SRL激光雷达于1991年秋

季参加了SPECTRE/FIRE测量实验计划。

美国能源部(DOE/ARM)的Raman激光雷达CART^[10]于1995年建成。CART利用Nd:YAG激光器输出三倍频激光355nm作为激发波长,重复频率为30Hz,单脉冲能量为400mJ,接收望远镜口径为0.61m。它同时接收三个波长(主激光波长、水汽Raman波长和氮气Raman波长)。

§ 8.3 探测近地面水汽测量车载拉曼激光雷达研制

§8.3.1 近地面水汽测量意义

水汽及其变化是天气和气候的主要驱动力,是预测降雨、中小尺度恶劣天气以及全球气候变化的一个非常重要的物理量。由水面蒸发而来的水分,经垂直气流输送到大气,在大气中又凝结形成云,再经云中微物理过程形成降水。这种水分在地球—大气系统中的周转称为水分循环。虽然水汽仅占全球总水量的0.001%,但是在水分循环中,水汽却扮演了一个十分重要的角色,它使大陆和海洋之间实现了水分交换。水汽的分布极不均匀、时空变化很大,是大气成分中变化最大的一种成份。由于影响水汽含量和分布的因素较多,加之目前探测技术的局限性,测定大气湿度(包括水汽和云)仍是一个难题,观测资料的实时性、充足性较差。因此,水汽也是人们认识得不够充分的大气成分之一。如何在现有技术条件下更精确、更及时地确定大气中的水汽含量,是当今大气科学所面临一项重要任务。

另外,水汽在0.7 μm 、0.8 μm 、0.94 μm 、1.1 μm 、1.38 μm 、1.87 μm 、2.7 μm 和3.2 μm 附近均有吸收带,它能吸收相当一部分太阳辐射能,从而使它成为平衡整个地气系统辐射收支的重要因素。同时水汽对于激光在大气中传输也起了不可忽视的作用。

AML-2车载激光测污雷达是在国家863计划和中科院奥运科技攻关项目共同支持下研制完成的国内首台测污激光雷达,该雷达能够对大气气溶胶消光系数、臭氧、二氧化硫和二氧化氮等污染物含量进行三维扫描监测,其中臭氧、二氧化氮和二氧化氮是利用差分吸收原理进行测量,三种污染物的差分吸收波长由激光器的二倍频光和三倍频光泵浦充有不同气体的拉曼进行拉曼激发获得^[68]。车载测污激光雷达研制完成后,先后在北京、广州和深圳等地进行了多次野外实验,

取得了令人满意的实验结果,同时也验证了该激光雷达具有相当高的稳定性。为了扩展车载测污激光雷达的探测功能,我们开展了车载测污激光雷达水汽测量的研究,同时结合该激光雷达具有三维扫描的功能,提出一种新的适用于水汽测量的拉曼激光雷达的简便定标方法,该雷达系统的研制以及定标方法的具体操作在后面的章节中详细论述。

§8.3.2 拉曼激光雷达进行水汽测量基本原理

Raman激光雷达是根据水汽分子对激光产生的Raman散射原理来实现探测大气中水汽含量的目的。从接收不同高度上水汽分子和氮气分子Raman后向散射光的回波信号中可以获取水汽混合比的垂直廓线。拉曼激光雷达测量水汽的原理与前面提到的拉曼方法测量大气二氧化碳含量类似,因此可以参考探测大气二氧化碳拉曼激光雷达方程得出探测水汽拉曼激光雷达方程。基于拉曼散射原理研制的拉曼散射激光雷达探测距离为 z 处的水汽回波方程可表示为:

$$S_{H_2O}(z) = \frac{k}{z^2} \sigma_{H_2O}(\pi) n_{H_2O}(z) q(\lambda_0, z_0, z) q(\lambda_{H_2O}, z_0, z) \quad q = \exp\left[-\int_{z_0}^z \alpha_{H_2O}(z') dz'\right] \quad (8.16)$$

式中 $S_{H_2O}(z)$ 是探测到的水汽通道回波信号强度, $\sigma_{H_2O}(\pi)$ 表示水汽分子的后向散射微分截面, 单位为厘米²/球面度。 $n_{H_2O}(z)$ 表示水汽分子的数密度, 单位为分子数/厘米³。 k_{H_2O} 为水汽通道的通道常数, 它包括在水汽分子拉曼散射波段处系统的光学效率、望远镜的有效截面、光电倍增管的光谱效率以及激光输出能量的乘积。 $q(\lambda_{H_2O}, z_0, z)$ 表示水汽分子拉曼散射光波经历探测距离 $z_0 \sim z$ 后的大气透过程率。 $q(\lambda_0, z_0, z)$ 表示入射光波经历探测距离 $z_0 \sim z$ 后的大气透过程率。 $\alpha_{H_2O}(z')$ 为在水汽散射波长处大气消光系数。

同时考虑到拉曼雷达散射的特点, 可以选择大气中含量较为稳定的氮气作为探测水汽含量的参考气体, 基于拉曼散射原理研制的拉曼散射激光雷达探测距离为 z 处的水汽回波方程可表示为:

$$S_{N_2}(z) = \frac{k_{N_2}}{z^2} \sigma_{N_2}(\pi) n_{N_2}(z) q(\lambda_0, z_0, z) q(\lambda_{N_2}, z_0, z) \quad q = \exp\left[-\int_{z_0}^z \alpha_{N_2}(z') dz'\right] \quad (8.17)$$

各物理量表示的物理意义与式(8.16)类似。将(8.16)和(8.17)相比后得到:

$$w(z) = C_w Dq''(z_0, z) \frac{S_{H_2O}(z)}{S_{N_2}(z)} \quad (8.18)$$

其中 $C_w = \frac{k_{N_2}}{k_{H_2O}} \frac{\sigma_{N_2}(\pi)}{\sigma_{H_2O}(\pi)} \frac{M_{H_2O}}{M_{dry}} \frac{n_{N_2}}{n_{dry}}$, $Dq''(z_0, z) = \frac{q(\lambda_{N_2}, z_0, z)}{q(\lambda_{H_2O}, z_0, z)}$, 一般地将 C_w 称之为雷达

系统常数, 该常数常常采用与其它仪器对比后定标得出其准确结果。 M_{H_2O} 表示水汽分子的分子量, M_{dry} 表示干空气的分子量。 $Dq''(z_0, z)$ 为氮气分子和水汽分子两拉曼散射波长的大气透过率差别, 在数据处理过程中, 当两波长相近时可以忽略透过率差别的影响, 对其它物质的测量需要重新考虑大气透过率差别是否会对反演结果造成重大影响。

§8.3.3 拉曼激光雷达激发波长选择

车载测污激光雷达采用法国Quantel公司生产的Brilliant B型Nd:YAG工业用激光器, 该激光器输出波长为1064nm的基频光, 经二倍频晶体倍频后输出波长为532nm波长激光, 532nm波长激光用于大气气溶胶消光系数测量。同时车载雷达配有三倍频和四倍频晶体, 经二块晶体倍频后输出波长354.7nm和266nm波长的激光, 两个波长的激光对充有不同气体的拉曼管进行拉曼激发获得相应的拉曼激发波长, 作为测量臭氧、二氧化硫和二氧化氮的差分吸收波长。因此从理论上讲, 可以选用532nm、354.7nm和266nm三个波长激光作为探测水汽拉曼激光雷达的激发波长。下面对三个波长激光作为激发波长的利弊作简单分析。

在532nm(λ_p)激发下, 水汽分子的 Raman 频移波数表 3651.7 厘米⁻¹, 相应的水汽拉曼散射波长为 660.3nm; 在 354.7nm(λ_p)激发下, 相应的拉曼散射波长为 407.8nm, 在 266nm(λ_p)激发下, 相应的拉曼散射波长为 294.6nm。拉曼散射微分截面大小与激发波长具有如下关系: $\beta_r^0 \propto \lambda^{-4}$, 因此相应的拉曼散射截面大小之比近似为: $(\frac{532}{266})^4 : (\frac{532}{354.7})^4 : 1 \approx 16:5:1$, 从散射截面大小方面来看, 选择 266nm 激光作为散射波长更有利于水汽拉曼信号的采集, 但是考虑到激光器经四倍频后, 能量损失比较大, 况且考虑到大气中臭氧在此波段具有较强的吸收, 导致探测距离急剧下降, 因此如果选用 266nm 作为激发光源, 需要在数据处理过程中考虑臭氧的吸收影响^[102]。拉曼激光雷达系统中选用的光电倍增管为英国产

Electron tubes 9214B 型光电倍增管, 其探测响应曲线如图 8.2 所示, 可以看出如果选择 532nm 作为激发波长, 则在水汽拉曼散射波段 (660nm) 光电倍增管的量子效率较低, 不利于水汽拉曼信号的有效采集, 同时如果选用 266nm 波长作为激发光源, 则在水汽拉曼散射波段 (294.6nm) 光电倍增管的量子效率也较低, 如若选择 354.7nm 波长激光作为激发光, 则在水汽拉曼散射波段 (407.4nm) 则具有 30% 左右的量子效率, 能够实现水汽拉曼信号的有效采集。

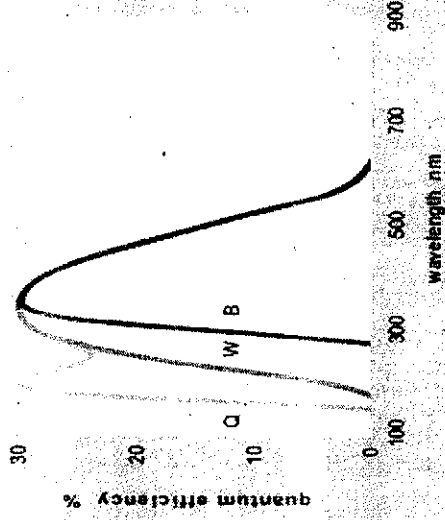


图 8.2 9214B、9214QB PMT 响应曲线

综合考虑激光器发射能量以及散射截面和探测器量子响应等因素可以对探测水汽拉曼散射波长进行确定。以 Brilliant 型激光器为例, 三个波长的能量比为: $E_{266}:E_{354.7}:E_{532} = 30:70:160 = 3:7:16$, 在相应的水汽拉曼散射激发波段为: $q_{294.6}:q_{407.6}:q_{660} = 5\%:28\%:1\%$, 将三个 9214B 型光电倍增管的量子效率之比为: $Q_{294.6}:Q_{407.6}:Q_{660} =$ 因素综合考虑后, 三个波长探测水汽拉曼信号效率之比为: $Q_{294.6}:Q_{407.6}:Q_{660} = 240:980:16$, 因此我们选择用激光器的三倍频光 354.7nm 作为激发波长, 利用 9214B 型光电倍增管进行水汽拉曼散射信号采集。

§8.3.4 水汽拉曼信号滤光片的参数设定

Raman 激光雷达中使用的干涉滤光片是一关键光学元件, 其性能指标的确定主要有以下两点考虑:

(1) 水汽分子和氮气分子的 Raman 后向散射截面比 Rayleigh 后向散射截面小 3 个数量级左右, 相应的 Raman 回波强度就比 Rayleigh-Mie 散射的回波强度约小 3~4 个量级。因此, 用于接收两个 Raman 后向散射光的干涉滤光片必须对激光波长 355nm 具有很高的截止率, 一般应为 10^{-10} ~ 10^{-12} , 以保证波长为 355nm 的 Rayleigh-Mie 后向散射光完全被干涉滤光片截止而不能进入光电倍增管。

(2) 由于一个确定波长的 Raman 后向散射截面是随着温度的变化而变化的, 在水汽分子的振动 Raman 光谱中起主要贡献的是 Q 支, 其 Raman 频移范围从

3630cm^{-1} 到 3658cm^{-1} , 中心频移约为 3654cm^{-1} 。在 3650cm^{-1} 以上的Raman光谱带,

Q支强度随着温度的增加而减小, 在 3650cm^{-1} 以下的Raman光谱带, Q支强度随着温度的增加而增加。但是对于整个Q、S、O支Raman光谱积分散射截面来说, 受温度的影响较小。带宽为 $4\sim 5\text{nm}$ 的干涉滤光片能够覆盖整个Q、S、O支光谱, 则探测的结果将对温度的变化不灵敏。同时对于具有这样带宽的干涉滤光片, 其中心波长随温度的漂移也可忽略不计。故干涉滤光片带宽确定为 4.7nm 左右。

该Raman激光雷达系统使用的干涉滤光片是从美国Barr Associates公司订购的, 它们所具有的良好性能满足了探测需要。表8.1给出了它们的性能指标。图8.3给出了水汽Raman干涉滤光片的光谱透过率曲线。

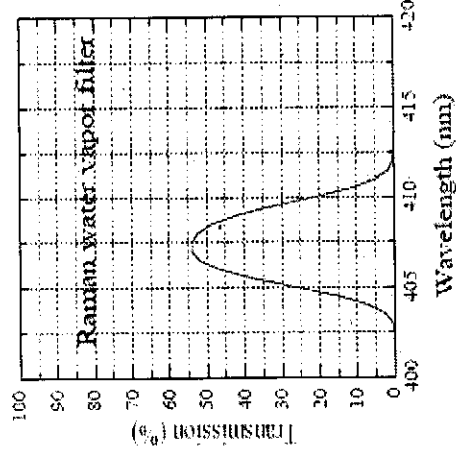


图8.3水汽Raman滤光片的光谱透过率

表8.1 氮气和水汽拉曼干涉滤光片性能参数

	氮气拉曼	水汽拉曼
中心波长(nm)	386.8 ± 0.1	407.8
带宽(FWHM)	2 nm	4.7 nm
峰值透过率 (%)	60	55
带外抑制比	OD>12 at 355 and 532nm OD>7 at 375 and 580nm	OD>12 at 355 and 532nm OD>7 at 386.7 and 607nm

§8.3.4 车载拉曼水汽激光雷达配置

AML-2 大气环境监测激光雷达是同轴激光雷达系统, 整体上由发射系统、方位和俯仰扫描系统、接收系统、控制系统四大部分组成。各部分简介如下^[68]:

1. 发射系统 AML-2 激光雷达的发射系统由激光光源、扩束器和导光镜组成。工作原理是激光光源发出的光束经扩束器扩束、准直后, 由导光镜、扫描镜导向大气。扩束器为6倍光学扩束, 出射光孔为50mm。
2. 方位和俯仰扫描系统 在激光发射和接收光路上装有扫描镜头, 安装在车子的顶部。扫描镜头能进行俯仰方向和水平方位上转动。在俯仰方向上可实现 $-5^\circ \sim 100^\circ$ 扫描, 在水平方位上可实现 $0^\circ \sim 360^\circ$ 扫描。因此, 原则上可以对天空半球上任何一个角度进行测量并可以进行三维扫描测量。扫描的角速度大于 $5^\circ/\text{秒}$ 。

3. 接收系统 接收系统主要由接收单元和数据采集单元组成。接收单元包括接收望远镜、小孔光阑、光纤、输出光准直器、滤光片等光学部件和光电倍增管、前置放大器电子学部件。接收望远镜是口径为 300mm 的近牛顿式接收望远镜,在焦平面上设置有不同直径的小孔光阑,该光阑起限制视场角的作用。光纤将信号导向准直器,变成平行光束,再由超窄带、高光谱透过率滤光片进行滤波。数据采集单元由数据采集卡和工控机等组成。

4. 控制系统 控制系统保证了激光发射、回波信号接收、数据采集、传送和存储的协调一致性。主波控制器由安装在激光器谐振腔输出端高反射镜后面的光电二极管和整形器组成。光电二极管将接收到的激光发射脉冲信号转换成电信号,经主波控制器整形后,根据设定的延时触发光电倍增管和 A/D 模数转换器,使之开始接收记录光电倍增管的回波信号。测量的回波信号输送到主控制计算机进行显示和处理。

车载拉曼水汽激光雷达的研制是在 AML-2 车载测污激光雷达的基础上进行的,系统搭建过程中要遵循两个原则:一是保持 AML-2 测污激光雷达原有的测量功能保持不变,即保证车载激光雷达能够实现气溶胶、臭氧、二氧化硫和二氧化氮等污染物的测量,增加水汽测量功能的同时要满足雷达原有测量污染物的功能。二是在实现水汽测量功能的同时尽量保持 AML-2 车载雷达各个硬件配置保持不变。在水汽拉曼激光雷达研制过程中考虑到水汽和氮气拉曼散射信号较弱,因此采用灵敏度更高的光子计数器进行弱信号的采集。

AML-2 车载测污激光雷达对二氧化氮污染物进行监测时所用的差分吸收波长是 354.7nm 波长激光对充有甲烷和氙气的拉曼管进行拉曼激发获得。354.7nm 波长激光能同时满足作为拉曼水汽测量时的激发波长,因此在实际操作过程中,将激光器三倍频光经导向镜导出进入光束发射系统,经扫描镜后进入到大气当中。车载水汽拉曼激光雷达是在 AML-2 车载测污激光雷达的基础上进行适当改进研制完成的,图 8.4 给出了水汽拉曼激光雷达的结构配置图。

水汽拉曼激光雷达与 AML-2 车载测污激光雷达在结构配置上有如下不同:

1、由于水汽拉曼激光雷达采用的单波长激发,因此在结构上比车载测污激光雷达简单一些,在采集过程中不需要拉曼管的激发以及切换,相应的只需要单一导向镜进行导光。

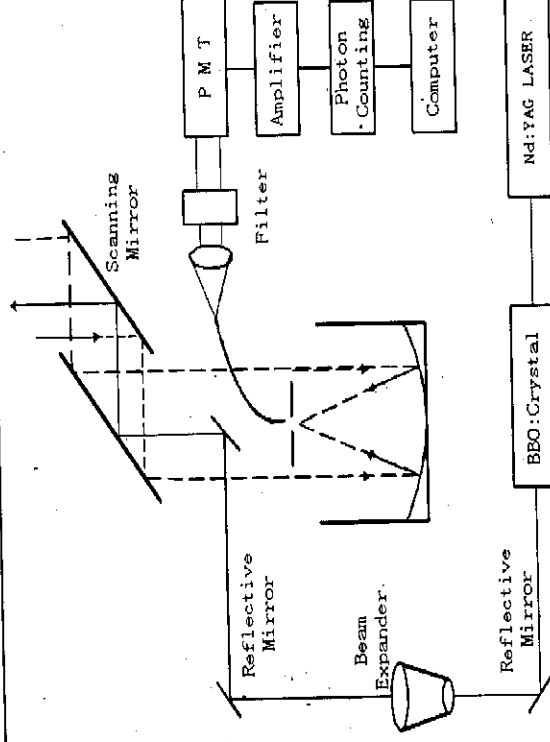


图 8.4 车载水汽拉曼激光雷达结构配置图

表 8.2 水汽拉曼激光雷达各个器件参数

单元名称	技术参数
激光发射单元	激光器型号
	Quantel Brillinat B Nd:YAG
	波长 (nm)
	354.7
	脉冲重复频率 (Hz)
	20
	单脉冲能量 (mJ)/稳定性 (%)
扫描单元	60±3
	激光发散角 (mrad)
	0.5
	脉冲宽度 (ns)
	4
接收光学单元	扩束镜倍率
	6X
	有效通光孔径 (mm)
	300
	扫描空间范围
耦合光纤	360° (水平) × 90° (垂直)
	望远镜型号
	近牛顿式
	直径/焦距 (mm)
	300/750
信号探测和采集单元	接收视场 (mrad)
	0.2~2
	直径 (mm)
	1.5
	数值孔径 N.A.
信号探测和采集单元	0.22
	透过率
	99.9%
	探测器型号
	9214B
	频谱响应 (nm)
	270—650
	响应面积 (mm)
	46
	PMT 增益
	9214B 7×10 ⁶
信号探测和采集单元	光子计数卡型号
	MCA-3 /P7882
	最大采样速率 (MHz)
前置放大器	200
	前置放大器
前置放大器	phillips 6954
	增益 20, 带宽 100kHz-1.5GHz

2、为了能够实现对氮气和水汽拉曼散射信号的有效采集，雷达系统中的接收系统由 AD 采集卡换成光子计数器，相应的光电倍增管由日本滨松公司产的紫外光电倍增管更换成英国产 Electron tube 公司的 9214B 型光电倍增管，放大器更换

为 Philips 6954 型。

3、水汽拉曼激光雷达控制系统也比较简单,由 DG535 时间信号发生器控制激光光器与光子计数器同步采集。表 8.2 给出了水汽拉曼激光雷达各个器件性能参数。

§ 8.4 车载水汽拉曼激光雷达探测近地面水汽测量实验

车载水汽拉曼激光雷达进行水汽测量的实验步骤与拉曼激光雷达测量低空中二氧化碳分布的实验步骤相类似,需要遵循既定的程序和步骤,进行多方面的准备工作,包括激光器的致冷装置开启,发射光路和接收光路的同轴调节,光电倍增管工作温度的设定和放大器及光子计数器参数的调试以及扫描镜方位的调节等。水汽拉曼激光雷达测量实验的主要步骤如下:

一、激光器的开启准备工作

拉曼雷达中采用的 Quantel Brillinat B Nd:YAG 激光器,是一种工业用激光器,具有较大的输出功率和较好的工作性能,Nd:YAG 激光器是一种闪光灯泵浦的固体激光器,它采用超净水内外循环相结合的制冷方式进行制冷,制冷系统正常工作是激光器能量输出并保持稳定的前提,该激光器的工作温度设定为 30°C 。具体操作步骤与测量二氧化碳拉曼激光雷达激光器开启准备工作相同。

二、发射系统光学组件的调整

图 8.5 所示为激光器发射光路图,发射系统光学组件包括四个 45° 反射镜,三倍频晶体、扩束镜、 45° 导向镜等。进行水汽测量时,需要将三倍频光 354.7nm 激光经导向镜、扩束镜、扫描镜后直接发射到大气中去,不需要进入相应拉曼管,实验过程中需要对这些光学器件方位进行精确调整,其中包括倍频晶体的调节,需要对其位置、温度等参数进行调整以使激光器输出的三倍频光的转换效率达到最佳状态。其次对其它光学器件的方位进行精确调整以尽量减小光的能量损失。第三要对导向镜进行调节以使激光发射光路和接收光路同轴,以得到最佳探测效果。具体操作步骤与车载测污激光雷达监测污染物步骤一致,在此不再详细描述。

三、扫描镜方位确定

AML-2 车载测污激光雷达的一个显著特点就是能够实现污染物的三维空间分布监测。水汽拉曼激光雷达测量过程中主要是对水平和垂直方位的水汽混合比进行监测,因此要求扫描镜进行自动旋转及定位。如图 8.6 所示,通过调节差

分激光雷达测量控制界面上扫描器栏的控制按钮,进行适当参数设定便可实现扫描镜的垂直与水平方位扫描。

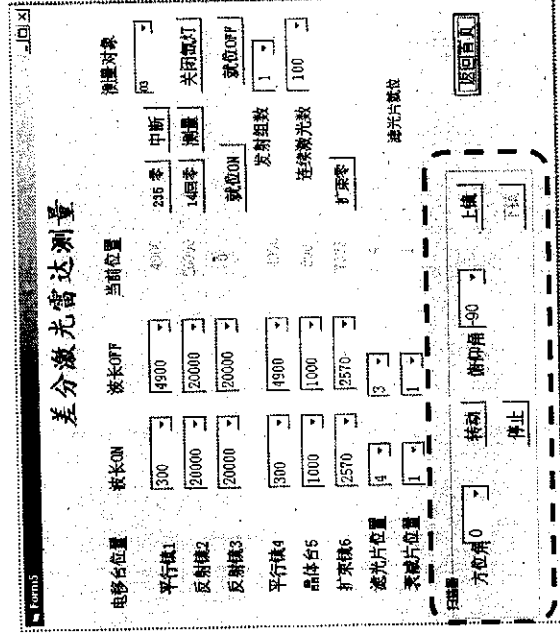
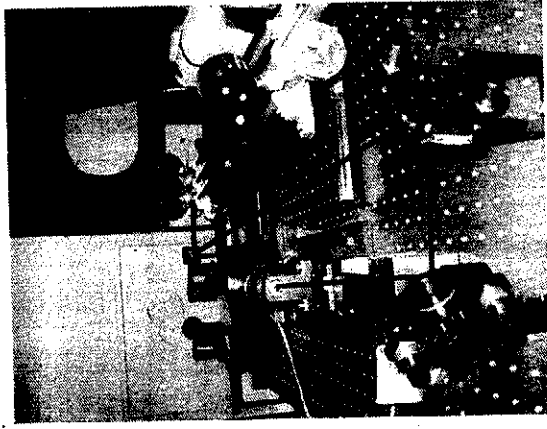


图 8.5 车载水汽拉曼激光雷达光路 图 8.6 水汽拉曼激光雷达扫描镜控制 (虚线框所示)

四、信号采集系统的参数设定

信号采集接收系统包括光电倍增管及其组件、前置放大器和光子计数器等。要恰当设置每一器件的工作参数,并保证其工作环境处于最佳状态,以获得最佳的信号采集能力。

1、设定 PMT 的致冷温度、放大倍数和放大器的工作电压和电流

水汽拉曼雷达信号采集系统所用的光电倍增管为英国 Electron tubes 公司产的 9214B 型,这种 PMT 在氮气和水汽拉曼散射波段具有 28% 的量子效率,采用半导体制冷,工作温度在 -20°C 左右以减小暗电流噪声。因此光电倍增管在工作前需进行致冷准备。9214B 的额定工作电压为 1250V,前置放大器型号为 philips 6954 型,配置低噪声电源,工作电压为 15V,电流为 0.15A。

2、设定光子计数器的阈值

光子计数卡是 MCA-3 P7882 型, MCA 的含义为 Multichannel Analyzer。光子计数卡附有 Server 软件。拉曼系统中回波信号的采集是通过 P7882 光子计数器来完成的, P7882 是一种非常灵敏的高速光子计数卡,实验过程中,阈值的设定十分重要。设置过低,不能有效滤除干扰信号,形成有用信号被淹没的现象;反之,阈值设置过高时,在滤除噪声的同时,有用信号也被截止,形成有用信号不能完全接收现象。在实验中的阈值的设置方法是:在接收系统的正常工作状态,

阻断发射光,同时开启光子计数器采集,逐渐调整光子计数器阈值,使其恰好没有噪声信号为最佳状态,为了确定选择的阈值是否合适,选取临界值进行测试,当设定的阈值稍稍高于临界值时,所采集的信号会突然增加。在采集之前,光子计数器还需要对探测的距离,距离分辨率以及采集的次数进行设置,采样时间间隔(Dwelltime)设置为200ns,相当于距离分辨率30米。将激光器Q-Switch延迟调至常规工作时的参数300us,拉曼激光雷达便可以进入测量状态。

五、水汽拉曼激光雷达原始信号采集

水汽拉曼激光雷达按照上述步骤将各个器件参数设定完毕之后,即可进行水汽和氮气拉曼信号采集。采集过程中激光雷达扫描镜在水平和垂直两个方位上行扫描,脉冲累积个数为20000次,分辨距离30米,光电倍增管电压设置为1250V。图8.7为2007年07月30日晚上雷达采集得到的水平和垂直方向的氮气和水汽拉曼回波信号,可以看出氮气拉曼回波信号比水汽拉曼回波信号要强,同时两拉曼信号具有一定的波动性,这主要是受大气抖动的影响,在数据反演过程中采用平滑的办法消除大气抖动带来的误差影响。由于水汽拉曼激光雷达采集的是强度较弱的拉曼信号,为了消除天空背景辐射噪声影响,提高雷达的信噪比,水汽测量实验选在夜间进行。

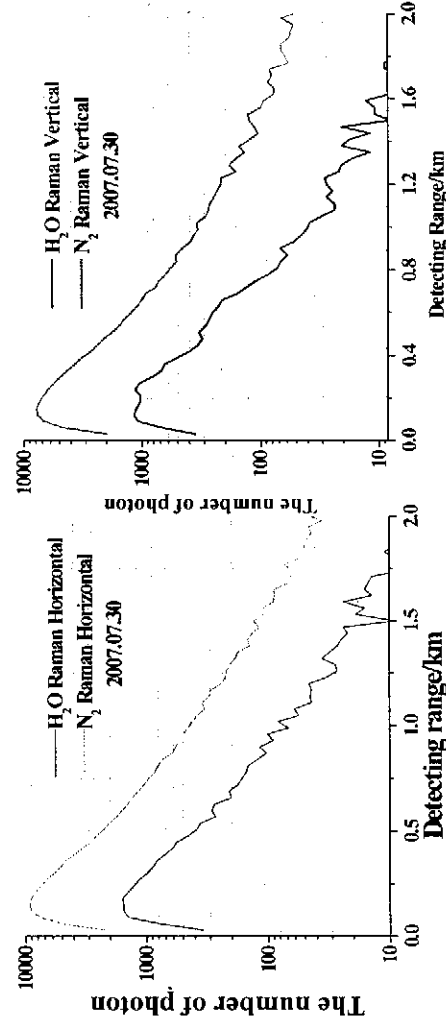


图 8.7 水汽拉曼激光雷达在水平和垂直方位上采集的雷达信号

§ 8.5 车载水汽拉曼激光雷达信号处理方法

水汽拉曼激光雷达测量采集到的氮气和水汽拉曼信号需要经过一系列的处理方法才能得到水汽混合比廓线。拉曼激光雷达数据处理步骤包括:原始信号背

景扣除、信号平滑、数据反演、系统常数标定、透过率修正、误差分析几个步骤。

(1) 由于水汽拉曼信号较 Rayleigh—Mie 散射信号强度弱很多, 如果在信号中掺杂背景噪声, 将会严重影响测量的精度和可靠性。拉曼激光雷达系统光子计数器接收的信号会掺杂天空背景噪声、光电倍增管暗电流噪声和热噪声等。随着探测高度的增加, 大气回波信号将越来越弱, 通常在一定距离以后的回波信号就已经不再随高度而变化, 因此, 可取该距离以后信号的平均值作为背景信号。还有一种获得背景噪声信号的办法: 阻断激光器发射光路, 其余器件在正常条件下, 此时采集得到的信号可作为背景信号。探测水汽拉曼激光雷达数据采集系统采用光子计数器进行采集, 因此需要恰当设定阈值电压来实现背景噪声信号的抑制。一般来讲, 合适的阈值电压能有效抑制背景噪声, 在实验过程中通过设定阈值电压可将背景噪声抑制在 1~2 个光子左右, 在这种情况下背景噪声对信号反演精度影响较小。如图 8.8 所示为激光雷达所采集的氮气和水汽拉曼信号的背景噪声信号以及掺杂在其中的其它干扰信号, 在 3km 以后的数据信号可视为背景噪声信号, 左图给出了掺杂在水汽拉曼信号中的 354.7nm 米散射信号以及氮气和氧

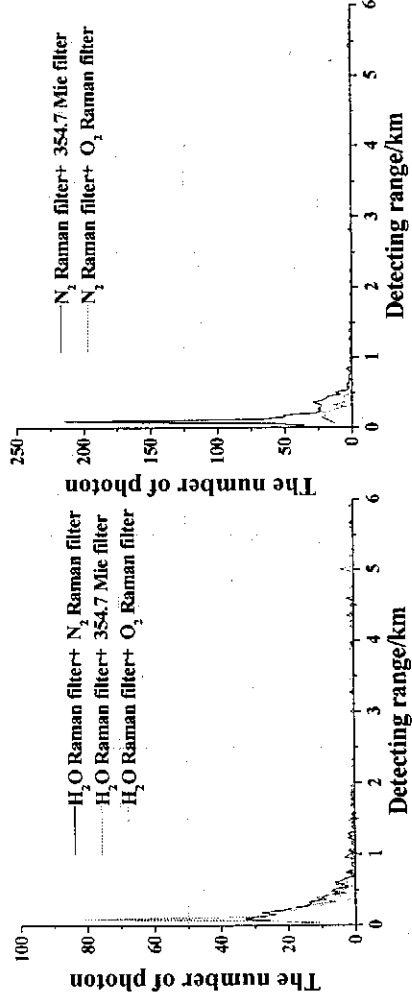


图 8.8 水汽和氮气拉曼信号中的掺杂信号示意图

气拉曼信号, 右图给出了氮气拉曼信号中掺杂在其中的 354.7nm 米散射信号和氧气拉曼信号, 由图中所示的背景噪声信号的大小可以看出经过降低光电倍增管工作温度和适当设置光子计数器阈值电压等技术手段, 采集得到的拉曼散射信号的背景信号可以完全忽略。同时由于采用的水汽和氮气滤光片在某些波段(354.7nm 米散射以及氧气拉曼散射波段)具有很强的抑制比, 能够实现干扰信号的有效抑制, 掺杂信号引起的水汽混合比测量误差可以忽略。

(2) 回波信号扣除背景噪声后, 大气起伏和电子学系统的噪声干扰仍有部分

存在, 激光雷达原始信号经过平滑处理可消除由于大气波动对信号造成的影响, 尤其是接收 Raman 散射这样较弱回波信号, 由于大气的波动往往引起信号采集的很大波动, 因此对原始回波信号的平滑有利于提高测量精度。平滑的原则是: 在不引起信号较大失真的情况下, 尽可能的减小随机噪声。平滑的手段是采用中值滤波法对回波信号进行平滑。考虑到回波信号与距离的平方成反比, 近距离很快衰减, 而远距离衰减较慢, 因而如果按照统一平滑点数进行数据平滑, 要么没起到较好的平滑效果, 要么会使信号有较大失真, 所以我们采用了近距离平滑点数较远距离少的分段平滑方法。当然不同地区不同大气结构所采取的平滑点数是不同的。图 8.9 中所示的原始数据经平滑后的数据结果, 从中可以看出, 原始信号经过平滑处理后, 可以把大气起伏、电子学、干扰光的随机噪声滤除出去, 对提高数据的可靠性及探测精度极为有利。

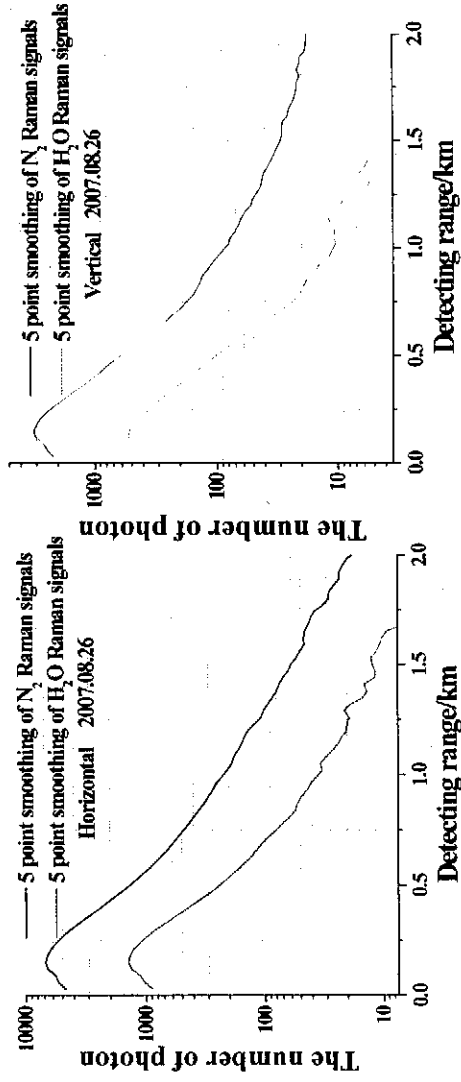


图 8.9 氮气和水汽拉曼信号平滑结果示意图

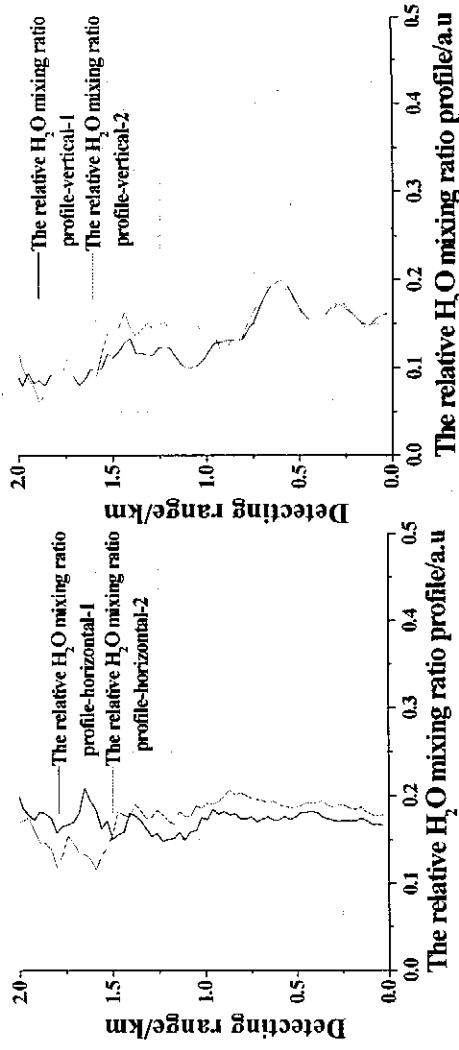


图 8.10 水汽拉曼激光雷达测量水平和垂直方向水汽相对含量混合比廓线

(3) 拉曼雷达信号的初步反演。水汽拉曼激光雷达信号初步反演程序与探测二氧化碳拉曼激光雷达数据反演一致, 将氮气拉曼和水汽拉曼原始信号经背景扣除、数据平滑等过程后, 将两信号相比后, 可给出水汽拉曼激光雷达测量得到相对水汽混合比廓线, 所谓相对水汽混合比是指未经定标的结果, 即 $S_{H_2O}(z)/S_{N_2}(z)$ 的空间分布。图 8.10 给出了的水平 and 垂直方向的水汽混合比廓线。

(4) 拉曼雷达信号大气透射率修正。由探测水汽混合比分布拉曼雷达方程可以看出, 激光雷达探测受到大气消光作用的影响, 一方面波长为 λ_0 的激发光发射到大气中受到大气中大气分子和气溶胶以及云雾粒子的散射和吸收影响, 另一方面所产生的拉曼散射光也将受到上述消光因素的影响。氮气和水汽拉曼散射信号受到的大气衰减可表示为:

$$Q(S_{N_2}) = q(\lambda_0, z_0, z)q(\lambda_{N_2}, z_0, z) \quad Q(S_{H_2O}) = q(\lambda_0, z_0, z)q(\lambda_{H_2O}, z_0, z) \quad (8.19)$$

其中

$$q(\lambda_0, z_0, z) = \exp\left[-\int_{z_0}^z \alpha_{\lambda_0}(z')dz'\right]$$

$$q(\lambda_{N_2}, z_0, z) = \exp\left[-\int_{z_0}^z \alpha_{\lambda_{N_2}}(z')dz'\right]$$

$$q(\lambda_{H_2O}, z_0, z) = \exp\left[-\int_{z_0}^z \alpha_{H_2O}(z')dz'\right]$$

按照消光效应具有线性叠加的特性, 上式中所用到的消光系数可以分解表示为:

$$\alpha(r, \lambda_0) = \alpha_m(r, \lambda_0) + \alpha_A(r, \lambda_0)$$

$$\alpha(r, \lambda_{N_2}) = \alpha_m(r, \lambda_{N_2}) + \alpha_A(r, \lambda_{N_2}) \quad \alpha(r, \lambda_{H_2O}) = \alpha_m(r, \lambda_{H_2O}) + \alpha_A(r, \lambda_{H_2O})$$

m 代表大气分子的消光系数, A 代表气溶胶的消光系数。 λ_0 , λ_{N_2} , λ_{H_2O} 分别代表拉曼雷达的激发波长、氮气拉曼散射波长和水汽分子拉曼散射波长。

根据观测资料得出的整层大气及其主要气体成份的吸收透射率如图 6.9 所示。可以看出在 0.4~0.7 微米和 8~12 微米 (除了 9.6 微米 O_3 吸收带) 两个波段大气是相当透明的。探测水汽拉曼激光雷达所工作的波段位于 386.7nm 和 407.8nm, 从图中可以看出这两个波段受大气分子吸收作用可以忽略, 因此在该拉曼雷达信号数据处理过程中, 关于大气透射率修正主要是考虑大气分子和气溶胶散射消光不同对信号反演造成的影响。

由拉曼激光雷达处理方法可以看出, 将水汽回波信号表达式与氮气拉曼散射

回波信号表达式相比进行整理后得到大气透过率修正项表达式:

$$Dq^w(z_0, z) = q(\lambda_{N_2}, z_0, z) / q(\lambda_{H_2O}, z_0, z) \quad (8.20)$$

$$= \exp \left\{ \int_{z_0}^z [\alpha_m(\lambda_{H_2O}, z_0, z) - \alpha_m(\lambda_{N_2}, z_0, z)] - [\alpha_A(\lambda_{H_2O}, z_0, z) - \alpha_A(\lambda_{N_2}, z_0, z)] dz \right\}$$

根据美国中纬度标准大气模式中的大气消光数据以及合肥地区的消光数据模拟得出水汽拉曼激光雷达的透过率修正项的值, 如图 8.11 所示。由于车载测

污激光雷达激光能量、望远镜面积以及光学透过率等方面的影响, 造成水汽拉曼激光雷达的探测距离受到限制, 在合肥地区比较晴朗能见度较好的天气情况下激光雷达探测距离在 2km 以内, 由图 8.11 可以看出, 在探测距离 2km 处, 在不同天气情况下透过率差值介于 2%~4% 之间。拉曼激光雷达通常工作在晴朗能见度较好的天气条件下, 因此在这种情况下下透过率修正项值在 2% 左右。

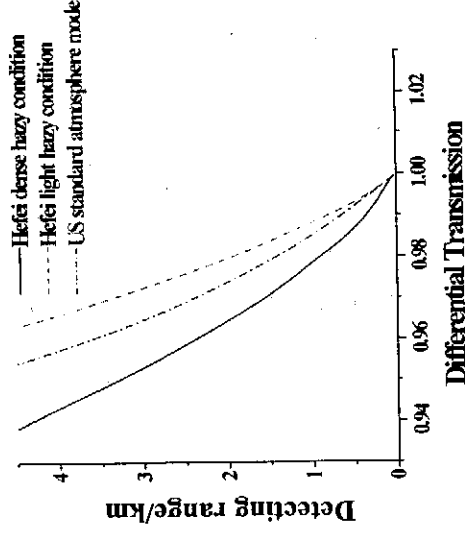


图 8.11 水汽拉曼激光雷达透过率修正项模拟

(5) 水汽拉曼雷达系统常数标定。拉曼激光雷达信号处理过程中, 雷达系统

常数的精确标定对准确反演水汽混合比分布结果非常重要, 如上所述步骤 (3)

只是给出了水汽混合比的相对分布结果。按照水汽拉曼激光雷达方程的表述, 图

8.10 只是给出了 $S_{H_2O}(z)/S_{N_2}(z)$ 的空间分布, 要得到水汽混合比分布的精确结果

需要对系统常数 C_w 进行精确标定。拉曼系统常数的表示式为:

$$\frac{k_{N_2}}{k_{H_2O}} \frac{\sigma_{N_2}(\pi)}{\sigma_{H_2O}(\pi)} \frac{M_{H_2O}}{M_{H_2O}} \frac{n_{N_2}}{n_{dry}}, \quad \text{其中 } \sigma_{H_2O}(\pi), \sigma_{N_2}(\pi) \text{ 等参数的值可由实验室进行测量测}$$

定, M_{H_2O} 表示水汽的分子量, 取为 18, M_{dry} 表示干空气的分子量, 取为 29,

n_{N_2}/n_{dry} 表示氮气在干空气中的数密度之比, 可通过单位换算, 转换成体积比,

其值取为 78%。 k_{H_2O} , k_{N_2} 为两通道的通道常数, 它包括在水汽分子和氮气分子

拉曼散射波段处系统的光学效率、望远镜的有效截面、光电倍增管的光谱效率以

及激光输出能量的乘积, 因此对 k_{H_2O} , k_{N_2} 两参数确定之后便可确定出雷达系统

常数。常用的定标方法有绝对定标法和相对定标法。

从原理上讲,拉曼激光雷达的系统常数可以通过绝对定标的方法精确确定出来,只需对系统常数表达式中的各个参数的值进行确定,然后将各个值带入表达式中求出即可。Vaughan 等人^[82]在 1988 年提出了水汽拉曼雷达的绝对定标方法,各个器件在两拉曼散射波长处的透过率通过精密仪器测量得到,两通道所用的滤光片的峰值透过率由生产厂家提供,将测量得到的器件透过率结果与滤光片峰值透过率相乘便得到两个通道的透过率。水汽和氮气的拉曼散射截面的值由 Penney

和 Lapp 等人通过实验精确确定^[83]。 $\frac{M_{H_2O}}{M_{dry}} \frac{n_{N_2}}{n_{dry}}$ 的值通过代入相应的参数来确定。

值得说明的是 Vaughan 的定标方法中要求光电倍增管在氮气和水汽的拉曼散射波长的量子效率相等,绝对定标方法受到仪器测量精度以及环境温度变化影响较大,厂商提供的滤光片透过率曲线假定为一成不变,因此不能解决系统变化带来的透过率变化问题,例如系统的老化问题、光学元件的替代以及系统常规修正都会导致透过率的变化,最终导致系统常数的改变。Whiteman 等人讨论了望远光学系统结构变化对系统常数的影响,并指出系统光学元件的改变是短期内导致系统常数改变的主要原因^[42]。在上述的绝对定标方法中,精确测定拉曼散射截面显得非常重要,而且考虑散射截面与温度的关系也需要考虑,因此综上所述,绝对定标的方法在实际操作上有比较大的困难,需要确定的参数太多,而且各个参数随环境以及工作条件的改变而改变,导致系统常数经常发生变化。Vanessa Sherlock 等人^[84]提出了一种新的绝对定标的办法:该方法依赖于将仪器功能函数进行分解,雷达定标因子可重新表示成两部分的乘积,一部分描述仪器透过率和探测效率,另一部分描述为与波长相关的 Raman 后向散射截面随仪器函数的变化。在此定标方法中需要两种外部光源:太阳光天顶角散射光和氙弧灯。该方法定的定标结果与 Vaisala H-Humicap 无线电探空仪对比误差小于 15%,短期和长期内的系统常数变化误差分别小于 4% 和 6%,此结果比相对定标的精度要高。

从实际操作上讲,通过与前面讲述的探测水汽含量的仪器进行比对然后确定拉曼雷达系统常数的相对定标方法更有利于实际操作。相对定标一般可分为:大气模式定标、无线电探空仪定标、卫星数据定标、火箭探空资料定标、单点仪器定标等方法。大气模式定标所用到的对比资料来源于当地长期累计的气象探空资

料,假定当时的探测情况符合同一时期内本地的大气模式,图 8.12 给出了合肥地区春季和冬季水汽高度分布的模式结果。但是利用模式定标会引入较大的误差,因为大气的参数受多方面因素影响,实时测量时的数据与模式会有一定的出入,因此这种定标方法的可信度不高。

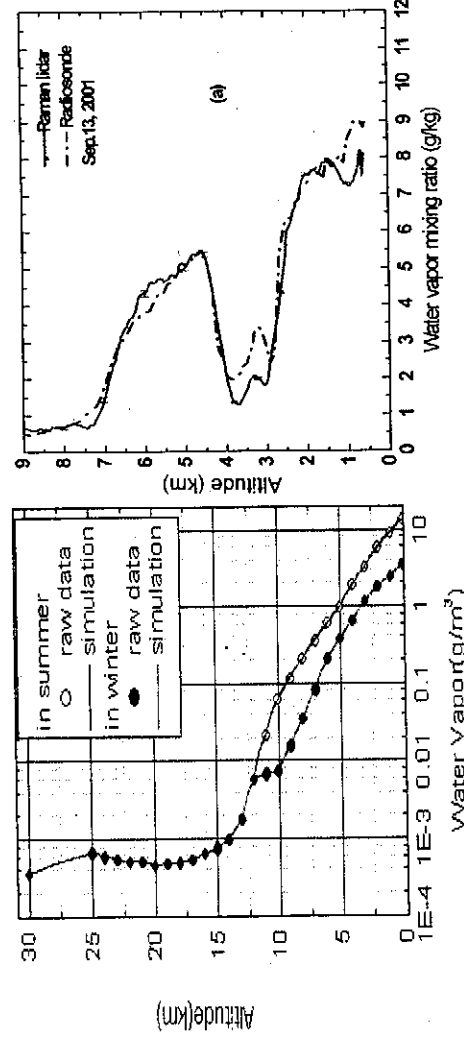


图 8.12 合肥地区水汽高度分布模式图

图 8.13 无线电探空仪对激光雷达定标

在相对定标过程中比较常用的是无线电探空仪对比定标。激光雷达在测量的同时,在附近释放无线电探空仪,然后将雷达数据与探空仪数据进行比对,从而可以实现对雷达系统常数的标定,图 8.13 所示为水汽拉曼激光雷达与无线电探空仪对比结果。卫星定标是利用卫星数据与激光雷达数据对比,此方法具有一定的局限性,考虑到卫星轨道的运转周期,只有当卫星运转到与激光雷达探测所在地重合时才能开展对比实验,因此在对时间上必须进行充分考虑。下面将着重论述一种适用于水汽拉曼激光雷达的定标的简便方法,并对激光雷达系统误差进行分析讨论。

§ 8.6 车载水汽拉曼扫描激光雷达系统常数标定

§8.6.1 水汽拉曼激光雷达定标方法概述

在水汽拉曼激光雷达整个系统研制过程中,系统的常数定标工作具有非常重要的意义。从原理上讲,激光雷达的系统常数应当保持一个定值,但是随着激光雷达工作环境的变化和各个器件参数的老化,激光雷达的系统常数会有稍许的波动,因此激光雷达在工作一段时间之后需要进行系统常数校正,校正的周期一般在两个月左右。基于车载拉曼激光雷达具有三维扫描的功能,提出了一种适用于

水汽拉曼扫描激光雷达定标的简便方法,该方法在定标过程中需要结合使用 LI7500 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ 分析仪的水汽探测结果。LI-7500 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ 分析仪的具体性能参数在第六章中有详细描述,在此不再赘述。

拉曼激光雷达与 LI-7500 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ 分析仪进行定标实验时,选择天气情况较好的晚上,将 LI-7500 分析仪安置在 30m 的实验高塔上进行测量,自动存储数据,调整激光雷达扫描方位,与水平方向成 5° 方向扫描,并且使光路经过 LI-7500 水汽分析仪放置地点,保证对两台仪器对同一地点的大气进行探测,以提高对比的可信度。LI-7500 分析仪采集得到的水汽混合比浓度如图 8.14 所示。

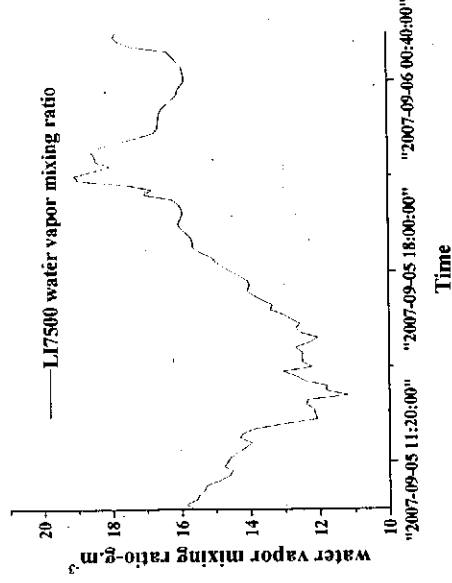


图 8.14 LI7500 测量的水汽混合比随时间变化

针对水汽拉曼激光雷达具有三维扫描的功能,将激光雷达在水平和垂直两个方向上交替扫描,然后结合 LI7500 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ 分析仪的水汽测量数据进行雷达系统常数标定, LI7500 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ 分析仪放置在观测塔上,距离地面高度 30 米,与激光雷达垂直距离 30 米,具体定标过程如下:

- 1、将激光雷达在水平方向上扫描。适当调节激光雷达扫描方位,使雷达光束以水平方向发射,同时确保光路经过 LI7500 分析仪附近位置,采集得到水平向上的水汽和氮气拉曼信号。
- 2、将水平方向上水汽拉曼信号与氮气信号进行适当平滑处理后相除,得到信号

$$\text{的比值} \frac{S_{n_2}(z)}{S_{N_2}(z)}。$$

- 3、考虑到 LI-7500 分析仪与激光雷达相距 30 米,取 30-60 米处两拉曼信号比值的平均值与分析仪数据对比,得到水平方向对应比例系数 C_1 。
- 4、将激光雷达在垂直方向上扫描。采集垂直方向上的水汽和氮气拉曼信号。
- 5、将垂直方向上水汽拉曼信号与氮气信号进行适当平滑处理后相除,得到信

$$\text{号的比值} \frac{S_{H_2O}(z)}{S_{N_2}(z)}。$$

6、取30米处两拉曼信号比值 $\frac{S_{H_2O}(0.03)}{S_{N_2}(0.03)}$ 的值分析仪数据对比, 得到垂直方向的对

应比例系数 C_2 。

7、采用不同时间进行多次对比分析, 得到一系列对应比例系数 $C_3, C_4, \dots, C_n$ 。

8、分析比例系数 $C_3, C_4, \dots, C_n$ 之间的相关性, 并将比例系数进行适当处理 (取平均) 后得到最终的比例系数, 该比例系数即为最终的雷达系统常数。

9、将该系统常数与两拉曼信号比值 $\frac{S_{H_2O}(z)}{S_{N_2}(z)}$ 相乘就可得到拉曼雷达测量的水汽混合比廓线。

合比廓线。

值得说明的是, 由于LI7500 CO_2/H_2O 分析仪与雷达距离较近因此忽略了大气透过率差别的影响, 即忽略 $Dq^*(z_0, z)$ 的影响, 同时假定水汽混合比在一定范围内水平方向上的分布比较均匀, 水汽分布在水平方向上的均匀性可通过激光雷达测量得到的水平方向上数据体现出来。

§8.6.2 水汽拉曼激光雷达定标实验

如前所述, 拉曼水汽激光雷达的定标过程可以简单概括为由水平方向与垂直方向联合定标过程。图 8.15 所示为水汽拉曼激光雷达在 2007.07.30 晚上进行定标的实验数据, (a) 图表示的水平方向的测量得到的两组水汽混合比廓线, (b) 图表示的是垂直方向上测量得到的两组水汽混合比廓线, 这四条曲线都是未经定标的实验数据, 分别表示为 A, B, C, D 线, 各条曲线对应的时间在图中标出。

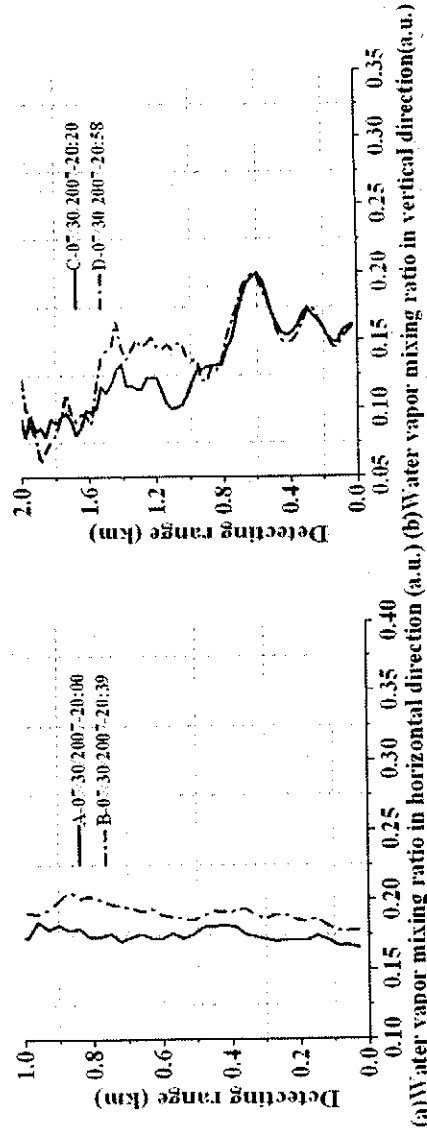


图 8.15 水汽 Raman Lidar 测量的水平和垂直方向上的未定标的水汽混合比廓线

如表 8.3 所示, 将四组拉曼雷达信号比值 $S_{H_2O}(z)/S_{N_2}(z)$ 与相应时间内 LI7500 CO_2/H_2O 分析仪数据进行对比后可得到四个准系统常数, 其值分别为 a: 98, b: 108, c: 101, d: 102, 四个常数之间的相关性大小为 91%(a~b), 97%(a~c), 96%(a~d), 94%(b~d), 99%(c~d), 94%(b~c), 拉曼激光雷达系统常数终值取为各个常数的均值: 102.25, 标准偏差为 4.19。

表 8.3 水汽拉曼激光雷达测量水平和垂直方向信号比值与 LI7500 数据对比

时间	扫描方位	Raman 信号比值	LI7500 数据 (g/m^3)	准系统常数
08:00	水平	0.16695	16.3620	98
08:20	垂直	0.17794	19.3780	108
08:39	水平	0.16215	16.3620	101
08:58	垂直	0.16065	16.3600	102

将定标常数乘以上述四组曲线中可得到水平和垂直方向上水汽混合比的绝对值, 如图 8.16 所示左图为定标后水汽拉曼激光雷达测量得到在水平方向上的水汽混合比廓线, 可以看出在水平方向一定范围内 ($<1.5km$) 水汽混合比变化较小, 接近于均匀分布状态。右图给出了两组曲线的平均值及标准偏差大小, 需要说明的是右图包含了水汽混合比随时间演化的过程, 可以看出水汽混合比在水平方向上分布较为均匀。如图 8.17 所示左图为定标后水汽拉曼激光雷达测量得到在垂直方向上的水汽混合比廓线, 可以看出在垂直方向上水汽混合比变化较大, 具有递减的趋势, 与模式分布相吻合。右图给出了两组曲线的平均值及标准偏差大小, 需要说明的是右图同样包含了水汽混合比随时间演化的过程, 可以看出

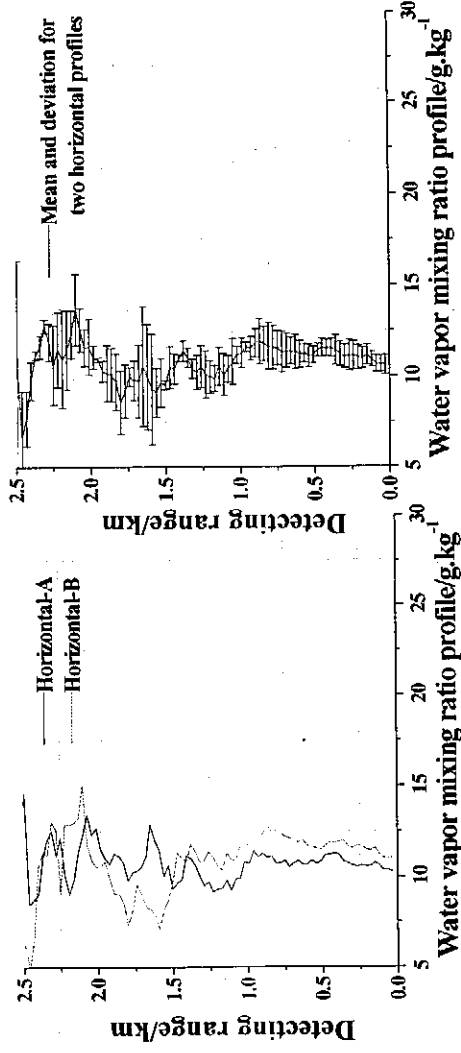


图 8.16 拉曼激光雷达水平方向扫描时测量得到水汽混合比廓线

1.0km 以下水汽混合比变化较小, 说明在此距离范围内水汽活动较为缓慢, 在 1.0~1.5km 距离范围内水汽活动距离, 导致出现较大偏差, 在 1.5~2.5km 范围内两组曲线差别不大, 表明水汽活动较为缓慢。

由图 8.16 和 8.17 可以看出, 拉曼激光雷达探测污染物的一个优点充分体现出来, 拉曼雷达探测可消除激光雷达几何因子的影响, 消除激光雷达探测盲区, 得到近地面污染物的数据。激光雷达在垂直测量时, 得到的水汽混合比在近地面得到的数据结果大小与水平测量时得到的数据相吻合, 充分验证了雷达测量的可靠性以及所提出的定标方法的合理性。

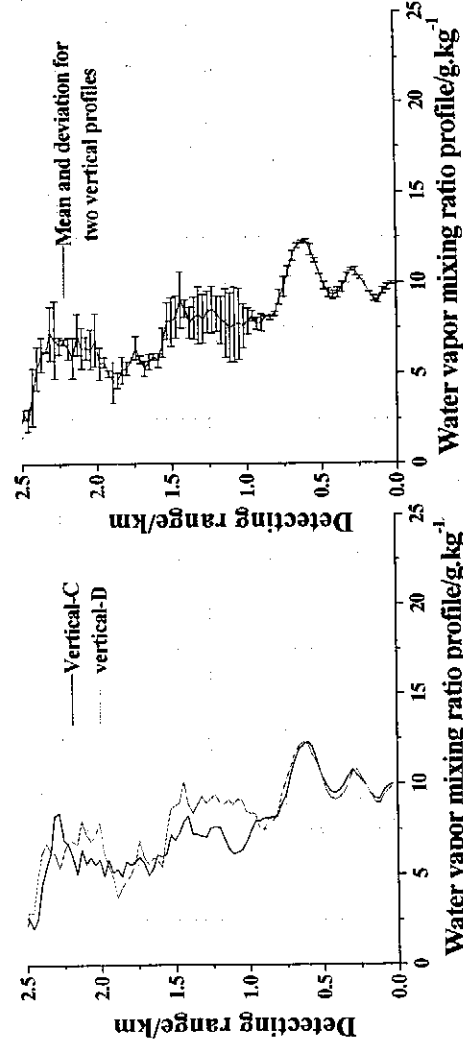


图 8.17 拉曼激光雷达垂直方向扫描时测量得到水汽混合比廓线

图 8.18 和 8.19 分别给出了水汽拉曼激光雷达在水平方向和垂直方向上测量得到的空气中水汽混合比随时间演化关系, 可以看出在水平方向上水汽混合比随着距离变化不明显, 表明水汽混合比在分布在水平方向上具有一定的均匀性, 随着时间改变, 不同距离处水汽混合比变化具有一致性, 尤其在 1.0km 以内一致性更加明显, 表明在小距离范围内水汽混合比分布和变化具有一定均匀性。在垂直方向上, 水汽混合比分布随高度具有一定的层状结构, 在某一高度分布上, 水汽混合比随时间变化具有一定的统一性, 且在近地面距离范围内水汽变化较为缓慢。

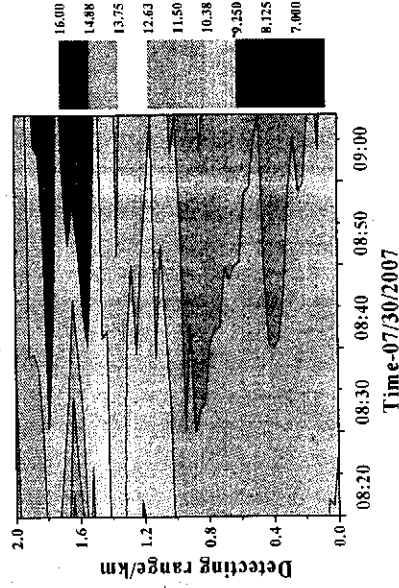


图 8.18 Raman Lidar 测量得到水平方向水汽混合比随时间演化图

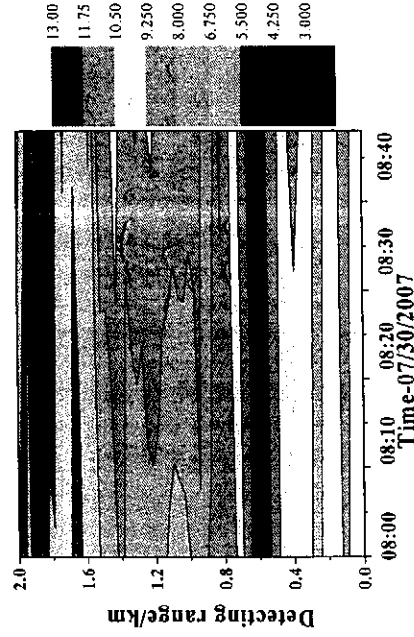


图 8.19 Raman Lidar 测量得到垂直方向水汽混合比随时间演化图

§8.6.3 激光雷达定标误差分析

在水汽拉曼激光雷达整个系统研制过程中,系统的常数定标工作具有非常重要的意义,一方面该常数的精确确定对于激光雷达精确反演大气参量具有直接的影响,由激光雷达方程可以看出被测污染物的含量与系统常数成正比关系,系统常数的改变将会直接引起测量污染物含量反演的变化。另一方面,系统常数的稳定性也是衡量激光雷达性能的参数之一,因此需要对上述方法确定的定标常数的误差进行估计分析,系统定标误差估计可根据如下误差分析公式进行:

$$(\delta C_w)^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (C_{wi} - \bar{C}_w)^2 \quad (8.21)$$

N 代表总的定标次数,在上述定标过程中 N 值为 4, C_{wi} 是每次对比后得到准定标常数值, $\bar{C}_w$ 是所有准定标常数的平均值,将各个参量值带入后得出经上述

定标方法定标得出的系统常数的误差($\frac{\delta C_w}{C_w}$)=3.5%, 具有较高的精度。

§8.6.4 典型代表测量实验结果

车载水汽拉曼激光雷达搭建完成之后进行了一系列的实验观测, 得到了一些有价值的实验结果, 激光雷达在进行水汽测量时, 利用其扫描功能, 开展水平方向和垂直方向的水汽混合比廓线的实验测量, 同时开展了与无线电探空仪水汽对比实验, 下面将其中具有代表性的实验结果进行分析。水汽拉曼激光雷达在2007年8月26号晚上进行水汽混合比测量实验, 按照与上文提出的水平与垂直方向联合定标的方法进行雷达系统常数标定, 得出系统常数 $C_w = 109.1$, $(\frac{\delta C_w}{C_w}) = 1.8\%$ 。

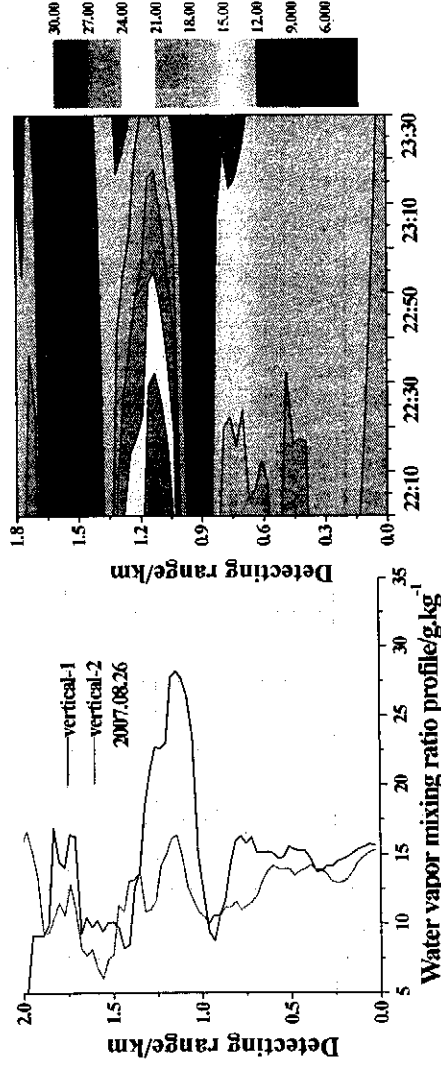


图 8.20 水汽拉曼雷达测量垂直方向水汽混合比廓线及时间演化图

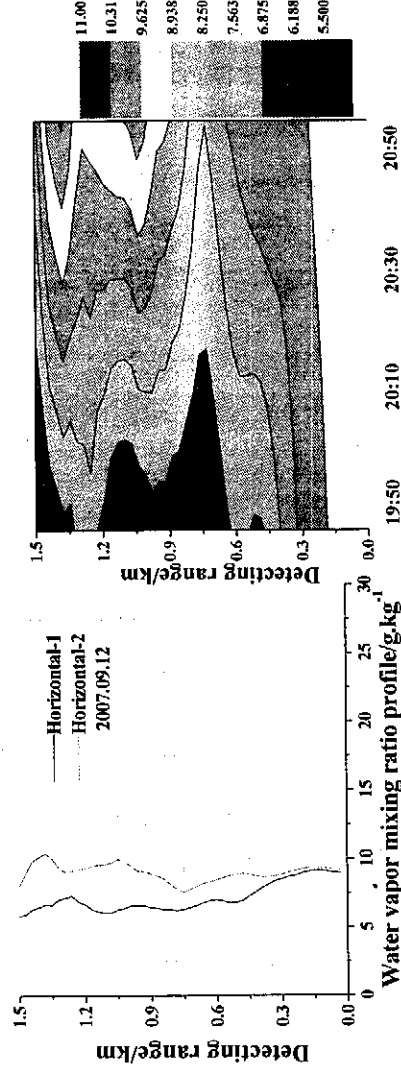


图 8.21 水汽拉曼雷达测量水平方向水汽混合比廓线及时间演化图 (12/09/2007)

如图8.20所示, 实验得到的垂直方向上水汽混合比廓线示意图, 可以看出当晚水汽混合比在垂直距离上分布具有明显的层状结构, 其中以1.0~1.5km高度范

圈内最为明显,此高度范围内水汽混合比较大,有一水汽团存在,且随着时间演化水汽团逐渐消失。

水汽拉曼激光雷达在2007年9月12日晚上进行了水汽混合比水平和垂直方位扫描实验。得出雷达系统常数 $C_w = 113.7$, $(\delta C_w / C_w) = 1.5\%$ 。图8.21表示为水汽拉曼激光雷达在2007年9月12日晚上测量得到的水平方向水汽混合比分布以及随时间演化图。可以看出当晚测试水平方向上1.5km范围内水汽混合比较为均匀,随探测距离水汽混合比变化较小,但随时间演化比较明显,随时间推移水汽混合比有增大趋势。

图8.22所示为激光雷达在2007年9月12日晚上测量得到垂直方向水汽混合比分布以及随时间演化图。可以看出在不同时间内测量得到的两组水汽混合比廓线在高度分布上具有一定一致性,表明在一定测量时间间隔内,水汽混合比随高度分布具有一定的稳定性,两组曲线在较短时间内变化缓慢,具有一定增大的趋势,水汽拉曼激光雷达能够鉴别出水汽混合比增大的信息,并在测试结果中体现出来,结果充分表明激光雷达测量具有较高的可靠性和灵敏度。

水汽拉曼激光雷达在2007年9月22日晚上进行了水汽混合比水平和垂直方位扫描实验。得出雷达系统常数 $C_w = 97.3$, $\delta C_w / C_w = 2.5\%$ 。图8.23 表示为水汽拉曼激光雷达在2007年9月22日晚上测量得到的水平方向水汽混合比分布以及随时间演化图。可以看出当晚测试水平方向上1.5km范围内水汽混合比较为均匀,随探测距离水汽混合比变化较小,但随时间演化比较明显,随时间推移水汽混合比有增大趋势。与9月12号晚上测量的数据具有相似性,只是绝对量值有所减小,这与水汽混合比随季节变化规律相吻合。

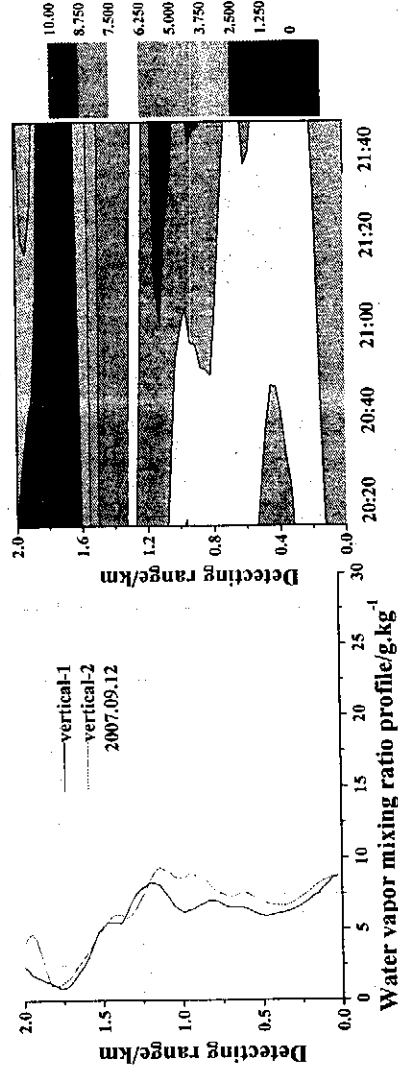


图 8.22 水汽拉曼雷达测量垂直方向水汽混合比廓线及时间演化图 (12/09/2007)

图8.24表示为水汽拉曼激光雷达在2007年9月22日晚上测量得到的垂直方向水汽混合比分布以及随时间演化图。可以看出两水汽混合比廓线基本重合, 表明水汽分布在垂直高度上变化不大, 大气活动较为缓慢。两组廓线的均值及标准偏差如右图所示, 该结果表明激光雷达测量具有很高的稳定性。

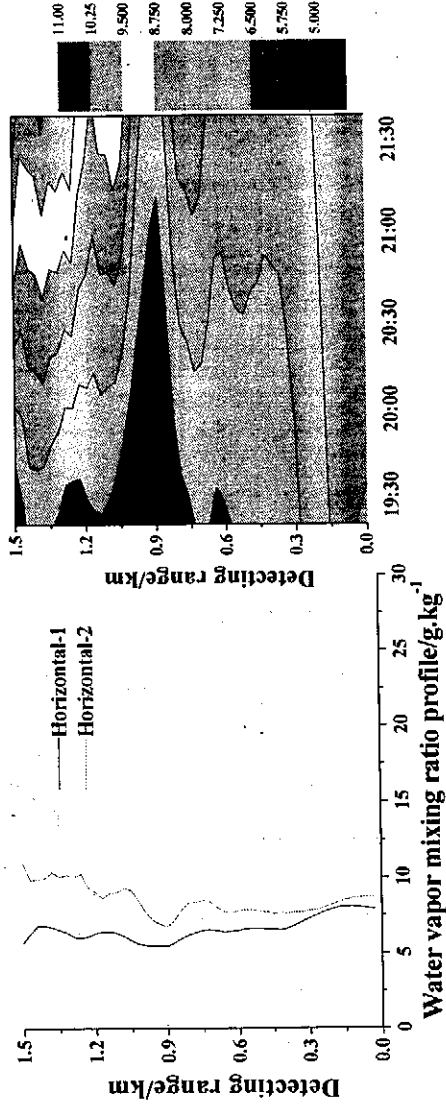


图 8.23 水汽拉曼雷达测量水平方向水汽混合比廓线及时间演化图 (22/09/2007)

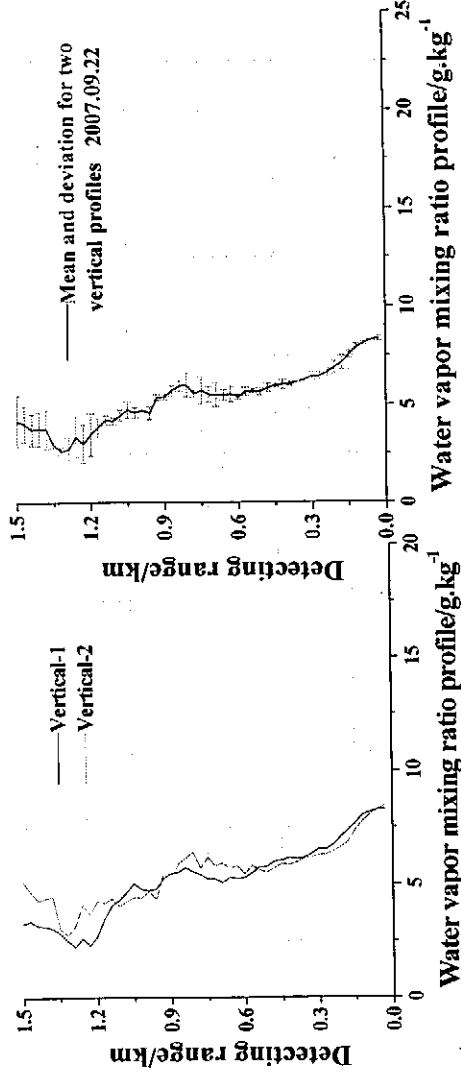


图 8.24 水汽拉曼雷达测量垂直方向水汽混合比廓线及标准偏差图 (22/09/2007)

表 8.4 水汽拉曼激光雷达定标常数以及误差结果

测量日期	定标常数 C_w	定标误差 ($\delta C_w / C_w$)
2007.07.30	102.25	3.5%
2007.08.26	109.1	1.8%
2007.09.12	113.7	1.5%
2007.09.22	97.3	2.5%

车载水汽拉曼激光雷达搭建完成之后从2007年07月份开始进行实验测量, 在天气晴朗、能见度较好的夜晚进行了多次实验观测, 观测实验一直持续到11月份,

在连续四个月的观测期间内,采用上述定标方法对激光雷达的系统常数进行了几次标定,定标常数和定标误差的值如表8.4所示,经误差分析后得出激光雷达系统常数误差为4.9%。

§8.6.4水汽拉曼激光雷达与无线电探空仪对比实验

水汽拉曼激光雷达在进行水汽测量的同时,利用无线电探空仪进行同时对比实验研究。无线电探空仪能测量不同高度的温度、压力和相对湿度。为确保水汽激光雷达与无线电探空仪对比的真实性和可靠性,应尽量保持二者在同一时间段内进行水汽观测,即保持观测的一致性。水汽激光雷达位置与无线电探空仪释放地点不要太远,本次对比实验中无线电探空仪释放地点距激光雷达测量地点150米,当晚天气情况良好,接近于无风状态。具体的对比过程如下:

- 1、将无线电探空仪中的相对湿度数据转化成水汽混合比数据。利用无线电探空仪探测到的温度数据和相对湿度数据,同时结合图8.1中所给出的不同温度下饱和和水汽压数据推算出随高度分布的水汽压数据,再将水汽压数据代入推导公

式 $w(g/kg) = 622 \frac{e(hPa)}{(P-e)(hPa)}$ 可求出水汽混合比随高度分布的数据结果。

- 2、激光雷达进行水平和垂直方向扫描,利用上文提出的定标方法进行系统定标,得出水汽混合比随高度分布以及时间演化关系图。

- 3、将水汽拉曼激光雷达测量得到的数据与无线电探空仪数据进行对比分析。

图8.25所示为水汽拉曼激光雷达测量的水汽混合比与无线电探空仪的数据对比结果,可以看出无线电探空仪与激光雷达的数据吻合较好,都能有效地探测到0.4~0.6km高度范围内水汽混合较大的情况。二者之间具有微小的差别,可能是由于激光雷达与无线电探空仪释放地点具有一定距离间隔,随着高度增加,探空仪具有水平方向漂移的情况,造成一定的探测偏差。

图8.26为当晚拉曼激光雷达测量得到的垂直方向上水汽混合比廓线随时间演化关系图,可以看出水汽混合比在测量时间范围内具有增大的趋势。

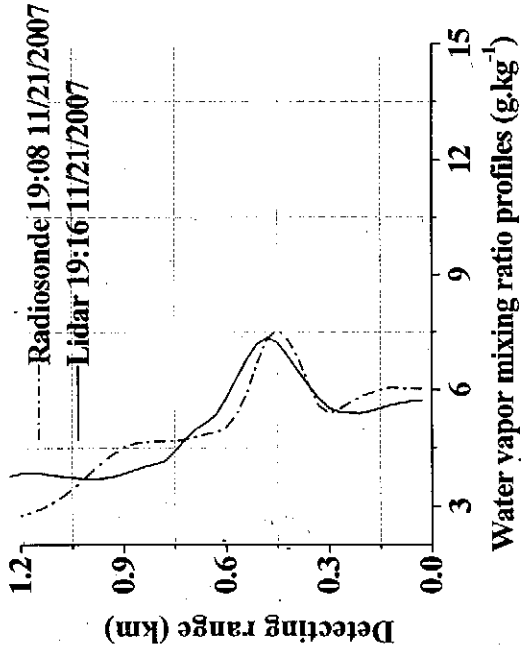


图 8.25 拉曼激光雷达与无线电探空仪对比数据

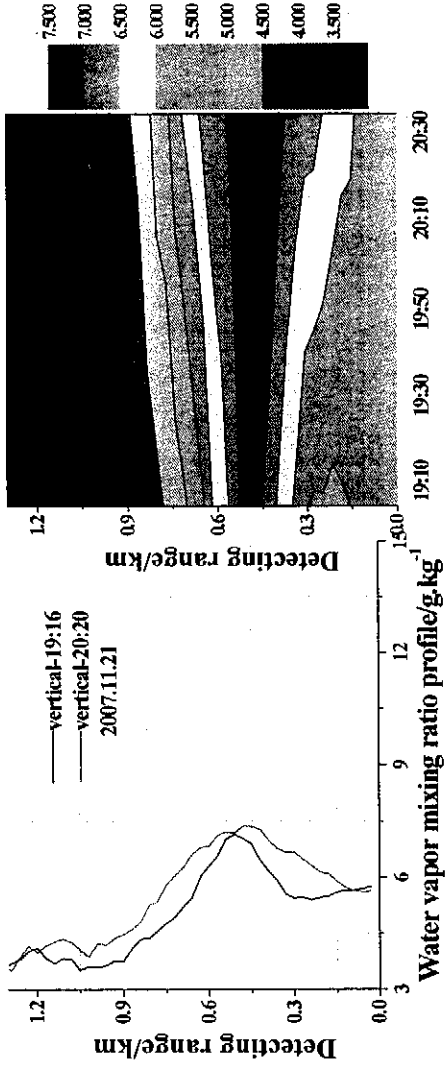


图 8.26 水汽拉曼激光雷达测量得到垂直方向上水汽混合分布及时间演化

§ 8.7 水汽拉曼扫描激光雷达测量误差分析

§8.7.1 水汽拉曼激光雷达测量水汽混合比误差分析

由误差传递理论可以得到水汽拉曼激光雷达测量水汽混合比误差公式为:

$$\left(\frac{\delta w}{w}\right)^2 = \left(\frac{\delta S}{S}\right)^2 + \left(\frac{\delta T}{T}\right)^2 + \left(\frac{\delta C_w}{C_w}\right)^2 \quad (8.22)$$

由上述公式可以看出误差来源有三部分组成: $\left(\frac{\delta S}{S}\right)^2$ 表示拉曼激光雷达接收的水

汽和氮气Raman回波信号不确定度, 可表示为:

$$\left(\frac{\delta S}{S}\right)^2 = \left(\frac{\delta N_{H_2O}}{N_{H_2O}}\right)^2 + \left(\frac{\delta N_{N_2}}{N_{N_2}}\right)^2 \quad (8.23)$$

N_{H_2O} , N_{N_2} 为水汽和氮气拉曼回波信号的计数值, δN_{H_2O} , δN_{N_2} 为水汽和氮气拉曼回波信号的不确定度。忽略放大器和光子计数器引起的信号不确定度, 那么水汽拉曼回波和氮气拉曼回波信号的随机相对不确定度可表示如下:

$$\frac{\delta N_{H_2O}}{N_{H_2O}} = \frac{\sqrt{N_{H_2O} + N_D + N_B}}{N_{H_2O}} \quad \frac{\delta N_{N_2}}{N_{N_2}} = \frac{\sqrt{N_{N_2} + N_D + N_B}}{N_{N_2}} \quad (8.24)$$

N_{H_2O} , N_{N_2} , N_D , N_B 均是在发射大量激光脉冲数情况下的累加值, 将(8.24)式

代入(8.23)式, 即可得到拉曼雷达回波信号相对不确定度 $\left(\frac{\delta S}{S}\right)$ 。

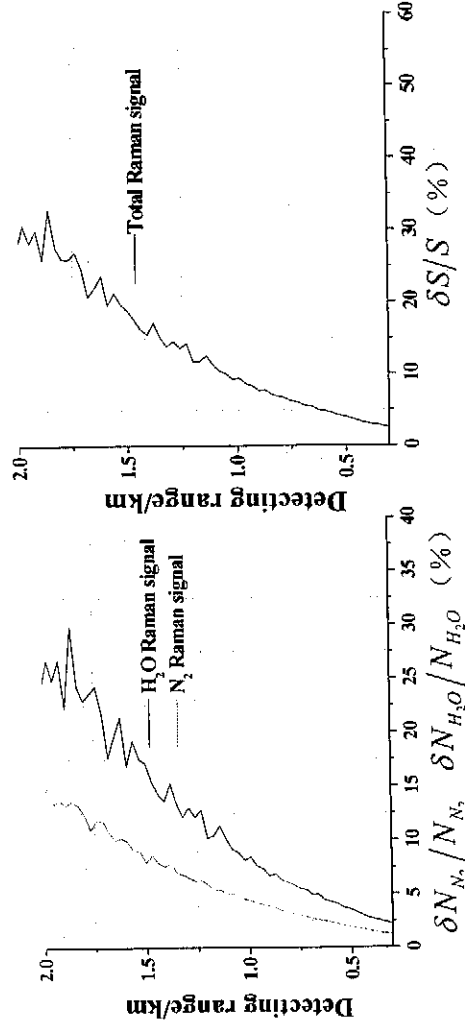


图 8.27 水汽拉曼激光雷达回波信号不确定度模拟分析

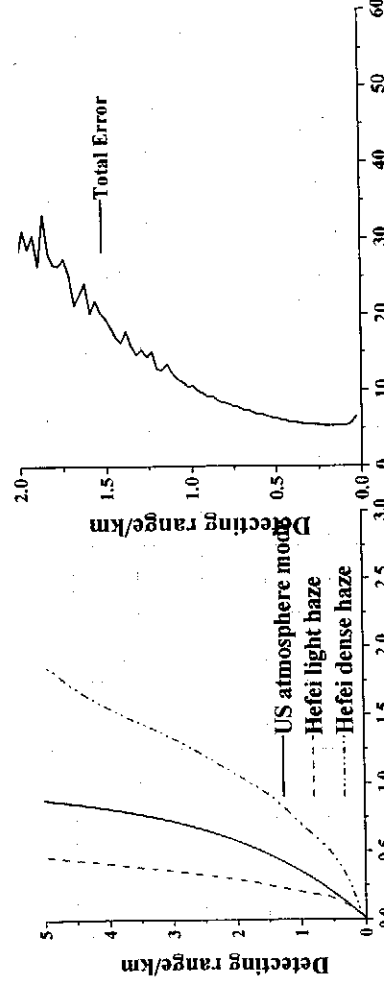


图 8.28 大气透过率修正项的

图 8.29 水汽拉曼激光雷达测量

不确定度 $\delta T/T$ (%)

不确定度 $\delta w/w$ (%)

图 8.27 所示为水汽拉曼激光雷达在 2007 年 7 月 30 号晚上进行水汽测量时水汽分子和氮气拉曼散射回波信号不确定度表示。可以看出由于水汽拉曼信号较

氮分子信号弱,因此水汽拉曼散射回波信号的不确定度比氮分子拉曼散射回波信号不确定度大,如右图所示为激光雷达回波信号不确定度示意图,可以看出在探测距离为 1km 范围内,回波信号不确定度小于 10%。通过延长光子计数器脉冲累计时间以及增大激光器发射功率以及接收望远镜面积等方法采集更多的拉曼信号光子,可降低回波信号的不确定度,提高激光雷达测量精度。

大气透过率修正函数的相对不确定度 $\delta T/T$ 值的确定可由探测二氧化碳拉曼激光雷达类似的方法进行处理。参考第六章第四节中的内容可直接对探测水汽拉曼激光雷达的大气修正函数相对不确定度进行模拟,在模拟过程中两拉曼波长取值为 $\lambda_1 = 386.7nm$ $\lambda_2 = 407.8nm$, 分别对应于氮气和水汽分子拉曼散射中心波长。如图 8.28 所示为三种大气模式下大气透过率不确定度表示,其中利用了美国中纬度标准大气模式、合肥地区实测不同天气情况下大气溶胶消光模式。可以看出在 1km 探测距离处不同模式下的影响分别为 0.5%, 0.25%, 0.75%, 因此水汽拉曼激光雷达受大气透过率修正项不确定度影响较小,可忽略这种影响。

激光雷达系统常数不确定度 $\frac{\delta C_w}{C_w}$ 可由下面的误差公式进行模拟计算:

$$(\delta C_w)^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (C_{wi} - \bar{C}_w)^2 \quad (8.25)$$

N 代表总的定标次数,在上述定标过程中 N 值为 4, C_{wi} 是每次对比后得到准定标常数值, $\bar{C}_w$ 是所有准定标常数的平均值,将各个参量值带入后得出经上述定

标方法定标得出的系统常数的误差 $(\frac{\delta C_w}{C_w}) = 3.5\%$ 。如上文所述,采用同样的方法

在不同时间内对激光雷达系统常数进行多次定标,可得到一系列的激光雷达系统常数,利用误差分析公式对一定时间段(4个月)内雷达系统常数误差进行模拟,得出雷达系统常数误差小于 4.9%。根据误差传递公式将上述三种误差进行综合考虑后得到水汽拉曼激光雷达探测水汽测量误差随高度分布如图 8.29 所示,可以看出水汽拉曼激光雷达在 1.0km 范围内探测误差小于 10%,具有较高测量精度,能实现水汽分布的实时测量。

第九章 总结与展望

论文主要对探测低空二氧化碳和水汽含量分布的拉曼激光雷达进行了详细的介绍,包括该系统的研制目标、设计思路 and 关键技术,拉曼激光雷达的总体结构、技术参数及各单元结构、信号采集与控制软件,测量方法、操作步骤和数据处理方法等,并对拉曼激光雷达对合肥地区二氧化碳含量实验测量的典型结果以及系统误差进行了分析和讨论,基于激光雷达信噪比的分析讨论,对测量二氧化碳拉曼激光雷达的探测性能进行了模拟,给出了不同天气状况及不同工作状态下拉曼雷达的探测性能参数。在 AML-2 车载测污激光雷达的基础上,对原有系统进行稍许改进,基于拉曼散射原理,实现了 AML-2 车载测污激光雷达近地面水汽含量的三维扫描测量功能,并提出了水汽扫描拉曼激光雷达的新的定标方法。

一、本论文主要完成了以下工作:

1、完成了大气二氧化碳测量拉曼散射激光雷达的研制。该激光雷达具有低空二氧化碳含量分布探测功能,实现了对低空二氧化碳浓度变化的夜晚测量,系统采用 Nd:YAG 激光器的三倍频光 (354.7nm) 作为激发光源,选用在大气中含量稳定的氮气拉曼信号作为参考信号,并采用光子计数技术,能够有效地采集到微弱的二氧化碳拉曼后向散射回波信号。

2、在原有的探测二氧化碳实验草台基础上,通过技术改进提高拉曼激光雷达的探测性能,并增加了拉曼激光雷达的三维扫描功能,能够实验二氧化碳含量分布的三维扫描测量。

3、完成了拉曼激光雷达系统工作前的光路调试和检测工作,利用自动对光系统对发射接收光路进行调试,提高了光路准直度,减小了人工调试带来的主观影响,降低了调试误差。同时验证了光学系统设计的合理性和光学机械结构的稳定性。

4、讨论了拉曼激光雷达测量的信号反演方法,利用 Visual Basic6.0 计算机语言编制了探测二氧化碳拉曼激光雷达信号处理软件,能够迅速有效地对采集到的回波信号进行分析计算并得到二氧化碳含量分布结果。

5、开展了利用氮气拉曼散射信号反演气溶胶消光系数的研究,实现了测量

大气二氧化碳浓度测量的同时能够对气溶胶消光数据进行反演,并编写了数据处理软件,能够实现信号的方便快速处理,得到大气气溶胶消光系数的分布,并对氮气反演气溶胶消光系数的不确定度进行了理论分析,给出了反演测量误差。

6、基于拉曼雷达信噪比公式,对探测二氧化碳拉曼激光雷达的探测性能进行了模拟计算,对影响拉曼激光雷达探测性能的几个因素进行分析,给出了不同天气状况和不同工作状态下的拉曼雷达的探测性能指标,实现了拉曼激光雷达的性能标定。

7、对不同天气状况下大气透过率修正项进行模拟计算,并分析了大气透过率修正项对拉曼激光探测二氧化碳浓度值带来的影响。

8、利用拉曼激光雷达对合肥地区低空二氧化碳进行了实验测量,并积累了大量实验数据,初步总结出二氧化碳含量分布的夜变化特征及水平和垂直空间变化特征。

9、增加了 AML-2 车载测污激光雷达探测近地面水汽的功能,对车载测污激光雷达进行少许改进,实现了利用拉曼散射原理测量近地面水汽分布的功能,并对水平方向和垂直方向水汽分布进行了实际测量。

10、针对 AML-2 车载激光雷达具有三维扫描的功能,将水平方向测量的水汽分布结果与垂直方向测量的分布结果相结合,提出了一种新的简便的扫描拉曼激光雷达定标方法,该方法能够实现车载水汽拉曼激光雷达的简单定标,经过四个月时间的连续实验,充分验证了该方法的可靠性。

11、开展了无线电探空仪对比实验,激光雷达与探空仪结果显示出较好的一致性,充分验证了该定标方法切实可行。

12、基于误差分析理论对二氧化碳和水汽拉曼激光雷达的测量误差进行了分析讨论,给出了回波信号不确定度、大气透过率修正项不确定度以及定标常数不确定度值的模拟分析结果。

二、论文的主要创新点:

1、设计并完成了拉曼激光雷达的研制,实现了利用激光雷达对大气二氧化碳含量分布进行测量的目标,并对实验系统进行改进,增加其水平扫描功能,该拉曼激光雷达的实验测量成功,在对大气二氧化碳含量测量领域尚属首次,具有一定的实践创新性。

2、克服了激光雷达几何因子对探测近端数据影响难点问题,实现了近端二氧化碳和水汽拉曼数据的有效采集,得到了近端 CO₂ 和水汽分布的测量结果。

3、对探测二氧化碳拉曼激光雷达的探测性能进行了模拟分析,给出了不同天气状况以及不同工作方式下的拉曼雷达的探测性能指标参数,并分析了影响拉曼激光雷达探测性能的主要影响因素。

4、考虑分析了大气透过率修正项在不同大气模式下对探测结果的误差影响,给出了不同模式下探测结果的修正量的具体参考值。

5、对 AML-2 车载测污激光雷达的探测功能进行扩展,基于拉曼散射原理,实现了车载激光雷达测量近地面水汽混合比分布的功能,并可实现水汽混合比分布的三维扫描测量。

6、提出了车载水汽扫描拉曼激光雷达定标的新的简便方法,并对该方法进行了详细阐述,经过四个月的实验验证以及与无线电探空仪的对比实验,充分验证了定标方法的可行性与可靠性。

三、论文存在不足及下一步打算:

二氧化碳和水汽拉曼雷达的研制完成并进行了原理性实验,得到初步的实验结果,但还存在诸多不完善的地方,正是下一步工作努力的方向:

1、由于拉曼回波信号十分微弱,背景噪声干扰十分明显,目前拉曼雷达仅集中于晚上进行实验,不能对二氧化碳进行全时段测量,这对拉曼雷达的应用十分不利,应进一步调研,改进测量方法和信号处理方法,逐步实现二氧化碳的全天候测量。

2、进一步提高拉曼雷达的探测精度。拉曼雷达测量过程中系统误差、各种光学、电子学噪声对信号的影响十分明显,虽经各种技术处理,仍不能完全消除。设计合理的噪声监测方法,有效的检测出各种噪声是提高探测精度的关键。数据处理方法的改进也是提高探测结果精度的重要环节。

3、AML-2 车载测污激光雷达上增加了水汽近地面测量功能,但是在进行水汽测量的同时原有的探测功能受到一定的限制,今后应进行几种测量功能的协调,保证各种测量之间不相互影响,同时充分发挥车载可移动的优势,进行野外实验,验证雷达系统的稳定性。

4、拉曼雷达的系统化、自动化及小型化也需进一步提高。