

文章编号: 1001-3806(2007)05-0515-03

微脉冲差分吸收激光雷达 CO₂ 探测性能研究

蔡晓春^{1,2}, 胡以华^{1*}, 陶小红^{1,2}, 胡桂兰¹, 赵楠翔¹, 雷武虎¹

(1. 解放军电子工程学院, 合肥 230037; 2. 安徽省电子制约重点实验室, 合肥 230037)

摘要: 为了研究差分吸收激光雷达低空 CO₂ 浓度探测效率, 分析了探测系统的原理与信噪比, 采用近红外微脉冲激光雷达进行了仿真实验, 当激光脉冲能量为 20μJ, 重复频率为 10kHz 时, 推算出信噪比、所需积累时间与探测距离的关系。在不考虑背景噪声情况下(夜间工作), 可进行 4.5km 以下 CO₂ 气体浓度的探测; 考虑背景噪声情况下(白天工作), 只能探测 2.4km 以下的 CO₂ 气体浓度。结果表明, 选择夜间探测和更好的探测器件可以提高探测距离。

关键词: 激光技术; 差分吸收激光雷达; CO₂ 浓度; 微脉冲

中图分类号: TN958.98 文献标识码: A

Simulation research on detecting thickness of CO₂ by micro pulse DIAL

CAIXiao-chun^{1,2}, HUYi-hua¹, TAOXiao-hong^{1,2}, HUGui-lan¹, ZHAONan-xiang¹, LEIWu-hu¹

(1. Electronic Engineering Institute of PLA, Hefei 230037, China; 2. Anhui Provincial Key Laboratory of Electronic Restriction, Hefei 230037, China)

Abstract In order to study the efficiency of detecting thickness of CO₂ in low space by differential absorption lidar (DIAL), the detection principle and the SNR (signal to noise ratio) of the system were analyzed. With the simulation experiments of a kind of near-infrared micro pulse lidar with energy of 20μJ and repetition rate of 10kHz, the relation among the SNR, the needed accumulation time and detection distance was calculated. The results show that without regard to the background noise (working at night), the thickness of CO₂ can be detected below 4.5km. Whereas with regard to the background noise (working in daylight), the thickness of CO₂ can only be detected below 2.4km. The conclusion is drawn that working at night and with other better performance instruments can increase the detection distance.

Key words laser technique; differential absorption lidar (DIAL); thickness of CO₂; micro pulse

引 言

大气中的 CO₂ 与人类生活息息相关, 由 CO₂ 可造成“温室效应”, 这些已得到环境学者的关注。目前, 关于 CO₂ 的许多方面还不是很清楚, 而对 CO₂ 时空分布的知识及其变化原因的理解, 预测将来 CO₂ 水平及其对温度变化的影响也是必需的。因此, 大气 CO₂ 浓度的探测是十分重要的。由于激光的许多优异性能, 使得激光雷达特别适用于对大气的探测^[1]。目前, 激光遥测大气微量气体浓度的探测原理主要是运用喇曼散射原理和差分吸收原理。喇曼散射雷达具有激光波长无严格选择、系统结构相对简单的优点, 但探测灵敏度较低。而差分吸收原理则依赖待测气体的吸收光谱^[2], 因此, 要求选择特定的激光波长、发射系统较复杂, 而灵敏度相对较高^[3]。作者对一种微脉冲激光雷

达探测低空 CO₂ 进行了仿真实验研究, 以期对差分吸收激光雷达探测低空 CO₂ 外场实验提供一定的参考。

1 差分吸收雷达探测 CO₂ 原理

激光雷达发射机发出激光脉冲, 被大气中的气溶胶散射, 其散射回波被接收机检测, 经过信号处理而得到最后信息。激光脉冲在大气层中行进一方面被气溶胶散射, 另一方面还被大气物质吸收, 所提取的信息正是表现为 CO₂ 气体对激光脉冲能量的吸收。在激光雷达吸收探测系统中, 既利用气溶胶散射而形成的回波, 又利用气体吸收而获得 CO₂ 的信息。其吸收信号的强弱反映了 CO₂ 浓度的大小。为了尽量排除其他各种因素的影响, 以获得准确 CO₂ 的吸收信息, 在该系统中采用两束波长相近的发射激光束。其中一波长选在 CO₂ 吸收峰的中心, 记为 λ_m; 另一波长选在吸收峰的外边, 使其受到的吸收较小, 记为 λ_{of}。探测的回波方程为^[4]:

$$P(R)_{on} = P_0(\lambda_m) \eta \beta(\lambda_m, R) \Delta R (A/R^2) \times$$

作者简介: 蔡晓春 (1976-), 男, 讲师, 博士研究生, 研究方向为光电信息处理。

* 通讯联系人。E-mail: yh_hu@263.net

收稿日期: 2006-08-28; 收到修改稿日期: 2006-11-22

$$\exp\{-2 \int_0^R Q(z) \sigma(\lambda_{on}) + \alpha(\lambda_{on}, z) dz\} \quad (1)$$

$$P(R)_{off} = P_0(\lambda_{off}) \eta \beta(\lambda_{off}, R) \Delta R (A R^2) \times$$

$$\exp\{-2 \int_0^R [Q(z) \sigma(\lambda_{off}) + \alpha(\lambda_{off}, z) dz]\} \quad (2)$$

(1) 式、(2) 式中, ΔR 是空间取样距离, Q 是 CO_2 分子的密度, $P(R)_x$ 是接收机接收到的来自 $R \sim R + \Delta R$ 高度大气段的回波功率, $P_0(\lambda_x)$ 为发射激光束的功率, η 是系统的接收效率常数 (包括探测器的量子效率), R 为探测距离, A 为接收望远镜的受光面积, $\beta(\lambda_x, R)$ 为大气中探测光的后向散射系数。探测光在来回行程中的消光系数包括大气光散射衰减和光吸收衰减, 表示为 $Q(z) \sigma(\lambda_x, z) + \alpha(\lambda_x, z)$ 。 $\sigma(\lambda_x)$ 是 CO_2 的吸收截面, $\alpha(\lambda_x, z)$ 是除了 CO_2 吸收之外的消光系数。下标 x 取值 on 或 off 表示是 λ_{on} 和 λ_{off} 所分别对应的物理量。因为 λ_{on} 与 λ_{off} 相近, 可以近似认为: $\beta(\lambda_{on}, R) = \beta(\lambda_{off}, R)$, $\alpha(\lambda_{on}, z) = \alpha(\lambda_{off}, z)$ 。将上面 (1) 式和 (2) 式相除 (即排除大气变化的主要因素)、两边取对数、微分运算, 可得到下式:

$$Q(R) = \frac{1}{2[\sigma(\lambda_{on}) - \sigma(\lambda_{off})]} \frac{d}{dR} \left[\ln \frac{P(R)_{off}}{P(R)_{on}} \right] \quad (3)$$

这就是差分吸收雷达探测 CO_2 浓度的原理。

2 系统信噪比

由于激光雷达回波信号很微弱, 因此, 探测系统采用光子计数的方法。根据激光雷达回波方程、大气散射模型和系统参数, 进行探测信噪比的计算, 对于最终确定激光雷达的技术参数和总体结构, 了解其探测的性能是十分有益的。由 (1) 式和 (2) 式转换可得, λ_{on} 和 λ_{off} 光的后向散射被接收的光电子数为:

$$N_{e_{on}} = N_{p_{on}} \eta \beta(R) \Delta R (A R^2) \times \exp\{-2 \int_0^R [Q(z) \sigma(\lambda_{on}, z) + \alpha(z) dz]\} \quad (4)$$

$$N_{e_{off}} = N_{p_{off}} \eta \beta(R) \Delta R (A R^2) \times \exp\{-2 \int_0^R [Q(z) \sigma(\lambda_{off}, z) + \alpha(z) dz]\} \quad (5)$$

式中, N_{p_x} 是被发射的每个激光脉冲包含的光子数, N_{e_x} 是来自探测器的对应的每个时间宽度 σ 包含的光电子数, 同样, 下标 x 取值 on 或 off 表示是 λ_{on} 和 λ_{off} 所分别对应的物理量。 $\beta(R)$ 表示 λ_{on} 或 λ_{off} 的大气后向散射系数, 它包括大气分子的后向散射系数 $\beta_m(R)$ 和气溶胶后散射系数 $\beta_a(R)$ 。 $\alpha(R)$ 是除了 CO_2 吸收之外 λ_{on} 或 λ_{off} 的消光系数, 它包括大气分子消光系数 $\alpha_m(z)$ 和气溶胶的消光系数 $\alpha_a(z)$ 。在光子计数方法中, 信噪比定义为^[5]:

$$S = \frac{N_s}{\sqrt{N_s + (N_b + N_d)}} \quad (6)$$

式中, N_s 是回波信号的计数; N_b 是背景辐射引起的计数; N_d 是光电探测器的暗电流脉冲计数和放大器的暗计数。如果激光雷达应用于夜间探测, 背景辐射所引起的计数可以忽略不计。 $N_s = M \cdot N_{e_x}$; 同时 $N_d = M \cdot n \cdot \frac{2\Delta R}{c}$; M 是累计的激光探测脉冲数, n 是雪崩二极管和放大器每秒的暗计数, c 是光速, 所以 (6) 式也表示为:

$$S = \frac{N_{e_x} \cdot \sqrt{M}}{\sqrt{N_e + N_b + n \cdot \frac{2\Delta R}{c}}} \quad (7)$$

噪声主要来自于天空的背景辐射噪声, 背景辐射引起的光子数可用下式表示:

$$N_b = L_b \frac{A \Delta R}{hc} \frac{2\Delta R}{c} \frac{(\pi \theta)^2}{16} T \eta \Delta \lambda \quad (8)$$

式中, L_b 为背景辐射亮度, λ 为激光波长, h 为普朗克常数, ΔR 为激光雷达的距离分辨率, θ 为接收视角, D 为接收望远镜直径, T 为接收通道光学透过率, η 为接收器件量子效率, $\Delta \lambda$ 为滤波器宽度。

3 性能仿真实验

HONG 等人^[6]提出了一种探测低空大气 CO_2 浓度分布的近红外微脉冲雷达, 具有体积小、可靠性高、统调难度小、探测距离远等优点, 是一种较理想的探测低空 CO_2 浓度的方法。这里拟采用这种激光雷达系统, 选择合适的性能参数进行仿真实验, 并考虑白天工作情况下背景噪声的影响。探测器采用光电倍增管。系统参数如表 1 所示。

Table 1 Parameters of lidar system

parameter	value	parameter	value
laser pulse power/ μJ	20	wavelength/nm	1572
pulse width/ns	200	repetition rate/kHz	10
diameter/mm	250	transmission	0.2
receive field angle/mrad	1	quantum efficiency	0.01
filter bandwidth/nm	1.5	PMT dark count/ s^{-1}	200000
background brightness ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$)	0.02	accumulation pulses number	1×10^6 (100s)

仿真实验采用文献 [7] 中的 532nm 波长大气分子消光模式和气溶胶粒子消光模式, 分别如下面几个式子所示 (式中 z 的单位是 km)。大气分子的后向散射系数 $\beta_m(z)$ (km^{-1}/sr):

$$\beta_m(z) = 1.54 \times 10^{-3} \exp(-z/7) \quad (9)$$

大气分子消光系数 $\alpha_m(z)$ (km^{-1}):

$$\alpha_m(z) = \beta_m(z) \times 8\pi/3 \quad (10)$$

气溶胶后散射系数 $\beta_a(z)$ (km^{-1}/sr):

$$\beta_a(z) = 2.47 \times 10^{-3} \exp(-z/2) + 5.13 \times 10^{-6} \exp[-(z-20)^2/36] \quad (11)$$

气溶胶的消光系数 $\alpha_a(z)$ (km^{-1}):

$$\alpha_a(z) = \beta_a(z) \times 50 \quad (12)$$

大气分子后向散射系数、气溶胶后向散射系数与光波长之间大约存在以下关系^[8]:

$$\frac{\beta_a(\lambda_1, z)}{\beta_a(\lambda_2, z)} = \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2}\right)^{-1} \quad (13)$$

$$\frac{\beta_m(\lambda_1, z)}{\beta_m(\lambda_2, z)} = \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2}\right)^{-4} \quad (14)$$

(13) 式、(14) 式中, λ_1 、 λ_2 分别表示两个不同的波长。因此, $\beta_a(1572, z) = 0.34 \times \beta_a(532, z)$, $\beta_m(1572, z) = 0.0131 \times \beta_m(532, z)$ 。这两个式子可将 532nm 波长的大气模式转换成 1572nm 波长下的大气模式。同时, 为了模拟回波信号, 假定 6km 以下 CO₂ 气体浓度随高度分布 $Q(z) = N_0 \exp(-z/7)$ 。N₀ 为地表 CO₂ 气体浓度, 取值 $1.048 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, 估计 λ_m 的吸收截面为 $6.36 \times 10^{-23} \text{ cm}^2$ ^[9], λ_{off} 的吸收截面为 $4.56 \times 10^{-24} \text{ cm}^2$ 。将 (11) 式 $\times 0.34 +$ (9) 式 $\times 0.0131$; 再将 (10) 式 + (12) 式得到 (15) 式和 (16) 式, 即可代入 (4) 式和 (5) 式进行计算。

$$\beta(R) = 0.8398 \times 10^{-3} \exp(-R/2) + 1.74 \times 10^{-6} \times \exp[-(R-20)^2/36] + 2 \times 10^{-5} \exp(-R/7) \quad (15)$$

$$\alpha(z) = 4.2 \times 10^{-2} \exp(-z/2) + 8.7 \times 10^{-5} \times \exp[-(z-20)^2/36] + 1.67 \times 10^{-5} \exp(-z/7) \quad (16)$$

通过仿真计算, 得到了 λ_m 光的回波信噪比随探测距离的变化曲线如图 1 所示, 而 λ_{off} 光应比 λ_m 光有更高的

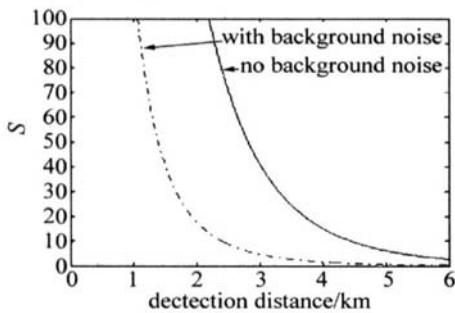


Fig 1 Variation curve of SNR with detection distance

回波信噪比。从图 1 可以看出, 不考虑背景噪声情况下(夜间工作), 在 4.5km 处, 信噪比约为 10:1, 因此, 夜间可进行 4.5km 以下 CO₂ 气体浓度的探测; 考虑背景噪声情况下(白天工作), 在 2.4km 处信噪比约为 10:1, 故白天只能探测 2.4km 以下的 CO₂ 气体浓度。

若假定在白天工作且探测所需信噪比为 10:1, 激

光雷达脉冲功率为 20μJ, 重复频率为 10kHz 则得到探测所需累积时间与探测距离变化曲线如图 2 所示。从图 2 可以看出, 在 2.4km 处探测累积时间为约为 100s, 近距离处所需累积时间增加缓慢, 当距离大于 2.4km 以后, 所需累积时间迅速增大。

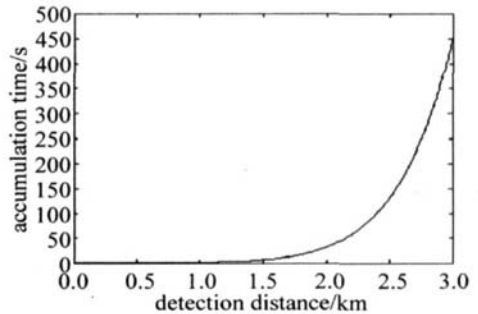


Fig 2 Variation curve of accumulation time with detection distance at 10:1 SNR

4 结 论

通过对差分吸收激光雷达探测低空 CO₂ 浓度的原理分析和仿真实验进行研究, 可见白天的背景噪声以及光电倍增管的暗计数对探测信噪比影响很大, 直接影响到探测距离。因此要想提高探测距离, 可选择在夜间工作, 采用更窄的超窄带滤波器减小背景噪声影响, 使用性能更加优良的光电探测器(如 InGaAs/Si-APD)等。仿真实验具有普遍意义, 对探测低空 CO₂ 浓度激光雷达系统设计和探测实验具有一定的参考意义。

参 考 文 献

- [1] HU Sh X, HU H L, ZHOU J D. LIDAR measurement for tropospheric ozone [J]. Laser Technology, 2001, 25(6): 406~408 (in Chinese).
- [2] YIN Sh R, WANG W R, LI X Sh. Numerical analysis of CO₂ DIAL measurement sensitivity [J]. Laser Technology, 2004, 28(5): 503~505 (in Chinese).
- [3] SUN J Q. Atmosphere detection by laser [M]. Beijing: Science Press, 1986: 1~269 (in Chinese).
- [4] YAN J X, GONG Sh Sh, LU Zh Sh. Laser radar in environment inspection [M]. Beijing: Science Press, 2001: 1~231 (in Chinese).
- [5] SPINERNE J M. micro pulse lidar [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1993, 31(1): 48~55.
- [6] HONG G L, ZHANG Y Ch, HU Sh X. Near infrared micro pulse lidar of profiling atmospheric CO₂ [J]. Journal of Infrared Millimeter Waves, 2004, 23(5): 384~388 (in Chinese).
- [7] SASANO Y, KOBAYASHI T. Feasibility study on space lidars for measuring global atmospheric environment. No. 4 Final Report F-82-95[R]. Tsukuba, Japan: National Institute for Environmental Studies, 1995: 22~30.
- [8] HENRIKSSON M. Detection probabilities for photon-counting avalanche photodiodes applied to a laser radar system [J]. Appl Opt, 2005, 44(6): 5140~5146.
- [9] COVA S, LACAITA A, ZAPPA F et al. Avalanche photodiodes for near-infrared photo-counting [J]. Proc SPIE, 1995, 2388: 56~65.