

文章编号: 1001-3806(2004)05-0503-03

CO₂ 差分吸收激光雷达测量灵敏度的数值分析

尹世荣¹, 王蔚然¹, 李新山²

(1. 电子科技大学 电子工程学院, 成都 610054; 2. 成都军区 空军司令部, 成都 610041)

摘要: 针对直接探测长程 CO₂ 差分吸收激光雷达系统, 分析了对测量灵敏度产生影响的两个主要因素: 大气湍流和激光斑纹, 得到了测量灵敏度与大气湍流和激光斑纹之间关系的数值计算结果。结果表明, 在高度小于 350m 时, 增加设备离地高度可以有效地提高测量灵敏度; 在高度大于 350m 后, 改变系统参数可以有效地提高测量灵敏度。

关键词: 差分吸收激光雷达; 测量灵敏度; 大气湍流; 激光斑纹

中图分类号: TN958.98 文献标识码: A

Numerical analysis of CO₂ DIAL measurement sensitivity

YIN Shi-rong¹, WANG Wei-ran¹, LI Xin-shan²

(1. College of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China; 2. Air Force Headquarter, Chengdu Military Area, Chengdu 610041, China)

Abstract: For direct detection, long-range CO₂ differential absorption lidar (DIAL) system, two factors which have effects on measurement sensitivity: atmospheric turbulence and laser speckle are analyzed. Numerical calculation results of the dependent relationship between measurement sensitivity and atmospheric turbulence and laser speckle are obtained. These results show that when the height is smaller than 350m, measurement sensitivity can be efficiently improved by increasing the height of equipment above ground; when the height is bigger than 350m, measurement sensitivity can be efficiently improved by changing system parameters.

Key words: differential absorption lidar (DIAL); measurement sensitivity; atmospheric turbulence; laser speckle

引 言

CO₂ 差分吸收激光雷达是一种重要的遥感技术, 广泛地用于大气污染检测和环境监测等民用领域和化学、生物战剂侦测等军事领域^[1,2]。由于 CO₂ 激光器技术的成熟和发展; 其发射波长处于 9μm~11μm 这一相对透明的大气传输“窗口”; 许多化学气体在此波段表现出明显的吸收频谱特性^[3], 因而对 CO₂ 差分吸收激光雷达系统的研究具有非常重要的应用价值。测量灵敏度是差分吸收激光雷达系统的一项重要性能指标, 国外对灵敏度的研究比较少^[3], 国内未见灵敏度方面的报道。作者在综合考虑了大气湍流和激光斑纹的基础上, 对 CO₂ 差分吸收激光雷达的测量灵敏度进行了理论分析和

数值计算, 这些分析和结论可为 CO₂ 差分吸收激光雷达的应用和研制提供有益的理论指导。

1 理论分析

1.1 基本原理

长程差分吸收激光雷达系统中, 被测气体的浓度-光程积(即 CL 值)通常由下式导出:

$$CL = \frac{1}{2\Delta\alpha} \ln \frac{P_{\text{off}}}{P_{\text{on}}} \quad (1)$$

式中, $\Delta\alpha = \alpha_{\text{on}} - \alpha_{\text{off}}$ 为被测气体在强吸收波长 λ_{on} 和弱吸收波长 λ_{off} 处的吸收系数差; $P_{\text{on}}, P_{\text{off}}$ 为对应波长处用发射功率归一化的接收功率。

差分吸收激光雷达的测量灵敏度可由 CL 值的方差给出^[4]:

$$\sigma_{CL}^2 = \frac{1}{(2\Delta\alpha)^2} (\sigma_{P_{\text{on}}}^2 + \sigma_{P_{\text{off}}}^2) \quad (2)$$

式中, $\sigma_P^2 = \langle [P - \langle P \rangle]^2 \rangle / \langle P \rangle^2$ 为接收功率的归一化方差。

接收功率的波动主要受发射功率、大气湍流、激

作者简介: 尹世荣(1977-), 女, 博士研究生, 主要从事差分吸收激光雷达系统建模仿真及信息处理研究。

E-mail: yinshirong@sina.com

收稿日期: 2003-09-15; 收到修改稿日期: 2003-11-14

光斑纹和探测噪声等因素的影响。当接收功率用发射功率归一化处理后,发射功率的影响可以忽略;对于高能量的激光系统,探测噪声相对于接收功率很小,因此,探测噪声的影响也可以忽略。下面主要分析大气湍流和激光斑纹对接收功率波动的影响,根据(2)式,就可得到大气湍流和激光斑纹对测量灵敏度的影响。

1.2 大气湍流

大气湍流对激光束传输的影响主要体现为光束形状的变化(如扩展和漂移)以及强度分布的空间起伏(闪烁)上。

对于高能量的激光系统以及脉冲的传输问题主要考虑短期光束扩展的影响。对于高斯光束,短期光束扩展后的半径为^[5]:

$$\rho_s^2 = \frac{4R^2}{(kD_x)^2} + \left[\frac{D_x}{2} \right]^2 \left[1 - \frac{R}{f_l} \right]^2 + \frac{4R^2}{(k\rho_0)^2} \left[1 - 0.62 \left[\frac{\rho_0}{D_x} \right]^{1/3} \right]^{6/5} \quad (3)$$

式中, R 为光束在湍流大气中传输的距离; $k = 2\pi/\lambda$ 为光学波数; $D_x = 2\sqrt{2}w_0$ 为发射光束的有效直径, w_0 为光束束腰半径; f_l 为高斯光束的曲率半径; ρ_0 为高斯光束的横向相干长度。

大气湍流导致的光强闪烁效应直接影响激光雷达系统接收功率的波动,在测量灵敏度的计算中,笔者所关心的正是这种波动,也就是由湍流引起的回波信号的方差。

对于球面波(近轴方向高斯光束可作球面波近似),当光束水平传输时,经过湍流大气后的对数幅度方差为:

$$\alpha_x^2 = 0.124k^{7/6}R^{11/6}C_n^2 \quad (4)$$

式中, C_n^2 为大气的折射率结构常数,代表湍流水平的大小。

在大多数应用中,光束通过湍流的传输导致接收到的光强波动,并且光束强度方差又是一个便于直接观测的量,因此定义归一化的强度方差如下:

$$\sigma_I^2 = \langle [I - \langle I \rangle]^2 \rangle / \langle I \rangle^2 = \exp(4\alpha_x^2) - 1 \quad (5)$$

1.3 激光斑纹

长程差分吸收激光雷达系统测量气体浓度时,通常采用地形目标或人造目标,当这些目标的粗糙度和波长可以相比拟时,就会在接收机平面产生复杂的干涉图样,它具有颗粒状的外貌,这就是“斑纹”现象。当探测器对斑纹图样进行取样时,随着探测器接收到的斑点个数的增加,激光回波信号的光强

方差就会减小,它们之间为反比的关系^[6]。

对于高斯斑点,斑纹信噪比为^[7]:

$$S_{\text{SNR}} = 1 + \frac{D_r}{D_{\text{corr}}} = 1 + \frac{\pi D_r D_{\text{tar}}}{4R} \quad (6)$$

式中, D_r 为接收孔径; D_{corr} 为接收机平面内的斑纹相干直径; R 为目标距离; D_{tar} 为目标处的光束有效直径,可推导出其表达式为:

$$D_{\text{tar}} = D_x + 2R \tan(\theta/2) + 2\sqrt{2}\rho_s \quad (7)$$

式中, θ 为光束束散角。

从而可得斑纹的归一化方差如下:

$$\sigma_s^2 = \frac{1}{(S_{\text{SNR}})^2} \quad (8)$$

1.4 综合影响

根据上面的分析,长程 CO₂ 差分吸收激光雷达的测量灵敏度主要受大气湍流和激光斑纹的影响,而湍流导致的信号闪烁和斑纹噪声是两个相互独立的随机过程,它们的均值为 1,归一化方差分别为 σ_I^2 和 σ_s^2 ,因此,综合考虑大气湍流和激光斑纹的影响,可以推导出接收功率的归一化方差 σ_p^2 为:

$$\sigma_p^2 = \sigma_I^2(1 + \sigma_s^2) + \sigma_s^2 \quad (9)$$

2 数值计算

2.1 系统参数

为了便于分析,假设水平发射 TEM₀₀ 横基模的高斯光束,对氨气(NH₃)进行探测,表 1 中给出了选用的系统参数。该分析可用于其它气体。

Table 1 CO₂ DIAL system parameters

λ_{on}	10.632 μ m
λ_{off}	10.532 μ m
absorption coefficient	$5.6 \times 10^3 \text{m}^{-1}(\lambda_{\text{on}})$ $0 \text{m}^{-1}(\lambda_{\text{off}})$
beam waist radius	0.01m~0.05m
beam divergence	0.1mrad~1mrad
receiver aperture	0.2m~0.4m
range to target	5000m

大气湍流模型采用 Hufnagel Valley 5/7 模型,大气折射率结构常数为:

$$C_n^2 = 8.2 \times 10^{-26} (21)^2 h^{10} e^{-h} + 2.7 \times 10^{-16} e^{-h/1.5} + 1.7 \times 10^{-14} e^{-10h} \quad (10)$$

式中, h 为设备离地高度。

2.2 计算结果及分析

根据(2)式和(9)式可知,测量灵敏度与大气湍流和激光斑纹的归一化方差有关。由前面的理论分

析可知,湍流归一化方差随设备离地高度的增加而减小,斑纹归一化方差随束腰半径的增大而增大,随束散角和接收孔径的增大而减小。因此,在所选系统参数的变化范围内,当束腰半径为 0.05m,束散角为 0.1mrad,接收孔径为 0.2m 时,激光斑纹归一化方差达到最大值,这种情况下,测量灵敏度较低,如图 1 中的曲线 1 所示;当束腰半径为 0.01m、束散角为 1mrad、接收孔径为 0.4m 时,激光斑纹归一化方差最小,这时,测量灵敏度较高,如图 1 中的曲线 2 所示。对于曲线 1,在设备离地高度为 1m 时,湍流和斑纹归一化方差均达到最大,这时测量灵敏度达到最低值 1.70×10^{-4} m。如果氨气在 5000m 的路径上均匀分布,那么最小可探测质量分数为 3.4×10^{-8} 。

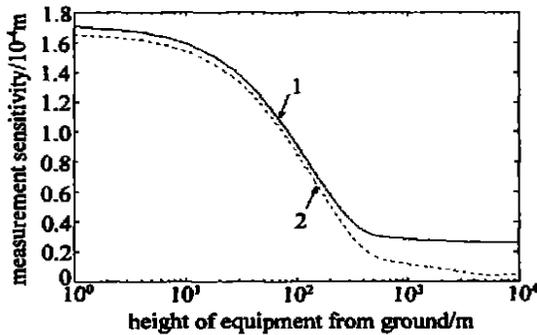


Fig. 1 The relationship between measurement sensitivity and height of equipment from ground and system parameters

1— $w_0 = 0.05\text{m}$, $\theta = 0.1\text{mrad}$, $D_r = 0.2\text{m}$ 2— $w_0 = 0.01\text{m}$, $\theta = 1\text{mrad}$, $D_r = 0.4\text{m}$

从图 1 的曲线 1 可以看出,测量灵敏度随设备离地高度的增加明显地提高,但当高度大于 350m 后,这种提高就不再明显了。因此,在高度小于 350m 时,增加设备离地高度来提高测量灵敏度比改变系统参数有效。例如在 10m 高处,曲线 1 的灵敏度为 1.59×10^{-4} m,将系统参数改为曲线 2 的系统参数,灵敏度为 1.54×10^{-4} m,如果将设备置于 100m 高处,灵敏度为 0.91×10^{-4} m,即改变系统参数灵敏度仅提高了 0.05×10^{-4} m,而高度增加 90m,灵敏度可提高 0.68×10^{-4} m,增加了 13 倍多。这是因为,在高度小于 350m 时,大气湍流的归一化方差占主导地位,而且这时湍流归一化方差随高度的增加迅速地减小,故提高设备离地高度,就能明显地减小湍流归一化方差,从而使得测量灵敏度大大地提高了。

在高度大于 350m 后,改变系统参数来提高测量灵敏度比增加设备的离地高度有效。如在 500m 高处,曲线 1 的灵敏度为 3.10×10^{-5} m,将设备高度增加到 1000m,灵敏度为 2.61×10^{-5} m,如果改变系统参数,灵敏度为 1.72×10^{-5} m,即高度增加 960m,灵敏度仅提高 0.49×10^{-5} m,而改变系统参数,灵敏度可提高 1.38×10^{-5} m,增加了 2.8 倍。这是因为,在高度大于 350m 后,湍流归一化方差变得很小,这时斑纹归一化方差占主导地位,故改变系统参数,可以明显减小斑纹归一化方差,从而明显地提高了测量灵敏度。

3 结论

针对水平传输的直接探测长程 CO₂ 差分吸收激光雷达系统,以归一化方差的形式讨论了影响其测量灵敏度的两个主要因素——大气湍流和激光斑纹。通过模拟系统参数,得到了测量灵敏度与设备离地高度及系统参数之间关系的数值计算结果,从中可以看出:若被测气体在整个路径上均匀分布,最小可探测质量分数至少可达 10^{-8} 量级;增加设备的离地高度、束散角和接收孔径,以及减小束腰半径都可以提高测量灵敏度;在高度小于 350m 时,增加设备离地高度对测量灵敏度的提高比较有效,在高度大于 350m 后,改变系统参数,测量灵敏度的提高比较明显。

参 考 文 献

- [1] PRASAD C R, KABRO P, MATHUR S. Tunable IR differential absorption lidar for remote sensing of chemicals [J]. Proc SPIE, 1999, 3757: 87~ 95.
- [2] WARREN R E. Optimum detection of multiple vapor materials with frequency-agile lidar [J]. Appl Opt, 1996, 35: 4180~ 4193.
- [3] PETRIN R R, NELSON D H, SCHMITT M J *et al.* Atmospheric effects on CO₂ differential absorption lidar sensitivity [J]. Proc SPIE, 1996, 2702: 28~ 39.
- [4] 凯林格 D K, 穆拉迪 A. 光和激光遥感 [M]. 成都: 成都电讯工程学院出版社, 1987. 23~ 28.
- [5] BELAND R R. The infrared and electro-optical systems handbook [M]. Michigan: Infrared Information Analysis Center, 1993. 157~ 232.
- [6] MacKERROW E P, TIEE J J, FITE C B *et al.* Laser speckle effects on hard target differential absorption lidar [J]. Proc SPIE, 1996, 2702: 65~ 83.
- [7] SCHMITT M, McVERY B, COOKE B *et al.* Comprehensive system model for CO₂ DIAL [J]. Proc SPIE, 1996, 2702: 95~ 103.