

文章编号: 1001-3806(2010)02-0221-03

喇曼方法测量激光雷达常数研究

闫顺生^{1,2}, 张敬东¹, 黄洪云¹, 户立春¹, 边静¹

(1. 唐山学院 基础教学部, 唐山 063000; 2. 中国科学院 安徽光学精密机械研究所, 合肥 230031)

摘要: 为了标定激光雷达常数,在大气水平分布均匀的天气下,利用激光雷达喇曼散射回波不受大气气溶胶后向散射影响的特点,对其水平方向距离订正回波进行线性拟合,结合 N_2 分子喇曼后向散射截面和分子数密度就可以得到激光雷达常数;同时对这种方法进行了数值模拟,相对误差为 4.688%,理论推导和数值模拟均证明该方法是可行的。结果表明,激光雷达常数的获取为激光系统的评估以及激光雷达方程的参量反演将带来便利。

关键词: 大气与海洋光学;激光雷达常数;线性拟合;喇曼散射

中图分类号: TN958.98 **文献标识码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1001-3806.2010.02.021

Measurement of lidar constant by means of Raman method

YAN Shun-sheng^{1,2}, ZHANG Jing-dong¹, HUANG Hong-yun¹, HU Li-chun¹, Bian Jing¹

(1. Public Basic Course Teaching Department, Tangshan College, Tangshan 063000, China; 2. Anhui Institute of Optics Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: The characteristic that the return signals of a Raman lidar are not affected by aerosol backscattering can be used to calibrate lidar constant. At homogenous horizontal atmosphere, the lidar constant can be calculated with knowledge about Raman diffusion back scattering cross section and number density of N_2 . Numerical simulation was carried out and 4.688% relative error of the lidar constant was obtained. Theoretical derivation and numerical simulation indicate the feasibility of the method. The achievement of lidar constant will offer convenience for retrieve of aerosol in lidar equation and evaluation of a lidar system.

Key words: atmospheric and ocean optics; lidar constant; numerical simulation; Raman diffusion

引言

随着激光技术的发展及先进的信号探测和采集系统的应用,激光雷达以它的高时空分辨率和高测量精度而成为一种重要的大气遥感探测工具^[1-2]。激光雷达常数是激光雷达系统的一个重要参量,如果能够得到系统的激光雷达常数,就可以为激光雷达数据反演带来很多好处^[3]。但是,激光雷达常数的标定是一项繁琐和困难的事情,一般用绝对定标和相对定标方法确定。据中国科学院安徽光学精密机械研究所 HU 的总结,现只有 3 种实验方法可以用来确定激光雷达常数:(1)选择晴朗、稳定、能见度极好的天气条件,利用标准漫反射靶法进行标定,但是需要准确地测量大气透过率以及漫反射靶的反射率;(2)利用粒子计数器得到气溶胶粒子谱分布和滤膜采样得到虚折射指数来计算大气后向散射系数,消光系数和消光后向散射比

来确定激光雷达常数^[4];(3)在大气分子散射起主要作用,气溶胶散射贡献极少的天气条件下,计算激光雷达常数^[5]。另外 HU 又提出利用太阳辐射计结合激光雷达获得的 35km~40km 高度的大气分子后向散射回波信号可以得到误差小于 7% 的激光雷达常数。

本文中提出一种新的方法,即在大气水平分布均匀的情况下,利用喇曼激光雷达回波信号不受气溶胶后向散射影响和 N_2 在大气中的混合比可视为常数的特点,对大气喇曼回波信号进行距离订正,再经进一步线性拟和就可定出激光雷达常数。

1 喇曼定标方法

喇曼激光雷达的信号回波方程为:

$$P(\lambda_N, r) = \frac{CEf(r)}{r^2} \beta_{N_2}(r) \times \exp\left\{-\int_0^r [\alpha(\lambda_0, r) + \alpha(\lambda_N, r)] dr\right\} \quad (1)$$

式中, $\beta_{N_2}(r) = \sigma_{N_2} N_{N_2}(r)$ 。 λ_0 为发射激光波长; λ_N 为 N_2 分子振动 Raman 散射波长; $P(\lambda_N, r)$ 为 Raman 激光雷达所接收的距离 r 处波长 λ_N 的氮气 Raman 后向散

作者简介: 闫顺生(1977-),男,硕士,主要从事激光雷达大气探测工作。

E-mail: aiofmyss@163.com

收稿日期: 2008-12-15; 收到修改稿日期: 2009-02-26

射信号; E 为激光发射脉冲能量; C 为激光雷达常数; $f(r)$ 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; $\alpha(\lambda_0, r)$ 和 $\alpha(\lambda_N, r)$ 分别对应波长 λ_0 和 λ_N 时的距离 r 处大气总的消光系数; $\beta_{N_2}(r)$ 为 N_2 分子振动 Raman 后向散射系数, σ_{N_2} 和 $N_{N_2}(r)$ 分别为 N_2 分子振动 Raman 散射截面和分子数密度。

由 Raman 散射激光雷达方程(1)式可以看出, 不同于 Mie 散射回波信号方程中同时含有气溶胶消光和后向散射系数 2 个未知参量, 其反演方法中必须对二者的关系预先假定^[6-7], 而 Raman 激光雷达接收 N_2 分子的 Raman 散射回波却不受气溶胶后向散射的影响; 大气中含量稳定的成分主要是氮(N_2), 氧(O_2) 和氩(Ar), 按干空气中体积百分比, 氮气占 78.1%; 氧气占 20.9%; 氩气占 0.93%, 所以大气中 N_2 的混合比可视为常数, 就可以通过探空资料或者模式大气换算出 N_2 分子数密度, 再结合实验测量出的 N_2 分子振动 Raman 散射截面, 就可以获得 N_2 分子振动 Raman 后向散射系数。

对大气喇曼散射回波进行距离订正, 令:

$$S(r) = \ln[P(\lambda_N, r)r^2] = \ln[CE\beta_{N_2}(r) \times f(r)] - \int_0^r [\alpha(\lambda_0, r) + \alpha(\lambda_N, r)] dr \quad (2)$$

几何因子 $f(r)$ 表示的是激光雷达接收视场与发射激光束的发散角重叠的函数, 相对于同轴和双轴激光雷达系统几何因子从近区 0 逐渐增大到 1 后在充满区一直保持为 1, 取激光雷达充满区的信号, 此时几何因子 $f(r)$ 为 1; 在大气充分混合(一般能见度较好的夜晚符合此种条件)的情况下大气水平分布均匀, 此时气溶胶在大气中可认为也均匀分布, $\alpha(\lambda_0, r)$ 和 $\alpha(\lambda_N, r)$ 可视为常数。这样大气水平方向距离订正回波可进一步简化为:

$$S(r) = \ln[CE\sigma_{N_2}N_{N_2}(r)] - [\alpha(\lambda_0, r) + \alpha(\lambda_N, r)] \times r \quad (3)$$

可以看出, 距离订正回波 $S(r)$ 此时是关于距离 r 的一个线性函数, 斜率 $k = \alpha(\lambda_0, r) + \alpha(\lambda_N, r)$, 利用 ORIGIN7.5 或最小二乘法对其距离订正回波进行线性拟合, 设 $S(r) = k \times r + b$ 为拟合的线性直线, 而 N_2 分子振动 Raman 散射截面 σ_{N_2} 可由实验精确测量获得^[8]; 其分子数密度 $N_{N_2}(z)$ 可通过探空气球获得, 也可以通过中纬度美国大气模式换算得出, 通过同时监测激光发射能量 E , 则可由下式求得激光雷达常数: $C = \exp b / [E\sigma_{N_2}N_{N_2}(r)]$ 。

2 数值模拟

对喇曼方法求取激光雷达常数的可行性, 以激光入射波长 337.1nm, N_2 喇曼散射波长 365.9nm^[9] 为例

进行了数值模拟。

首先模拟激光雷达距离订正回波 $S(r)$, 假定激光脉冲能量为 E , 大气消光系数和氮气分子后向散射系数这 3 个参量已知, 且假定大气水平均匀, 则由(3)式得:

$$S(r) = \ln[CE\sigma_{N_2}N_{N_2}(r)] - [\alpha(\lambda_0, r) + \alpha(\lambda_N, r)] \times r + (R - 0.5) \quad (4)$$

为模拟水平方向激光雷达回波噪声引起的起伏, 在上式中引入了噪声项 $(R - 0.5)$, 其中 R 为随机函数, 其值在 $(0, 1)$ 之间变化, 因此 $(R - 0.5)$ 变化范围为 $(-50\%, 50\%)$, 即认为噪声引起激光雷达距离订正回波 $\pm 50\%$ 的起伏。模拟过程中, 假定大气消光系数在激光波长 337.1nm 时为 $0.724(1/\text{km})$ ^[10]; 喇曼散射波长为 365.9nm 时为 $0.724 \times 3371/3659 = 0.667(1/\text{km})$; 取激光脉冲能量 $E = 200\text{mJ}$; 标准大气下氮气分子数密度 $N_{N_2}(r) = 1.225 \times 0.75527 \times 6.02/28 = 0.198919 \times 10^{20} = 1.98919 \times 10^{19}/\text{cm}^3$ ^[11]; 喇曼后向散射微分截面为 $3.5 \times 10^{-30}\text{cm}^2/\text{sr}$, 则氮气后向散射系数 $\beta_{N_2}(r) = 1.98919 \times 10^{19}/\text{cm}^3 \times 3.5 \times 10^{-30}\text{cm}^2/\text{sr} = 6.96216 \times 10^{-11}\text{cm}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$; 激光雷达常数假定为 $C = 600000\text{sr} \cdot \text{km}^3$ 。

其次利用 ORIGIN7.5 对模拟的水平方向上大气距离订正回波进行线性拟合。模拟的大气喇曼距离订正回波 $S(r)$ 及线性拟合直线如图 1 所示。

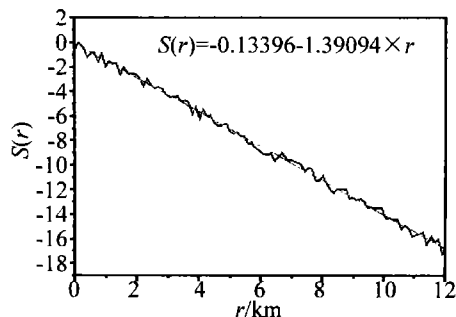


Fig. 1 Simulated lidar range-correcting return laser beam and linear curve fitting line

线性拟合直线表达式为 $S(r) = -0.13396 - 1.39094 \times r$; 由此可相应求得大气消光系数在激光波长 337.1nm 时为 $0.723962(1/\text{km})$; 激光雷达常数 $C = \exp b / [E\sigma_{N_2}N_{N_2}(r)] = 628128 \text{sr} \cdot \text{km}^3$, 相对误差为 4.688%。

3 结论

在大气水平均匀条件下, 利用喇曼激光雷达后向散射回波不受气溶胶后向散射影响和氮气在大气中的混合比可视为常数的特点, 对激光雷达方程中进行一

系列必要的简化,并借助于 ORIGIN7.5 作图工具或者最小二乘法线性拟合方法,不需要借助其它仪器设备就可以计算激光雷达常数。对这种方法进行了理论推导和数值模拟,表明该方法是可行的。激光雷达常数的获取将为评估激光系统以及激光雷达方程的数据处理带来极大便利。

参 考 文 献

- [1] LIU H T, WANG Zh Zh, LI Ch, *et al.* Numerical simulation analysis for detectability of spaceborne lidars[J]. *Laser Technology*, 2008, 32(6):614-615(in Chinese).
- [2] SASSEN K, CHO B S. Subvisible-thin cirrus lidar dataset for satellite verification and climatological research[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1992, 31(11):1275-1285.
- [3] HU Sh X, WANG Zh Zh, XU Q Sh, *et al.* Studies on methods for aerosol optical depth measurements by lidar[J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2006, 23(3):305-310(in Chinese).
- [4] ZHANG J B, HU H L. Lidar calibration: a new method[J]. *Appl Opt*, 1997, 36(6):1235-1238.
- [5] FREDERICK G F, BENJAMAN M H, JOHN A R. Determination of aerosol height distribution by lidar[J]. *Applied Meteorology*, 1972, 11(2):482-489.
- [6] KLETT J. Stable analytical inversion solution for processing lidar returns[J]. *Appl Opt*, 1981, 20(5):211-220.
- [7] FERNALD F G. Analysis of atmospheric lidar observations, some comments[J]. *Appl Opt*, 1984, 23(9):652-653.
- [8] INABA H, KOBAYASI T. Laser-Raman radar——laser-Raman scattering methods for remote detection and analysis of atmospheric pollution[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 1972, 4(2):101-123.
- [9] SUN J Q. *Laser atmosphere detect* [M]. Beijing: Science Press, 1986:88-89(in Chinese).
- [10] SUN J Q. *Laser atmosphere detect* [M]. Beijing: Science Press, 1986:26-27(in Chinese).
- [11] SUN J Q. *Laser atmosphere detect* [M]. Beijing: Science Press, 1986:7-8(in Chinese).

(上接第 220 页)

- O S A, 2002, B19(3): 461-469.
- [5] PRACOCK A C, BRODERICK N G R, MONRO T M. Numerical study of parabolic pulse generation in microstructured fibre Raman amplifiers [J]. *Opt Commun*, 2003, 218(1/3):167-172.
- [6] FINOT C, MILLIOT G, BILLET C, *et al.* Experimental generation of parabolic pulses via Raman amplification in optical fiber[J]. *Optics Express*, 2003, 11(13):1547-1552.
- [7] HIROOKA T, NAKAZAWA M. Parabolic pulse generation by use of a dispersion-decreasing fiber with normal group-velocity dispersion [J]. *Opt Lett*, 2004, 29(5):498-50.
- [8] FENG J, XU W Ch, LI Sh X, *et al.* Analytical self-similar solution of Ginzburg-Landau equation for the dispersion decreasing fiber [J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, 56(11):5835-5842(in Chinese).
- [9] JIA G M, JIA D F, LI Sh Ch. Highly nonlinear optical fibers and their applications [J]. *Study on Optical Communications*, 2003(1): 43-46(in Chinese).

版权所有 ©

《激光技术》编辑部