

激光雷达定标的新方法研究

张敬斌

胡欢陵 周军 许军

(曲阜师范大学激光研究所, 曲阜, 273165) (中国科学院安徽光机所, 合肥, 230031)

摘要: 利用激光雷达对水平方向大气进行探测, 结合近地面层气溶胶粒子谱及其折射率的测量, 我们用最小二乘法定出了激光雷达的仪器常数, 该方法简单易行。

关键词: 激光雷达 定标 仪器常数

Study on a new method about lidar calibration

Zhang Jingbin

(Laser Institute, Qufu Normal University)

Hu Huanling, Zhou Jun, Xu Jun

(Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

Abstract: Based on the lidar measurements of horizontal atmosphere attenuation, aerosol size distribution and refractive index at boundary layer, using least-square method, we obtain the lidar instrument constant, this method is convenient and feasible.

Key words: lidar calibration instrument constant

一、引言

为理解气溶胶对地-气系统辐射能量交换的影响, 人们提出了地-气辐射转换模式, 所有关于模式的计算都必须以大气气溶胶粒子模型为基础。激光雷达具有很高的空间和时间分辨率, 是一种很好的遥感手段, 但是要想从激光雷达回波中获得关于气溶胶粒子特性的定量描述, 还有许多问题有待解决, 首先激光雷达需要定标, 其次必须对气溶胶粒子的某些特性做出假设。

激光雷达的定标方式可分为两种: 即绝对定标和相对定标。绝对定标^[1]可以较准确地得到激光雷达仪器常数, 但需准确地测出激光雷达与漫反射靶之间的大气透过率及漫反射靶的反射率等一系列参数; 相对定标^[2]假定在对流层顶附近, 气溶胶粒子与分子两者的后向散射系数之比已知, 从而定出激光雷达仪器常数, 但在对流层内, 气溶胶粒子变化大, 且气溶胶粒子与分子的后向散射比随天气变化亦较大, 因此该方法的可行性值得探讨。

本文利用最小二乘法, 导出了激光雷达新的定标方法, 在激光雷达进行水平方向大气探测的同时, 我们还利用多道光电粒子计数器测量出了近地面层的气溶胶粒子谱分布, 并利用积分

片法^[3]测出与粒子谱分布相对应的气溶胶粒子折射率,由米氏理论^[4]计算出了近地层的气溶胶消光与后向散射比,进而定出了激光雷达的仪器常数。

二、定标方法

大气探测激光雷达方程表示为:

$$P(r) = \frac{C_A E \cdot \beta(r)}{r^2} \exp[-2 \int_0^r \sigma(r') dr'] \quad (1)$$

式中, $P(r)$ 是大气回波功率, C_A 即激光雷达仪器常数, E 为激光脉冲能量, $\beta(r)$, $\sigma(r)$ 分别是距激光雷达 r 处的大气后向散射及消光系数。

对大气回波进行距离订正,令

$$S(r) = \ln[r^2 P(r)] = \ln C_A E \beta(r) - 2 \int_0^r \sigma(r') dr' \quad (2)$$

对上式求距离微分得:

$$\frac{dS(r)}{dr} = \frac{1}{\beta(r)} \frac{d\beta(r)}{dr} - 2\sigma(r) \quad (3)$$

如果令在大气探测距离订正区间 $r_1 - r_2$ 内大气水平均匀,则 $\frac{d\beta(r)}{dr} = 0$, 由(3)式可求得:

$$\sigma(r) = -\frac{1}{2} \frac{dS(r)}{dr} = -\frac{1}{2} \frac{S(r_2) - S(r_1)}{r_2 - r_1} \quad (4)$$

由(4)式可知,大气探测距离区间 $r_1 - r_2$ 内的大气消光系数为距离订正回波斜率的 $-1/2$ 。在大气水平均匀的假定下,水平方向大气距离订正回波可表示为:

$$S(r) = \ln C_A E \beta - 2\sigma r \quad (5)$$

利用最小二乘法对距离区间 $r_1 - r_2$ 内的大气距离订正回波进行最小二乘法拟合,即可求得水平方向上的大气消光系数 $\sigma(r)$ 。具体做法如下:令 $S(r) = ar + b$ 为距离订正回波的最小二乘法拟合直线,则

$$\sigma(r) = -\frac{1}{2} a \quad (6)$$

如果我们测出近地面层大气气溶胶粒子的谱分布 $n(r)$ 及与其对应的气溶胶粒子折射率 m , 则可由米氏理论^[4]计算出近地面层大气气溶胶消光与后向散射比 R 。由于在较混浊大气条件下,大气分子对激光的消光及后向散射的贡献与气溶胶粒子的贡献相比可忽略,我们取 R 作为大气的消光后向散射比。即: $R = \sigma/\beta$ 。

利用(5)式可求出激光雷达仪器常数

$$C_A = R \exp(b) / E \cdot \sigma \quad (7)$$

式中,激光能量 E 可适时测量,参数 b 由最小二乘法求出, R 由下式计算求得

$$R = \frac{\sigma}{\beta} = \frac{\int_0^\infty \pi r'^2 n(r') Q_{\text{ext}}(m, r', \lambda) dr'}{\int_0^\infty \pi r'^2 n(r') Q_{\text{back}}(m, r', \lambda) dr'}$$

$$\doteq \frac{\int_{r_1'}^{r_2'} \pi r'^2 n(r') Q_{\text{ext}}(m, r', \lambda) dr'}{\int_{r_1'}^{r_2'} \pi r'^2 n(r') Q_{\text{back}}(m, r', \lambda) dr'}$$

$$\hat{=} \frac{\sum_{i=1}^{17} \left(\frac{\Delta N}{\Delta \lg r'} \right)_i \int_{r'_i}^{r'_{i+1}} r' Q_{\text{ext}}(m, r', \lambda) dr'}{\sum_{i=1}^{17} \left(\frac{\Delta N}{\Delta \lg r'} \right)_i \int_{r'_i}^{r'_{i+1}} r' Q_{\text{back}}(m, r', \lambda) dr'} \quad (8)$$

式中, r' 为气溶胶粒子半径, m 为复折射率, $m = n_r - in_i$, 其中 n_r, n_i 分别为折射率实部和虚部, λ 为激光波长, $n(r)$ 为气溶胶粒子谱分布, 即单位体积单位粒子半径区间内气溶胶粒子数, ΔN 为对应于粒子半径区间 $\Delta \lg r'$ 内的气溶胶粒子密度, $Q_{\text{ext}}(m, r', \lambda), Q_{\text{back}}(m, r', \lambda)$ 分别为气溶胶粒子消光效率因子和后向散射效率因子^[4]。

三、数值模拟

我们对利用最小二乘法求取激光雷达仪器常数的可行性进行了数值模拟。

首先模拟激光雷达距离订正回波 $S(r)$, 假定激光脉冲能量 E , 大气消光系数 σ 及大气消光后向散射比 R 这三个参量已知, 且假定大气水平均匀, 则由(2)式得

$$S(r) = \ln EC_A \sigma / R - 2\sigma r + (\text{RND} - 0.5) \quad (9)$$

为模拟水平方向激光雷达回波噪声引起的起伏, 在(9)式中我们引入了噪声项 $(\text{RND} - 0.5)$, 其中 RND 为随机函数, 其值在 $(0, 1)$ 之间变化, 因此 $\text{RND} - 0.5$ 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。

其次利用最小二乘法对模拟的水平方向上大气距离订正回波进行最小二乘法拟合。

模拟的大气距离订正回波 $S(r)$ 及最小二乘法拟合直线如图 1 所示。

在模拟过程中, 我们假定大气消光系数为 $0.505(1/\text{km})$; 为简便起见, 取激光脉冲能量 $E = 1\text{J}$; 激光雷达仪器常数假定为 $C_A = 107(\text{SR} \cdot \text{m}^3/\text{s})$, 大气消光与后向散射系数之比 $R = 20(\text{SR})$ 。

由最小二乘法拟合可求得大气消光系数 σ 为 $0.50(1/\text{km})$, 激光雷达仪器常数为 $107.6(\text{SR} \cdot \text{m}^3/\text{s})$, 相对误差为 0.56% 。

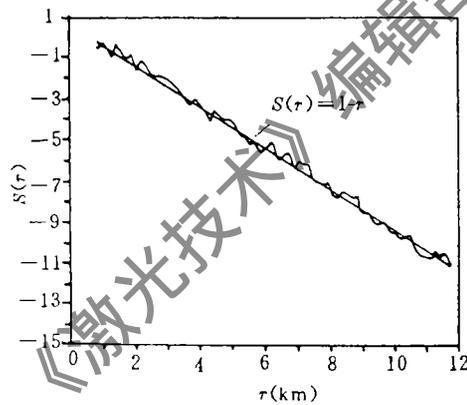


Fig. 1 Simulated lidar range-correcting return laser beam and least-square compromised line

四、实测结果分析

我们利用激光雷达 Lidar 625, 对近地面层大气进行了水平测量, 同时利用多道光电粒子计数器测量了近地面层的气溶胶粒子谱分布, 并用积分片法测量出与粒子谱分布对应的气溶胶粒子折射率, 实测的粒子谱分布如图 2 所示。

由实测气溶胶粒子谱及折射率, 计算得出近地面层气溶胶消光后向散射比为 21.173SR , 由于测量时大气较混浊, 可忽略分子散射的贡献, 以气溶胶粒子散射近似为大气对激光的散射。

实测激光雷达距离订正回波如图 3 所示。从图中可看出: 距离订正回波 $S(r)$ 随探测距离 r

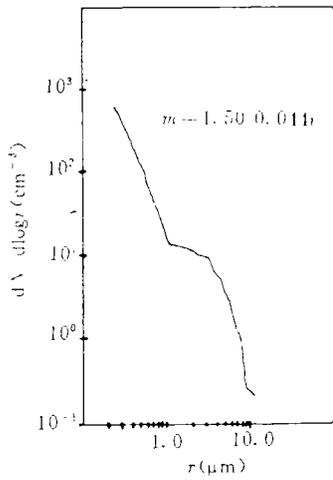


Fig. 2 Aerosol particle size distribution

的增加而呈线性递减趋势, 由于在接收激光雷达回波的线路中采用二极管限幅, 使得我们仅获得一定探测区间内的回波。

假定在探测区间 4~4.8km 内大气水平均匀。距离订正回波的最小二乘法拟合直线为: $S(r) = -0.294r + 3.856$, 由此求得大气消光系数 $\sigma = 0.147(1/\text{km})$, 单脉冲激光能量为 1J, 求得激光雷达仪器常数为 $6789.0 \pm 0.4(\text{SR} \cdot \text{m}^3/\text{s})$ 。

由(5)式可知, 如果测得了近地层气溶胶粒子折射率及粒子谱分布可由米氏理论计算出气溶胶粒子后向散射系数 β , 结合最小二乘法, 在激光脉冲能量已知的条件下, 也可定出激光雷达仪器常数 C_A 。但由于用多道光电粒子计数器测量气溶胶粒子谱分布时, 粒子的绝对浓度难以准确测量^[5], 而对粒子谱型的测量则可比较准确; 又因为气溶胶粒子后向散射系数与粒子浓度成正比, 因此, 气溶胶粒子后向散射系

数 β 的计算值会因浓度项的测量不准, 而产生较大误差, 进而造成激光雷达仪器常数定标的不准确。我们采用通过计算气溶胶消光与后向散射比的方法来进行仪器常数的定标, 由于气溶胶消光及后向散射都与气溶胶粒子浓度项因子成正比, 因此两者之比与该因子无关, 而与粒子谱型有关, 从而避免了因气溶胶粒子浓度项的测量不准导致仪器常数的定标误差。该定标方法较其它方法简便、易行, 用此方法对激光雷达仪器常数进行了标定, 结果令人满意。

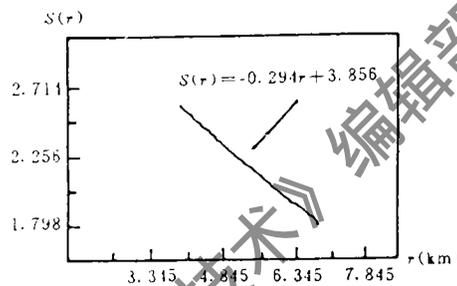


Fig. 3 Lidar range-correcting return laser beam

参 考 文 献

- 1 Hall F F Jr, Ageno H Y. Appl Opt, 1970; 9(8):1820
- 2 Russell P B, Swisler T J, McCormick M P. Appl Opt, 1979; 18(20):3783
- 3 Lin C, Baleer M. Appl Opt, 1973; 12(6):1356
- 4 Van de Hulst H C. Light scattering by small particles. New York: Wildy, 1957:119~130
- 5 胡欢陵, 许 军, 赵风生 *et al.* 科学通报, 1987; 38(1):631

作者简介: 张敬斌, 男, 1964 年 5 月 1 日出生。助教。现从事激光偏光技术工作。

收稿日期: 1993-02-01 收到修改稿日期: 1993-05-28