

大气水汽探测地基差分吸收激光雷达 系统设计与性能仿真*

葛焱¹⁾ 舒嵘¹⁾ 胡以华^{1)2)†} 刘豪¹⁾

1) (中国科学院上海技术物理研究所, 中国科学院空间主动光电技术重点实验室, 上海 200083)

2) (解放军电子工程学院, 脉冲功率激光技术国家重点实验室, 合肥 230037)

(2014年4月22日收到; 2014年5月8日收到修改稿)

为持续获得对流层低层高精度、高时空分辨率的水汽浓度分布数据, 提出了一套改进的大气水汽探测地基差分吸收激光雷达系统方案. 详细描述了系统主要组成部分, 对主要误差进行了分析与估计, 并提出了一种差分吸收截面实时测量装置用于补偿发射激光器带来的测量误差. 针对该系统, 并结合上海地区不同季节的水汽浓度状况, 对 935 nm 水汽吸收带中四个水汽吸收峰的差分光学厚度、雪崩二极管的倍增系数 M 与回波信噪比的关系、水汽浓度随机测量误差等进行了详细的仿真与分析. 仿真结果表明, 根据不同的季节和天气状况, 可以选择不同的吸收峰以达到最佳探测效果; 在 300—5000 m 高度范围内, 最大可以达到 300 m 的垂直分辨率与 5 min 的时间分辨率, 水汽浓度随机测量误差不超过 18%.

关键词: 差分吸收激光雷达, 差分吸收截面, 性能仿真, 波长选择**PACS:** 43.28.Vd, 42.68.Ca, 42.68.Wt**DOI:** 10.7498/aps.63.204301

1 引言

水汽是一种非常重要的温室气体, 它在大气中的很多物理与化学过程中担任了重要的角色. 另外, 水汽是大气中惟一能发生相变的成分, 在水相变化过程中不断释放或吸收热量, 对地面和空气的温度影响很大. 因此, 持续获得对流边界层高精度、高时空分辨率的水汽浓度分布数据对于研究水循环和大气潜热通量廓线有重要意义^[1]. 但是目前的测量手段都存在一定的局限性, 例如地基探测塔仅能获得地面固定点的数据; 探空气球虽然可以获得一定高度范围内的水汽分布数据, 但是受成本、天气等多方面因素的限制无法实现连续观测^[2]; 红外与微波的被动探测计的空间分辨率达不到要求^[3,4]; 地基 GPS 在底层大气的探测误差较大^[5]; 拉曼水汽探测激光雷达是一种较先进的探测方法, 但是其回

波信号弱, 在白天背景光很强时测量精度会显著降低, 不能获得有效的数据^[6-8].

差分吸收激光雷达 (differential absorption lidar, DIAL) 是从 20 世纪 70 年代开始发展的一种能对各种微量气体进行主动探测的先进技术^[9]. 利用两个很接近的波长同时探测, 可以将相关的干扰量差分掉并反演出被测气体的浓度分布. 该系统具有自校准性, 不易受外界干扰; 而且其回波信号由米散射和瑞利散射组成, 相比于拉曼散射回波信号较强, 结合一些降噪技术在白天也能够达到较高的探测精度.

美国、法国和德国都已经建立了可以运行的基于 DIAL 技术的水汽探测地基和机载系统^[10-12]. 上海技术物理研究所的刘豪等^[13]研制了一套基于差分吸收原理的二氧化碳连续波测量系统, 但是目前国内在水汽脉冲光探测系统方面的研究基本处于空白状态.

* 民用航天“十二五”预先研究项目 (批准号: MYHT-201104) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: yh_hu@263.net

本文提出了一种地基水汽探测 DIAL 系统方案, 可以用于测量对流层底层的水汽浓度分布, 并对系统的性能进行了详细的仿真与分析.

2 系统设计

本系统是一种地基水汽探测差分吸收激光雷达, 图 1 所示是其总设计框图, 表 1 是其主要技术参数.

2.1 激光发射

系统的发射部分主要由 Nd:YAG 激光器、种子激光器和光学参量振荡器 (optical parametric oscillator, OPO) 组成. 种子注入的 Nd:YAG 激光器 (型号为 Continuum surelite-EX) 以 10 Hz 的重

频输出窄线宽 1064 nm 的脉冲光, 通过倍频晶体后大约有 50% 的能量转换为 532 nm 脉冲光用于抽运 OPO. 采用两台分布反馈式 (distributed feed back, DFB) 激光器作为种子激光器, 输出连续光波长分别位于水汽吸收峰上和吸收峰外侧, 前者称为峰尖波长 λ_{on} , 后者称为峰外波长 λ_{off} ; 为了实现 OPO 输出波长在 λ_{on} 和 λ_{off} 之间的交替切换, 两路种子光通过一个 2×1 的光开关后注入到 OPO 中, 需要使用单模保偏光纤和半波片来保证抽运光和种子光的偏振匹配. 如图 1 所示, OPO 由四面镜子组成的环形腔和非线性晶体 KTP (磷酸钛氧钾) 组成, 在其中一面镜片上装有压电陶瓷用于控制环形腔的腔长, 使其与种子注入光的波长满足一定的匹配关系.

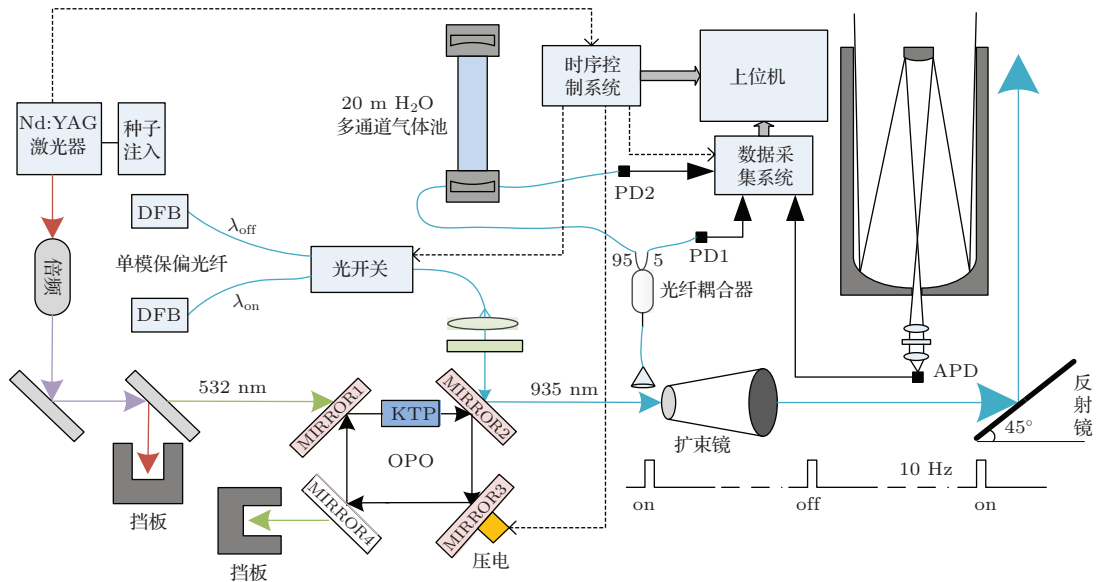


图 1 大气水汽探测地基差分吸收激光雷达系统设计框图

表 1 系统各参数汇总

发射部分		接收部分	
参数	数值	参数	数值
输出功率 (935 nm)/mJ	60	接收口径/mm	305
发散角 (935 nm)/mrad	1	接收视场/mrad	2
脉冲重复频率/Hz	10	滤光片带宽 (白天)/nm	1
脉冲宽度 (935 nm)/ns	4.5	滤光片带宽 (夜晚)/nm	8
线宽 (935 nm)/MHz	200	数字采集卡	100 M/14 Bit
光谱纯度 (935 nm)	> 99.5%	探测器光敏面直径/mm	4
频率稳定度 (935 nm)/MHz	50	响应度 (935 nm, $M = 100$)/A·W ⁻¹	65
指向稳定度/ μ rad	± 50	暗电流 ($M = 100$)/nA	10

在底层大气中,水汽吸收峰的宽度一般为 10 pm 左右;在对流层顶,由于压力的减小与温度的降低,吸收峰宽度减小到 5 pm 左右. 为了保证足够高的测量精度,对峰尖波长的线宽和频率稳定性有很高的要求. 因此这里采用种子注入的 Nd:YAG 激光器作为抽运源,其线宽大约为 150 MHz;峰尖波长种子激光器采用主动稳频技术,利用低压水汽光纤气体池作为频率参考,将波长稳定在水汽吸收峰上,如图 2 所示,稳频后在一小时内频率抖动的峰峰值约为 50 MHz;峰外波长种子激光器对波长稳定度要求不高,只需采用被动稳频技术;利用种子注入技术,使得 OPO 出射脉冲光的波长与种子光保持一致,其线宽小于 200 MHz.

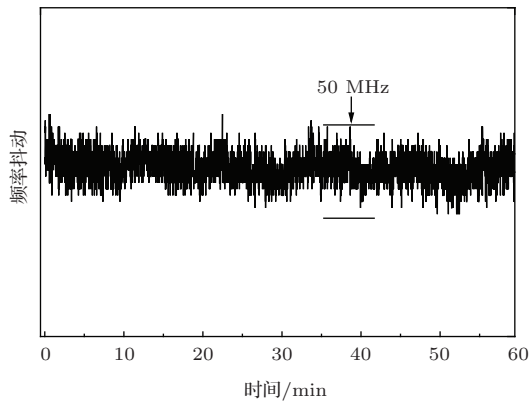


图 2 主动稳频后峰尖波长的频率抖动

根据 HITRAN 数据库,得到夏季时中纬度地区海拔分别为 0 和 5 km 的 935 nm 附近的水汽吸收谱线,如图 3 所示. 我们选择了四个吸收峰 $\lambda_{on1} = 935.450$ nm, $\lambda_{on2} = 935.561$ nm, $\lambda_{on3} = 935.776$ nm, $\lambda_{on4} = 935.906$ nm 作为峰尖波长,在紧邻的地方选择 $\lambda_{off} = 935.412$ nm 作为峰外波长.

OPO 输出的信号光通过扩束镜后打到一面反射镜上,通过反射镜的二维调节来实现发射光和接收望远镜的准直.

2.2 接收光学和数据采集

采用口径为 305 mm、焦距为 3048 mm 的卡塞格林望远镜接收后向散射信号. 为了在白天背景光很强的情况下工作,在望远镜后端加入了滤光片光路,由准直镜、窄带滤光片 (FWHM = 1 nm) 和会聚镜组成;回波光电探测器是直径为 4 mm 的雪崩光电二极管 (APD);回波电信号通过数字采集卡 (100MSPS/14Bit) 数字化后上传到上位机,理论上

距离分辨率达到了 1.5 m,远远大于实际的需求.

2.3 差分吸收截面测量

为了补偿由于发射激光的频率漂移、线宽和光谱纯度带来的误差,加入了一个实时差分吸收截面测量系统. 通过光纤准直器将一小部分发射光耦合入光纤,再利用 95 : 5 的保偏光纤分路器把光分成两束,一束通过 20 m 长的水汽多通道气体池后用高速光电二极管探测电路 PD1 接收,另一束直接用 PD2 接收作为参考. 最后通过双通道高速数字采集卡 (1GSPS/12Bit) 将两个探测器的电信号数字化后上传到上位机.

2.4 时序控制与上位机

整个系统采用 Nd:YAG 激光器输出的 Q 开关信号作为同步信号,通过系统时序控制电路,使得光开关、OPO 腔长锁定的压电陶瓷和数据采集系统按照特定的时序工作. 上位机采用 LabView 编写,用于接收数据采集系统上传的数据,并进行水汽浓度廓线实时反演和显示.

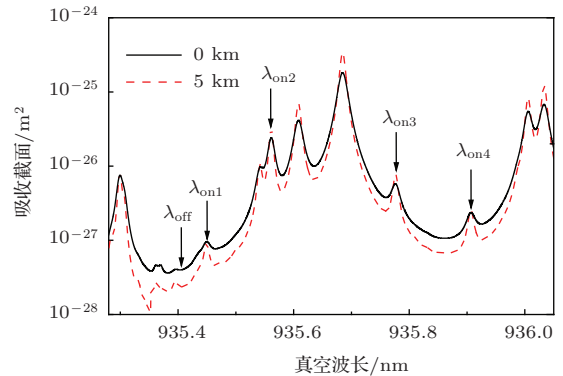


图 3 水汽吸收谱线

3 水汽浓度反演算法

根据基本的激光雷达方程,大气后向散射信号的能量可以表示为

$$P(\lambda, R) = P_L \frac{c\tau_L}{2} \frac{A}{R^2} \eta(\lambda, R) \beta(\lambda, R) \times \exp \left[-2 \int_0^R \alpha(\lambda, r) dr \right], \quad (1)$$

式中 $P(\lambda, R)$ 是距离为 R 处的回波功率, λ 是发射光的波长, R 是接收距离; P_L 是发射光功率, c 是空气中光速, τ_L 是激光脉冲宽度, A 是接收望远镜的有效面积, $\eta(\lambda, R)$ 是系统光学效率, $\beta(\lambda, R)$ 和

$\alpha(\lambda, R)$ 分别是距离为 R 处的总后向散射系数和总消光系数。

由于 λ_{on} 和 λ_{off} 差别非常小, 可以认为两个波长在大气中的传输特性基本一致, 其他气体和气溶胶等因素对它们的影响相同, 系统光学效率也相同, 因此认为 $\eta(\lambda_{on}, R) \approx \eta(\lambda_{off}, R)$, $\beta(\lambda_{on}, R) \approx \beta(\lambda_{off}, R)$, $\alpha(\lambda_{on}, r) - \alpha(\lambda_{off}, r) \approx \rho(H_2O, r)\Delta\sigma$. 从 (1) 式可以推导出:

$$\rho(H_2O, R) = \frac{1}{2\Delta R\Delta\sigma} \ln \left[\frac{P(\lambda_{on}, R)}{P(\lambda_{on}, R + \Delta R)} \times \frac{P(\lambda_{off}, R + \Delta R)}{P(\lambda_{off}, R)} \right], \quad (2)$$

式中 $\rho(H_2O, R)$ 为距离 R 到 $R + \Delta R$ 之间的水汽平均浓度, ΔR 是距离分辨率; $\Delta\sigma$ 为差分吸收截面, 也就是峰尖波长和峰外波长的水汽吸收截面的差值. 反演水汽浓度需要知道等式右边各参数的数值. 回波能量 P 可以通过测量获得; 距离分辨率 ΔR 是根据不同情况而选取的反演参数; 差分吸收截面 $\Delta\sigma = \sigma_{on} - \sigma_{off}$, 可以通过查找 HITRAN 数据库获得, 但是由于发射激光的频率漂移、线宽和光谱纯度等因素的影响, 实际的吸收截面 (特别是 σ_{on}) 与数据库中的值有一定的差别, 这就会直接给反演结果带来误差. 为了消除该误差的影响, 我们在系统中加入一个基于多通道气体池的差分吸收截面实时测量装置, 下面是其测量原理.

气体分子对光的吸收遵循 Beer-Lambert 定理, 则可以得到

$$I_2(\lambda) = k \times I_1(\lambda) \exp\{-[\sigma(\lambda) - \varepsilon_R(\lambda) - \varepsilon_M(\lambda)]nL\}, \quad (3)$$

式中 $I_1(\lambda)$ 和 $I_2(\lambda)$ 分别是高速探测器 PD1 和 PD2 探测到的能量; k 是两通道间的比例常数, 综合了两个通道的分光比、光路损耗和探测器增益差异等因素的影响; λ 是入射光波长; $\sigma(\lambda)$ 是波长对应的吸收截面, 单位为 $\text{cm}^2/\text{molecule}$; $\varepsilon_R(\lambda)$ 和 $\varepsilon_M(\lambda)$ 分别是瑞利散射系数和米散射系数; n 是单位体积内吸收气体的分子数密度, 单位是 $\text{molecules}/\text{cm}^3$; L 为光通过多通道气体池的吸收气体长度.

同样由于 λ_{on} 和 λ_{off} 差别非常小, 可以忽略除吸收截面不同以外其他因素的差异, 则从 (3) 式可以推导出:

$$\Delta\sigma \approx \frac{1}{nL} \ln \left[\frac{I_2(\lambda_{off}) I_1(\lambda_{on})}{I_1(\lambda_{off}) I_2(\lambda_{on})} \right], \quad (4)$$

通过上式可以计算出差分吸收截面 $\Delta\sigma$, 该结果是在气体池中获得的, 还需要结合地面温度和压力

测量数据进行校正 [14,15]. 整个反演计算流程如图 4 所示.

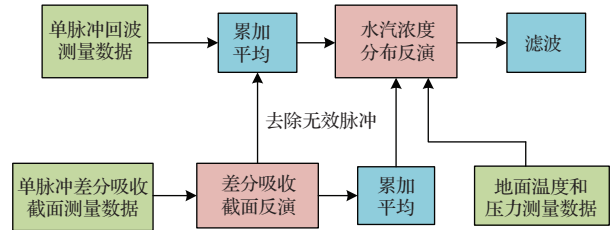


图 4 水汽浓度反演计算流程

4 水汽浓度探测性能分析与仿真

4.1 发射参数与探测性能的关系

差分吸收截面受发射激光的频率抖动、线宽和光谱纯度的影响. 本系统光谱纯度大于 99.5%, 在 5 km 以下区域带来的随机误差小于 3%; 在 5 km 以上区域, 由于水汽的光学厚度变小, 误差也降低至 1%—2% [12]. 本系统发射激光的线宽大约为 200 MHz, 根据 HITRAN 数据得到的水汽吸收光谱, 可以得出在 5 km 高度处其带来的随机误差小于 1%; 峰尖波长通过主动稳频技术稳定在水汽的吸收峰上, 频率抖动在 50 MHz 以内, 在 5 km 高度处带来的随机误差同样小于 1%. 如果认为这些误差之间是相互独立的, 则在底层大气层中, 发射激光带来的总随机误差小于 3.3%. 通过上文描述的差分吸收截面实时测量装置, 基本上可以消除该部分误差. 事实上, 该装置还能够实时监视数据的有效性, 去除一些无效脉冲 (例如偶然出现的 OPO 腔长失匹配现象).

4.2 接收采集参数与探测性能的关系

对于旁轴系统, 望远镜的接收视场与发射激光的光斑的重叠面积比例称为重叠因子, 它是接收距离、激光发散角、望远镜接收视场角和两轴 (激光与望远镜) 间距离的函数, 本系统的重叠因子仿真结果如图 5 所示.

由于峰尖波长和峰外波长是间隔发射的, 即使是从同一个 OPO 中发出, 出射角度也会存在一定的偏差, 这会引起重叠因子小于 1 的距离范围内的随机误差. 结合文献 [16] 中的分析结果, 在本系统中, $\pm 50 \mu\text{rad}$ 的指向稳定度在距离为 200—500 m 之间会带来最大 15% 的随机误差.

数字采集部分的误差主要由数字采集卡的量化误差和非线性、背景噪声的估计偏差组成. 在回波信号的信噪比较高时, 此误差基本可以忽略; 但是在回波信号信噪比很低时, 此误差将带来较大的影响, 其中包括绝对误差和随机误差. 目前无法对此部分误差进行精确的仿真和估计, 有待在实验中进一步研究.

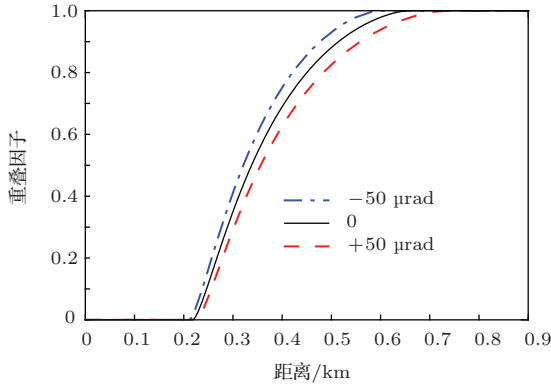


图5 不同激光出射角度与重叠因子的关系

4.3 大气参数与探测性能的关系

水汽的吸收截面会受压力与温度的影响, 因此大气不同高度处的温度与压力的不确定性会给反演带来误差. 前人对此误差做了很多详细的理论分析和实验^[14,15]. 在低空的高压区域, 压力引起的碰撞展宽起主导作用, 一般认为标准大气模型中大气密度的误差小于3%^[17], 通过测量地面的压力, 可以将压力的影响减小到1%以下. 在低压区域, 温度引起的多普勒展宽开始起主导作用, 如果认为温度的误差在±2 K以内, 在935 nm附近由于温度引起的误差同样小于1%.

压力还会导致吸收谱线的中心波长产生偏移, 但其影响非常小, 例如935.450 nm处的漂移系数为-0.1 pm/atm, 基本可以忽略.

大气的后向散射主要由分子瑞利散射和气溶

胶米散射组成, 由于多普勒效应, 分子瑞利散射会展宽回波光谱, 给反演带来误差. 在不同的天气和高度, 气溶胶浓度的变化很大, 因此瑞利散射信号在总散射信号中所占的比例也不同. 为了提高反演精度, 需要根据不同的散射比例进行校正^[18]. 在底层大气中, 气溶胶浓度较大, 瑞利-多普勒效应带来的误差并不明显, 在10 km以下区域一般小于1.5%^[19].

后向散射信号中还有一小部分为拉曼散射信号, 但不同于弹性散射信号, 拉曼散射信号会发生一定的频移. 在没有滤光片的情况下, 拉曼散射带来的系统误差能达到10%左右^[19], 因此在夜晚也需要窄带滤光片, 相比于白天1 nm带宽的滤光片, 夜晚只需要8 nm的带宽即可.

大气中主要有氧气、氮气、二氧化碳、水汽、臭氧和其他微量气体, 在选择激光波长时需要避免非测量气体的吸收. 通过HITRAN数据可以看出, 在935 nm波段只存在水汽的吸收峰, 可以排除其他气体分子吸收的影响.

4.4 回波噪声与探测性能的关系

回波信号中的噪声主要由大气背景噪声和探测器的噪声组成. 夜晚时大气背景辐射功率基本为零; 白天时望远镜接收到的背景辐射功率为

$$P_b = S_b \pi \left(\frac{\gamma}{2} \right)^2 \Delta \lambda A T_0, \quad (5)$$

式中 S_b 是天空背景辐射光亮度, 在930 nm波段一般取 $3 \times 10^{-3} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{nm})$ ^[20]; γ 是望远镜的接收视场角; $\Delta \lambda$ 是滤光片的带宽, A 是望远镜的有效接收面积, T_0 是接收系统的光学效率.

APD探测器的噪声主要由量子噪声、暗电流噪声、倍增噪声和负载电阻热噪声组成. 如果认为各噪声相互独立, 则探测器输出的电压信噪比可以表示为^[21]

$$\text{SNR} = \frac{[P_\lambda(z)R^*(\lambda)]^2 M^2}{2q(P_\lambda(z)R^*(\lambda) + P_b R^*(\lambda) + I_D)M^2 F(M)\Delta f + 2qI_L \Delta f + \frac{4k_b T \Delta f}{R_L}}, \quad (6)$$

式中 $P_\lambda(z)$ 是距离为 z 处的散射回波信号功率; $R^*(\lambda)$ 是探测器在波长为 λ 处的响应度($M = 1$); M 是APD的倍增系数; $F(M)$ 是过剩噪声因子; Δf 是探测器电路的带宽; I_D 是APD的初级体暗

电流; I_L 是APD的表面暗电流; R_L 是负载电阻值; T 是环境温度; q 是常量, 取 $1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$; k_b 是常量, 取 $1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$.

通过(6)式可以看出, 回波的信噪比与倍增系

数 M 有关, 选择一个合适的 M 值可以提高信噪比. 图 6 是不同情况下倍增系数 M 与信噪比的关系曲线.

根据 (2) 式的推导结果, 忽略式中各量的相关性 (事实上峰尖波长和峰外波长的回波不是完全独立的, 距离为 R 处的回波和距离为 $R + \Delta R$ 处的回波也不是完全独立的. 但目前无法准确估计它们之间的相关性, 而且前者与后者之间是互相抵消的关系, 因此选择忽略它们的相关性), 则可得到水汽浓度相对测量误差为

$$\frac{\sigma[\rho(\text{H}_2\text{O}, R)]}{\rho(\text{H}_2\text{O}, R)} = \frac{1}{2\Delta\tau_d} \left(\sum_{\substack{i=1,2 \\ j=1,2}} \frac{1}{\text{SNR}_{i,j}^2} \right)^{1/2}, \quad (7)$$

式中 $\Delta\tau_d = \rho(\text{H}_2\text{O}, R)\Delta R\Delta\sigma$ 是厚度为 ΔR 的散射单元的差分光学厚度, 与距离分辨率、水汽浓度和差分吸收截面有关; $\text{SNR}_{i,j}$ 表示对应回波信号的电压信噪比; $i = 1, 2$ 分别表示峰尖波长和峰外波长; $j = 1, 2$ 分别表示回波距离为 R 和 $R + \Delta R$.

4.5 峰尖波长与探测性能的关系

在选择峰尖波长时, 存在一个矛盾: 强吸收谱线能够带来更高的探测灵敏度与距离分辨率; 但同时会使得回波衰减变大, 导致远场的回波信噪比降低, 测量误差反而增加. 大气中的水汽浓度状况与地区、季节和天气状况密切相关, 它也影响峰尖波长的选择, 在浓度低的情况下需要使用较强的吸收峰; 在浓度高的情况下则需要使用较弱的吸收峰. 因此为了选择合适的探测波长, 结合上海地区夏季和冬季的水汽浓度状况, 进行了详细的仿真分析.

一般将单程差分光学厚度定义为

$$\tau_d = \int_0^R \Delta\sigma N(r) dr, \quad (8)$$

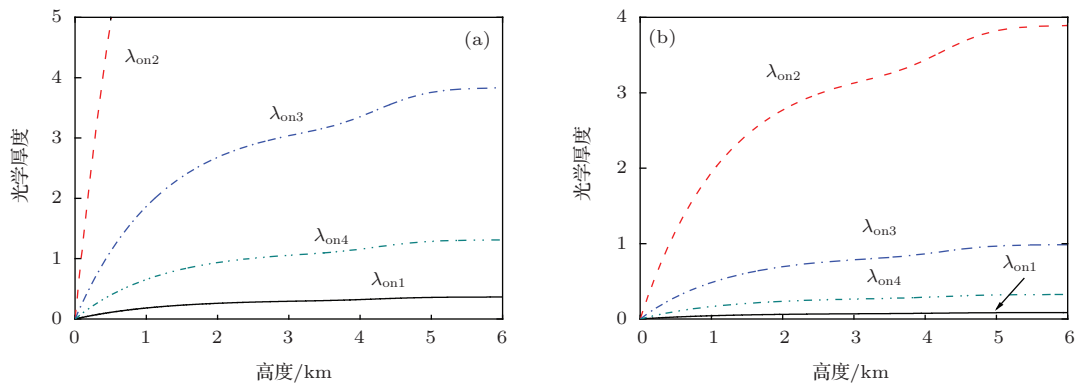


图 7 (a) 上海地区夏季各波长的差分光学厚度; (b) 上海地区冬季各波长的差分光学厚度

式中 R 为预期的最大探测距离, $N(r)$ 是距离为 r 处的气体浓度, $\Delta\sigma$ 是差分吸收截面. 合适的差分光学厚度范围为 $0.3 < \tau_d < 1.5$. 在夜晚, 背景辐射噪声很小, τ_d 大约取 1.1 为最佳值; 在白天, 背景辐射噪声较大, τ_d 大约取 0.55 为最佳值 [22,23].

根据图 3 中的水汽吸收谱线, 利用美国标准大气模型, 对上海地区夏季和冬季晴天状况下各波长组合的差分光学厚度分别进行了仿真分析, 结果如图 7 所示.

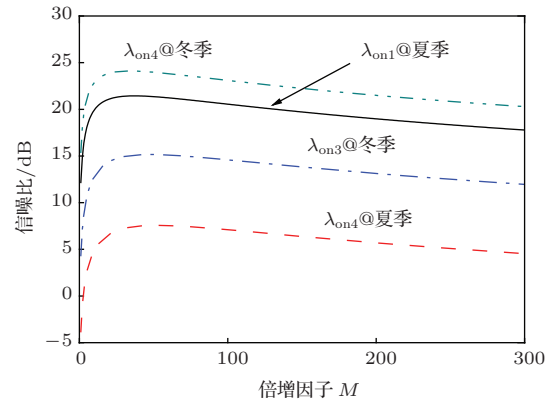


图 6 倍增系数 M 与回波信噪比 (@5 km) 的关系

通过增加 ΔR (降低距离分辨率) 和脉冲累积时间 Δt (降低时间分辨率), 能够减小相对误差. 它们之间的关系为 [19]

$$\frac{\sigma[\rho(\text{H}_2\text{O}, R)]}{\rho(\text{H}_2\text{O}, R)} \propto (\Delta t)^{-1/2} (\Delta R)^{-3/2}. \quad (9)$$

随着探测高度的增加, 水汽浓度会随之降低, 在 $\Delta\tau_d$ 不变的情况下, 距离分辨率 ΔR 会降低. 分别取脉冲累积时间 Δt 和散射单元的差分光学厚度 $\Delta\tau_d$ 为 5 min 和 $\tau_d/20$, 结合上文对本系统测量误差的分析, 得到不同探测波长在不同高度上的水汽浓度探测相对误差, 结果如图 8 所示.

结合图7和图8的仿真结果可以看出,夏季时在5 km处 λ_{on1} 和 λ_{on4} 的差分光学厚度分别为0.36和1.28,夜晚时 λ_{on4} 的相对探测误差明显小于 λ_{on1} ;白天时,随着高度的增加,回波信噪比越来越低, λ_{on4} 的相对探测误差也逐渐超过了 λ_{on1} .冬

季时在5 km处 λ_{on3} 和 λ_{on4} 的差分光学厚度分别为0.97和0.32,夜晚时 λ_{on3} 的相对探测误差明显小于 λ_{on4} ;白天时, λ_{on3} 的相对探测误差也小于 λ_{on4} ,但随着高度的增加,前者明显有超过后者的趋势.这与文献[22, 23]中的结论完全符合.

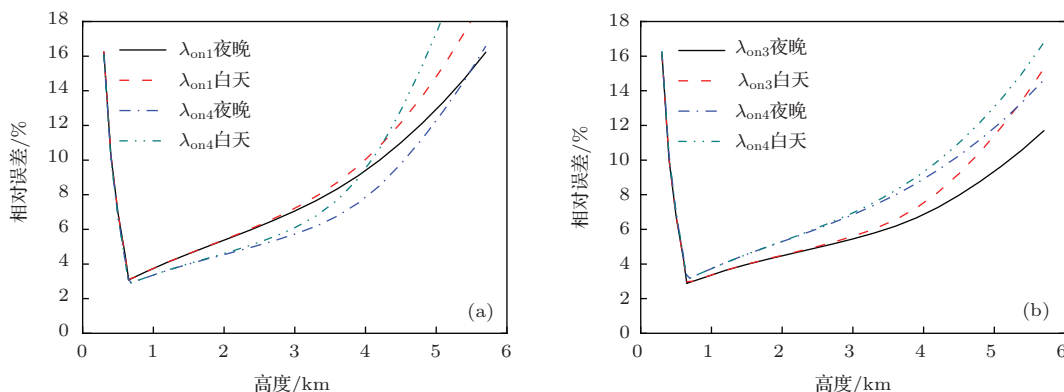


图8 上海地区夏季和冬季时不同高度上水汽浓度探测相对误差的仿真结果 (a) 夏季; (b) 冬季.

综上所述,935 nm附近三个较弱的吸收峰 λ_{on1} , λ_{on3} 和 λ_{on4} 适用于上海地区的地基水汽探测差分吸收激光雷达系统,可以根据不同季节与天气状况,选择不同的峰尖波长以达到最佳的探测效果,水汽浓度测量误差不超过18%.

5 结 论

本文提出一种地基水汽探测DIAL系统,详细描述了系统的各组成部分和主要技术参数,分析和估计了系统的主要探测误差,并提出了一种实时差分吸收截面测量装置,用于补偿发射激光器带来的测量误差.结合上海地区不同季节的水汽浓度状况,针对935 nm附近四个水汽吸收峰进行了详细的仿真,包括差分光学厚度、APD的倍增系数 M 与信噪比的关系和不同高度上的水汽浓度探测误差.仿真结果表明,在夏季水汽浓度较高时,应采用弱吸收峰935.450和935.906 nm进行探测,夜晚后者的探测误差小于前者,白天前者在远处的探测误差小于后者;在冬季水汽浓度较低时,应采用较强的吸收峰935.776 nm进行探测.在实验中,可以根据不同季节与天气状况,选择不同的峰尖波长以达到最佳的探测效果.在300—5000 m的高度范围内,最大可以达到300 m的垂直分辨率与5 min的时间分辨率,水汽浓度测量误差不超过18%.

参考文献

- [1] Kiemle C, Brewer W A, Ehret G, Hardesty R M, Fix A, Senff C, Wirth M, Poberaj G, LeMone M A 2007 *J. Atmos. Oceanic Technol.* **24** 627
- [2] Elliott W P, Gaffen D J 1991 *B. Am. Meteorol. Soc.* **72** 1507
- [3] Huang Y F, Dong C H 2002 *Meteorol. Sci. Technol.* **30** 24 (in Chinese) [黄意玢,董超华 2002 气象科技 **30** 24]
- [4] Wei C, Xue Y K, Zhu X M, Zou S X 1984 *Chin. J. Atmos. Sci.* **8** 418 (in Chinese) [魏重,薛永康,朱晓明,邹寿祥 1984 大气科学 **8** 418]
- [5] Li G P 2007 *Ph. D. Dissertation* (Xian: Southwest Jiaotong University) (in Chinese) [李国平 2007 博士学位论文(西安:西南交通大学)]
- [6] Yin Q W 2011 *M. S. Dissertation* (Qingdao: Ocean University of China) (in Chinese) [尹祺巍 2011 硕士学位论文(青岛:中国海洋大学)]
- [7] Li T, Qi F D, Yue G M, Jin C J, Hu H L, Zhou J 2000 *Chin. J. Atmos. Sci.* **24** 843 (in Chinese) [李陶,戚福第,岳古明,金传佳,胡欢陵,周军 2000 大气科学 **24** 843]
- [8] Wang H W, Hua D X, Wang Y F, Gao P, Zhao H 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 120701 (in Chinese) [王红伟,华灯鑫,王玉峰,高朋,赵虎 2013 物理学报 **62** 120701]
- [9] Grant W B 1991 *Opt. Eng.* **30** 40
- [10] Higdon N S, Browell E V, Ponsardin P, Grossmann B E, Butler C F, Chyba T H, Mayo M N, Allen R J, Heuser A W, Grant W B, Ismail S, Mayor S D, Carter A F 1994 *Appl. Opt.* **33** 6422
- [11] Bruneau D, Quaglia P, Flamant C, Meissonnier M, Pelon J 2001 *Appl. Opt.* **40** 3450
- [12] Poberaj G, Fix A, Assion A, Wirth M, Kiemle C, Ehret G 2002 *Appl. Phys. B* **75** 165

- [13] Liu H, Shu R, Hong G L, Zheng L, Ge Y, Hu Y H 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 104214 (in Chinese) [刘豪, 舒嵘, 洪光烈, 郑龙, 葛焯, 胡以华 2014 物理学报 **63** 104214]
- [14] Korb C L, Weng C Y 1982 *J. Appl. Meteorol.* **21** 1346
- [15] Theopold F A, Bösenberg J 1993 *J. Atmos. Oceanic Technol.* **10** 165
- [16] Wulfmeyer V, Bösenberg J 1998 *Appl. Opt.* **37** 3825
- [17] Russell P B, Morley B M, Livingston J M, Grams G W, Patterson E M 1982 *Appl. Opt.* **21** 1541
- [18] Bösenberg J 1998 *Appl. Opt.* **37** 3845
- [19] Ismail S, Browell E V 1989 *Appl. Opt.* **28** 3603
- [20] Raymond M 1992 *Laser Remote Sensing: Fundamentals and Applications* (Malabar Florida: Krieger) p224
- [21] Sun J Q 1986 *Laser Atmospheric Detection* (Beijing: Science Press) p80 (in Chinese) [孙景群 1986 激光大气探测 (北京: 科学出版社) 第 80 页]
- [22] Ambrico P F, Amodeo A, Girolamo P D, Spinelli N 2000 *Appl. Opt.* **39** 6847
- [23] Remsberg E E, Gordley L L 1978 *Appl. Opt.* **17** 624

System design and performance simulation of ground-based differential absorption lidar for water-vapor measurements*

Ge Ye¹⁾ Shu Rong¹⁾ Hu Yi-Hua^{1)2)†} Liu Hao¹⁾

1) (Key Laboratory of Space Active Opto-Electronics Technology, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

2) (State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China)

(Received 22 April 2014; revised manuscript received 8 May 2014)

Abstract

In order to obtain water-vapor profiles in the lower troposphere with a high accuracy and a temporal-spatial resolution, an improved ground-based differential absorption lidar system for water-vapor measurements is demonstrated. The key components of the system and the errors possibly existing in the system are described in detail. A real-time differential absorption cross-section measurement device that can compensate for measuring error caused by laser transmitter is presented. Combined with the water-vapor concentrations of different seasons in Shanghai, the differential optical thickness, the relationship between the gain of avalanche photo-diodes and the signal to noise ratio of received signal, and the statistical error in detection of four absorption lines in the 935 nm H₂O absorption band are simulated in detail. The result shows that a particular absorption line can be selected, which depends on season and meteorological condition, to achieve the best outcome. With a time resolution of 5 min and a vertical resolution of 300 m, the statistical error of water vapor concentration is no more than 18% in a range of 300–5000 m.

Keywords: differential absorption lidar, differential absorption cross-section, performance simulation, wavelength selection

PACS: 43.28.Vd, 42.68.Ca, 42.68.Wt

DOI: 10.7498/aps.63.204301

* Project supported by the Civil Aerospace Pre-Research Program of “12th Five-Year” Plan of China (Grant No. MYHT-201104).

† Corresponding author. E-mail: yh_hu@263.net