

# 激光雷达信号随机误差的估算\*

陶宗明<sup>1,2</sup>, 张清泽<sup>1</sup>, 方欣<sup>2</sup>, 汪少林<sup>2</sup>, 曹开法<sup>2</sup>, 胡顺星<sup>2</sup>, 纪玉峰<sup>2</sup>, 胡欢陵<sup>2</sup>

(1 炮兵学院 基础部物理教研室, 合肥 230031)

(2 中国科学院大气成分与光学重点实验室, 合肥 230031)

**摘要:** 在分析随机误差来源和激光雷达数据特点的基础上, 介绍一种新的随机误差计算方法——噪音比例因子方法. 该方法用一次测量数据列中远处背景信号算出噪音比例因子, 再由噪音比例因子求出任一距离上有用信号的随机误差. 用实测的激光雷达信号进行检验, 结果表明, 这种方法是可靠且可行的.

**关键词:** 大气光学; 激光雷达; 随机误差; 噪音比例因子

**中图分类号:** TN958.98

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1004-4213(2009)12-3279-4

## 0 引言

激光雷达在激光器发明后不久就被意大利人 Fiocco 等<sup>[1]</sup>用于大气探测. 近年来, 激光技术的发展提供了很好的激光雷达光源, 光电技术的进步大大提高了激光雷达的探测灵敏度, 使得激光雷达具有探测距离远、时空分辨率高等特点, 这样激光雷达就成为强有力的大气探测工具, 从而被广泛应用于大气监测等领域<sup>[2-7]</sup>.

准确估算激光雷达测量信号的误差是十分重要的, 在激光雷达的研制过程中, 用模拟计算的误差来帮助研究人员选择元件的技术参数; 在激光雷达数据反演过程中, 它可以提供和保证探测结果的可靠性. 误差传递理论常被用来估算激光雷达的误差, 这一理论需要知道各种误差源的误差<sup>[8]</sup>. 对于激光雷达而言, 测量误差的主要来源有: 量子噪音, 又称散粒噪音, 包括背景噪音和信号噪音、热噪音、暗电流噪音、探测器的非线性效应等. 从误差性质上又可分为随机误差和系统误差. 随机性可以通过多次重复测量来减小, 但系统误差却不同, 它将产生一个确定的偏移量. 本文主要讨论激光雷达信号随机误差及它的大小估算.

激光雷达的测量信号是一组离散距离上的回波信号, 传统估算随机误差的方法就是要进行多次测量, 由同一距离上的多次测量值来求出这一距离上的信号平均值和随机误差大小, 最后获得一组平均后的离散距离上回波信号, 和相应的回波信号随机误差. 故这种方法要存储每一次采集的所有数据, 数据存储量较大. 多次测量求随机误差的方法是建立

在被测量对象在测量时间内不发生变化的基础上, 若测量对象在测量时间内发生变化(如大气的波动等), 则这种变化就会被误认为是随机误差, 导致随机误差偏大. 本文介绍一种噪音比例因子(Noise Scale Factor, NSF)的方法, 仅用一组离散距离上的回波信号(可以是一次测量的激光雷达信号, 也可以是一组多次测量的平均信号)就可把各个距离上回波信号的随机误差算出来. 这一方法可以在一定程度上克服大气波动对计算随机误差的干扰, 具有明显的优点.

## 1 随机误差估算的一般方法

传统的随机误差估算方法就是在等精度情况下进行多次测量, 然后算出它的标准误差<sup>[8]</sup>. 例如, 有一被测量  $x$ ,  $N$  次测量值构成的数据列为:  $x_1, x_2, \dots, x_N$ , 则其平均值

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^N x_i / N \quad (1)$$

测量列的标准误差

$$\sigma_x = \sqrt{\sum_{i=1}^N (\bar{x} - x_i)^2 / (N-1)} \quad (2)$$

式中  $\sigma_x$  的物理意义是在  $N$  次测量中任一次测量值误差落在区间  $[-\sigma_x, \sigma_x]$  内的概率约为 68.3%.

由误差理论可知,  $N$  次测量平均值的标准误差

$$\sigma_{\bar{x}} = \sigma_x / \sqrt{N} \quad (3)$$

式中  $\sigma_{\bar{x}}$  表示平均值的误差落在区间  $[-\sigma_{\bar{x}}, \sigma_{\bar{x}}]$  内的概率约为 68.3%. 当测量次数  $N$  足够大时,  $\sigma_x$  是一个不随测量次数  $N$  变化的值, 即测量列的误差与测量次数无关, 而  $\sigma_{\bar{x}}$  却随测量次数  $N$  的增加而变小, 即平均值的误差随测量次数  $N$  的根号成反比, 这就是通常所说的多次测量减小随机误差的理论基础.

\* 科技部科技基础性专项基金(2007FY110700)资助

Tel: 0551-5591002

Email: zmtao@aiofm.ac.cn

收稿日期: 2009-04-01

修回日期: 2009-05-28

## 2 激光雷达信号随机误差估算的 NSF 方法

光电倍增管和雪崩二极管是激光雷达的主要探测器件,它们把光信号转换为电信号,工作方式有模数转换和光子计数方式两种,下面的讨论就是以这两种探测器件为对象的.激光雷达探测的信号中包括大气分子和气溶胶的后向散射信号、天空的背景信号和探测器的暗电流等,它们都具有随机性,理论和实验都表明上述两种探测器发射的光电子概率服从泊松(Poisson)分布<sup>[9-10]</sup>.对于泊松分布,它的特点为

$$\sigma_x^2 = \bar{x} \quad (4)$$

即标准误差的平方等于其平均值的大小.

实际上,当光电倍增管和雪崩二极管工作在模数转换方式下,其阳极输出的光电子不在服从泊松分布,主要原因是光电子在探测器中多次放大所引起的.这种多次放大就要产生附加噪音<sup>[11]</sup>,在有附加噪音的情况下,光电子的标准误差与其平均值之间的关系变化为

$$\sigma_x^2 = k \bar{x} \quad (5)$$

式中,  $k$  为与探测器有关的比例系数.这一比例系数可用噪音比例因子 NSF 来替代,则式(5)可写成

$$\sigma_x = \text{NSF} \sqrt{\bar{x}} \quad (6)$$

NSF 具有测量量平均值开根号的量纲.若激光雷达的探测器工作在光子计数的方式,输出的是光子数,附加噪音的影响可以忽略不计,式(1)仍然成立,故  $\text{NSF} = 1$ .若激光雷达的探测器工作在模数转换方式,必须要考虑光电子倍增和附加噪音的影响,这时 NSF 大小就要由探测器的技术参数来决定<sup>[10]</sup>,可表达为

$$\text{NSF} = (2eBFGG_A)^{1/2} \quad (7)$$

式中,  $e$  为电子电量,  $B \approx 1/2\tau$  为探测器的带宽,  $F$  表征倍增引起的噪声系数,  $G$  为光电倍增管的放大倍数,  $G_A$  是探测器阳极电流转换为数字信号的增益因子.由  $N$  次测量平均值的标准误差和单次测量标准误差之间的关系式(3),可得  $N$  次测量平均值的噪声比例因子为

$$\text{NSF} = (2eBFGG_A/N)^{1/2} \quad (8)$$

由本文分析可知, NSF 与探测器输出的物理量有关,与探测器的硬件和参数设置有关,平均值的 NSF 还与测量的平均次数有关,但与被测量的平均值大小无关.

引入 NSF 的目的就是要通过它来估算激光雷达信号的随机误差.在光电探测器测量参数设置不变的情况下, NSF 就是一个定值.在一次测量中,被

测物理量的平均值就近似用该次测量的值来代替,则一次测量中被测物理量的随机误差可近似表示为

$$\sigma_x \approx \text{NSF} \sqrt{x} \quad (9)$$

实际的激光雷达测量信号中包含着背景噪音,故有用信号  $v_s$  为

$$v_s = v_t - \bar{v}_b \quad (10)$$

式中,  $v_t$  为激光雷达测量到的总信号,  $\bar{v}_b$  背景信号的平均值,由误差传递公式和式(9)可得,有用信号的随机误差

$$\sigma_s = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_{\bar{v}_b}^2} \approx \sqrt{(\text{NSF}^2 v_t + \sigma_{\bar{v}_b}^2)} \quad (11)$$

式中,  $\sigma_{\bar{v}_b}$  为背景信号平均值的标准误差,它与背景信号的标准误差  $\sigma_{v_b}$  关系为

$$\sigma_{\bar{v}_b} = \frac{\sigma_{v_b}}{\sqrt{N_b}} \quad (12)$$

$N_b$  代表计算背景信号误差时所取的数据个数.结合式(6)和式(10),式(11)还可以变换为

$$\sigma_s \approx \sqrt{(\text{NSF}^2 V_s + \sigma_{v_b}^2 + \sigma_{\bar{v}_b}^2)} \quad (13)$$

式(13)就是利用 NSF 方法估算单次激光雷达信号随机误差的公式.

NSF 是由式(6)来定义的,通常情况下要通过多次测量的数据获得标准误差和平均值后,然后才可以算出其大小.但激光雷达信号所具有特点提供了用一次测量结果就可估算 NSF 的可能性.一次测量的激光雷达信号由一系列不同距离上的回波信号组成(称为测量距离列),远处的回波信号就可以看成是纯粹背景信号.如前所述,背景信号强度不变且又是随机的,这样激光雷达一次测量距离列中远处(纯背景)不同距离上的信号就可以看成是远处同一距离上不同时间探测到的信号,即用一次测量距离列中远处不同距离上的信号代替远处同一距离上不同次数的测量信号,用这种替代的方法从一次激光雷达信号中就能获得噪音比例因子.

## 3 应用

安光所 AML-2 测污激光雷达可用来测量大气中的气溶胶、臭氧、二氧化硫和二氧化氮等<sup>[12]</sup>.以该台激光雷达在 2008 年 12 月 25 日 13 时 38 分测量数据为例,对所测得的 532 nm 回波信号分别用两种方法估算出它们的随机误差,如图 1.方法一是用传统的方法估算,即利用公式(2),由 10 个脉冲回波信号算出任一个脉冲回波信号的标准误差,不同距离上的标准误差在图中用虚线表示;方法二是利用 NSF 方法,即由一个脉冲的测量结果来估算,不同距离上的标准误差在图中用实线表示.从图 1 中可以看出,标准误差的大小在 1 km 以上随高度变化

关系是振荡的,两种方法估算出的结果廓线在 1 km 以上基本一致,符合较好.因为在当天的测量中,1 km 以上的高度上大气分子的散射占主要地位,而大气分子随时间变化一般不大.这一比对结果说明 NSF 方法是可靠的.在 1 km 以下,标准误差的大小随高度降低而增加,但两种方法估算出的结果明显不一致,并且是传统的方法估算出的标准误差偏大,这是由于大气中气溶胶波动所造成的.在这 10 次测量的时间内,大气气溶胶有所波动,在传统的方法中把这种大气气溶胶的波动看成是随机误差.用激光雷达实验数据对这两种方法计算标准误差进行过多次比对,其结果和图 1 基本相同.这一比对情况说明 NSF 方法优越性,大气波动对这种方法的干扰较小.对机载和星载激光雷达,由于激光雷达相对于大气在运动,每一个脉冲激光探测到的大气都在变化,这种情况下 NSF 方法特别合适.

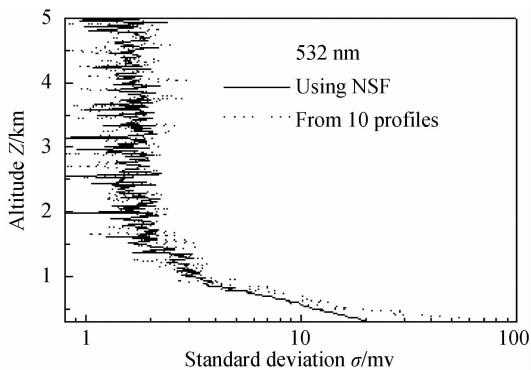


图 1 激光雷达信号标准误差廓线  
Fig. 1 Profile of standard deviation lidar signals

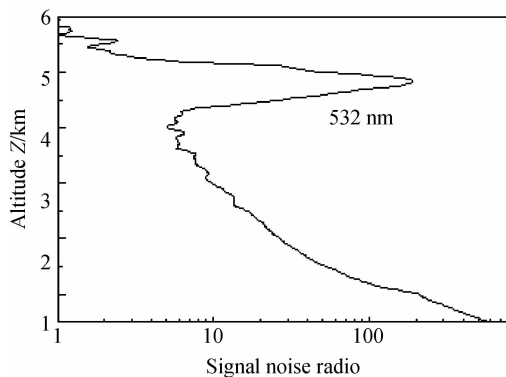


图 2 激光雷达信噪比廓线  
Fig. 2 profile of signal to noise ratio of lidar

用 NSF 方法估算出激光雷达信号的随机误差后,可以方便地把这种误差传递给其它被反演的物理量,如相对误差、信噪比、污染物浓度等.安光所 AML-2 测污激光雷达在 2008 年 11 月 21 日 10 时 48 分时测量中,发现在 5 km 左右有一层云,由 NSF 方法估算出 2000 个脉冲平均回波信号的随机误差,然后得出测量信号的信噪比廓线,如图 2.由这一信噪比廓线可判断出激光雷达的有效探测距离、信号

的可信度等信息.

## 4 讨论与结论

一般测量中,一次测量得到一个数据,多次测量结果组成一个测量列,构成一维数据;而激光雷达一次测量中不同距离上的回波信号就形成一个数据列,多次测量就有多个数据列,结果就是二维数据.激光雷达一次测量中不同距离上的回波信号就形成的列称为距离列,测量次数形成的列称为次数列.激光雷达数据的随机误差估算本质上就是对次数列数据的处理,而不是对距离列数据的处理.

理论和实验都表明, $N$  次测量后平均值的随机误差是单次测量随机误差的  $1/\sqrt{N}$  倍.为了减小随机误差,实际探测中激光雷达要进行多次测量,将多次测量的平均值(模数转换方式)或者是总和(光子计数方式)作为一组新距离列数据,然后计算这一新距离列数据的随机误差.要想算出这一新距离列数据的随机误差,传统的方法有两种途径:一是要把这  $N$  次测量结果的二维数据分别存储起来,然后算出它们平均值的误差;或者是要有多个这样的新距离列数据,然后算次数列的误差.第一种方法的不足之处是要存储大量的数据,而第二种方法的缺点是进行多个  $N$  次测量,占用大量的测量时间,且在这个测量时间内若大气波动较大,会带来附加的偏差.用 NSF 方法就可以由这一个新距离列(一维数据,即只需要存平均结果,而不需要存每一个脉冲的数据,可节省大量存储空间)把随机误差算出来,而不必用上面提及的二种传统方法.激光雷达实测数据随机误差估算结果对比表明,用 NSF 方法估算激光雷达的随机误差是可行和可靠的.

### 参考文献

- [1] FIOCCO G, SMULLIN L D. Detection of scattering layers in the upper atmosphere (60-140 km) by Optical Radar [J]. *Nature*, 1963, **199**(4900): 1275- 1276.
- [2] WINKER D M, PELON J, MCCORMICK M P. The CALIPSO mission: Spaceborne lidar for observation of aerosols and clouds [C]. *SPIE*, 2003, **4893**: 1- 11.
- [3] LIU Jun, HUA Deng-xin, LI Yan. Ultraviolet lidar for profiling of the urban atmospheric aerosol in spatial and temporal at Xi'an [J]. *Acta photonica Sinica*, 2007, **36**(8): 1534- 1537. 刘君, 华灯鑫, 李言. 紫外域激光雷达探测西安城区上空大气气溶胶时空剖面 [J]. *光子学报*, 2007, **36**(8): 1534- 1537.
- [4] WANG Hong-bo, WANG Zhi-hua, HE Jie, et al. Lidar measurements of lower cloud in Chengdu [J]. *Acta photonica Sinica*, 2007, **36**(2): 350- 354. 王宏波, 王治华, 何捷, 等. 成都地区中低云层的激光雷达探测 [J]. *光子学报*, 2007, **36**(2): 350- 354.
- [5] LIU Cheng, MING Hai, WANG Pei, et al. Measurements of the aerosol over Naqu of Tibet and suburb of Beijing by

- micropulse lidar(MPL) [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(9):1435- 1439.
- 刘诚,明海,王沛,等. 西藏那曲与北京郊区对流层气溶胶的脉冲激光雷达测量[J]. *光子学报*, 2006, **35**(9):1435- 1439.
- [6] TAO Zong-ming, MCCORMICK M P, WU Dong, *et al.* Measurements of cirrus cloud backscatter color ratio with a two-wavelength lidar [J]. *Appl Opt*, 2008, **47**(10): 1478-1485.
- [7] LIU Hou-tong, LI Chao, HU Shun-xing, *et al.* Impact of birefringence device on the polarization sounding of airborne lidar [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(1):5- 10.
- 刘厚通,李超,胡顺星,等. 双折射器件对机载激光雷达偏振探测影响的研究[J]. *光子学报*, 2009, **38**(1):5-10.
- [8] DU Yi-lin, SUN Wen-bin, LING Jie. College experimental physics [M]. Hefei: University of Science and technology of China Press, 2002.
- 杜义林,孙文斌,凌洁. 大学实验物理教程 [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2002.
- [9] SALEH B. Photoelectron statistics with application to spectroscopy and optical communication [M]. Vol. 6 of Springer Series in Optical Sciences, Chap. 5. New York: Springer, 1978.
- [10] LIU Z, HUNT W, VAUGHAN M, *et al.* Estimating random errors due to shot noise in backscatter lidar observations [J]. *Appl Opt*, 2006, **45**(18):4437- 4447.
- [11] LIU Z, SUGIMOTO N. Simulation study for cloud detection with space lidar using analog detection photomultiplier tubes [J]. *Appl Opt*, 2002, **41**(9):1750-1759.
- [12] QU Kai-feng, ZHANG Yin-chao, TAO Zong-ming, *et al.* Measurement of surface ozone with mobile lidar system [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2006, **23**(3): 365-368.
- 屈凯峰,张寅超,陶宗明,等. 车载测污激光雷达探测近地面层臭氧 [J]. *量子电子学报*, 2006, **23**(3):365 - 368.

## Estimation of Random Errors for Backscatter Lidar Observations

TAO Zong-ming<sup>1,2</sup>, ZHANG Qing-ze<sup>1</sup>, FANG Xin<sup>2</sup>, WANG Shao-lin<sup>2</sup>, CAO Kai-fa<sup>2</sup>,  
HU Shun-xing<sup>2</sup>, JI Yu-feng<sup>2</sup>, HU Huan-ling<sup>2</sup>

(1 Section of Physics T&R, Department of basic sciences, Artillery Academy, Hefei, 230031, China)

(2 Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation,  
Chinese Academy of Sciences, Hefei, 230031, China)

**Abstract:** Based on the analysis of random errors and characteristic of lidar data, a new method of estimating random errors is introduced, which is called noise scale factor method. Using background signals in far range in one measurement, the noise scale factor is obtained, and the uncertainty of lidar signals at any distances can be estimated. The experiment results show that this method is reliable and feasible.

**Key words:** Atmospheric optics; Lidar; Random error; Noise scale factor



**TAO Zong-ming** was born in 1962. He received his Ph. D. Degree from Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics in 2005. From 2005 to 2007, he works as a visiting scientist at Hampton University in USA. His current research interests focus on lidar measurement, lidar data analysis and lidar development.