

文章编号: 1001-3806(2009)01-0094-03

## 基于布里渊激光雷达测量大气声速误差分析

梁琨, 马泳\*, 程飞, 王宏远

(华中科技大学 电子与信息工程系 武汉光电国家实验室, 武汉 430074)

**摘要:** 为了对大气声速误差进行分析, 利用布里渊散射信号激光雷达对大气声速进行了测量, 分析了大气声速与大气布里渊频移、大气折射率和入射激光波长的具体关系, 利用该方法测量了大气声速的精度, 并进行了数值分析。结果表明, 在标准大气条件下, 0km~86km 海拔高度范围内大气声速测量的不确定度小于 0.269m/s。该误差的分析对激光雷达的设计具有参考价值。

**关键词:** 大气与海洋光学; 激光雷达; 布里渊散射; 声速; 误差分析

**中图分类号:** TN958.98; O437.2 **文献标识码:** A

### Measurement error analysis of the velocity of sound in atmosphere based on Brillouin lidar

LIANG Kun, MA Yong, CHENG Fei, WANG Hong-yuan

(Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Department of Electronic and Information Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** In order to analyze the error of the velocity of sound in atmosphere, based on Brillouin lidar, the measuring method of sound velocity in atmosphere was put forward for its high precision, high speed and real time. The concrete relation between the velocity of sound and other atmosphere parameters was analyzed. Then, the measurement error of the velocity of sound was calculated and the numerical analysis was fulfilled. The results show that, in the condition of standard atmosphere, the precision of the velocity of sound is less than 0.269m/s in the height of 0km~86km. The Brillouin frequency shift has a greater influence on the error of the velocity of sound than the refractive index and the laser wavelength in the atmosphere. This analysis is a significant guide for the lidar design.

**Key words:** atmospheric and ocean optics; lidar; Brillouin scattering; velocity of sound; error analysis

## 引言

近年来,随着激光及其相关技术的发展,特别是边缘探测技术<sup>[1-4]</sup>的应用,使得利用布里渊散射进行空间目标探测已经得到了广泛的应用<sup>[5-6]</sup>。由于光的入射和散射是几乎同时发生的,所以利用布里渊散射法测量大气声速具有很高的实时性。另外,布里渊散射方法与常规的幅度探测方法不同,它采用了调频探测技术,即探测回波信号的频率移动。由于采用了调频探测技术,因此这一新方法具有信噪比高、测量精度高的优点。同时,布里渊频移受声速影响很大,而与其它环境参量的联系较小,大气声速的大小可以精确地通过布里渊频移量直接反演得出。基于布里渊散射的上述

特性,利用布里渊散射激光雷达测量大气声速是目前的一个主要研究内容和发展趋势。

在大气声速测量系统中,声速的测量精度是衡量系统性能的一个关键指标,该测量精度与其它物理量的测量精度有关。本文中详细讨论了大气声速与其它物理量的关系,分析了各物理量的误差对大气声速误差的影响,并进行了数值计算和结果分析。

## 1 测量原理

激光在大气介质中传输时,总是伴随着布里渊散射的发生。布里渊散射是入射光波场与介质内的弹性声波场相互作用而产生的一种非弹性光散射。散射光的频率相对于入射光的频率发生变化,即产生布里渊频移  $\Delta V_B$ , 其散射峰对称地分布在入射光频率的两侧。布里渊频移可由下式表示<sup>[7]</sup>:

$$\Delta V_B = \pm \frac{2n}{\lambda} v \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (1)$$

式中,  $n$  为介质的折射率,  $v$  为介质中的声速,  $\lambda$  为入射

基金项目:湖北省自然科学基金资助项目(2006ABA084)

作者简介:梁琨(1981-),男,博士研究生,主要从事激光雷达探测和信号处理方面的研究工作。

\* 通讯联系人。E-mail: mayong@mail.hust.edu.cn

收稿日期:2007-11-06;收到修改稿日期:2008-04-24

激光的波长,  $\theta$  为光散射角。当  $\theta = 180^\circ$ , 即为后向散射光时, 则(1)式可表示为:

$$\Delta V_B = \pm \frac{2n}{\lambda} v \quad (2)$$

由(2)式即可推出声速  $v$  的表达式:

$$v = \pm \frac{\Delta V_B \cdot \lambda}{2n} \quad (3)$$

由(3)式可以看出, 大气中的声速  $v$  可表示为大气布里渊频移  $\Delta V_B$ 、入射激光波长  $\lambda$  和大气折射率  $n$  三者的函数, 且与  $\Delta V_B$ 、 $\lambda$  成正比, 与  $n$  成反比。大气折射率一般分布在 1.0000 ~ 1.0003 之间<sup>[8]</sup>, 其变化很小, 可近似认为是常数, 则在入射激光波长一定 ( $\lambda = 532\text{nm}$ ) 的情况下, 只要精确地测量出大气布里渊频移的大小, 就能够依据(3)式准确地求出大气中的声速。

一般情况下, 0km ~ 86km 高度范围内的大气布里渊频移大致分布在 1.0GHz ~ 1.3GHz 之间<sup>[9]</sup>。取入射激光波长  $\lambda = 532\text{nm}$ , 大气折射率  $n = 1$ 。由(3)式可以得到大气声速与大气布里渊频移的关系, 如图1所示。

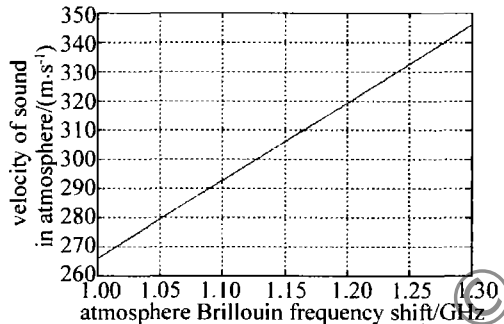


Fig. 1 Velocity of sound in atmosphere versus atmosphere Brillouin frequency shift

由图1可以看出, 大气声速随大气布里渊频移的增大而增大, 并近似成线性关系。当大气布里渊频移在 1.0GHz ~ 1.3GHz 之间变化时, 大气声速大约在 260m/s ~ 350m/s 之间变化。由于大气声速与布里渊频移呈一一对应的关系, 因此, 准确地测量出大气的布里渊频移即可求出大气中声速的大小。

## 2 测量精度分析

由(3)式可看出, 大气声速为入射激光波长  $\lambda$ 、大气折射率  $n$  和大气布里渊频移  $\Delta V_B$  的函数, 所以声速测量精度取决于上述三者的精度。以  $\lambda$ 、 $n$  和  $\Delta V_B$  为变量, 则大气声速测量的总不确定度  $\delta v$  可表示为:

$$\delta v =$$

$$\sqrt{\left(\frac{\partial v}{\partial \lambda}\right)^2 (\delta \lambda)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial n}\right)^2 (\delta n)^2 + \left[\frac{\partial v}{\partial (\Delta V_B)}\right]^2 [\delta (\Delta V_B)]^2} \quad (4)$$

其中,  $\delta \lambda$ ,  $\delta n$  和  $\delta (\Delta V_B)$  分别为  $\lambda$ ,  $n$  和  $\Delta V_B$  的不确定度,  $\frac{\partial v}{\partial \lambda}$ ,  $\frac{\partial v}{\partial n}$  和  $\frac{\partial v}{\partial (\Delta V_B)}$  分别为(3)式中  $v$  对  $\lambda$ ,  $n$  和  $\Delta V_B$

求偏导。

由于目前采用的激光稳频技术可以使得由激光频率漂移造成的频率不确定度  $\delta f$  控制在 10MHz 以内<sup>[10-11]</sup>, 所以, 由激光频率的不确定度带来的激光波长  $\lambda$  的不确定度为:

$$\delta \lambda < 10^{-6} \text{ nm} \quad (5)$$

当忽略其它参量影响, 从(4)式和(5)式可得仅由入射激光波长的不确定度带来的大气声速测量的不确定度为:

$$\delta v_1 = \sqrt{\left(\frac{\partial v}{\partial \lambda}\right)^2 (\delta \lambda)^2} < 10^{-5} \text{ m/s} \quad (6)$$

因此, 在实际计算和仿真大气声速测量的不确定度时, 此项带来的测量误差可忽略不计。

由于大气折射率  $n$  一般分布在 1.0000 ~ 1.0003 之间, 而本文将  $n$  作为常数对待, 取  $n = 1$ 。所以折射率的不确定度为:

$$\delta n < 10^{-4} \quad (7)$$

当忽略其它参量影响, 从(4)式和(7)式可得仅由入射折射率的不确定度带来的大气声速测量的不确定度为:

$$\delta v_2 = \sqrt{\left(\frac{\partial v}{\partial n}\right)^2 (\delta n)^2} < 0.035 \text{ m/s} \quad (8)$$

影响大气布里渊频移测量精度的因素主要与激光的光强、激光在大气中的衰减以及接收固体角等因素有关。一般来说, 大气布里渊频移达到 1MHz 的测量精度很容易实现<sup>[12]</sup>。所以, 这里可以认为大气布里渊频移的不确定度为:

$$\delta (\Delta V_B) < 1 \text{ MHz} \quad (9)$$

当忽略其它参量影响时, 从(4)式和(9)式可得仅由大气布里渊频移的不确定度带来的大气声速测量的不确定度为:

$$\delta v_3 = \sqrt{\left[\frac{\partial v}{\partial (\Delta V_B)}\right]^2 [\delta (\Delta V_B)]^2} < 0.266 \text{ m/s} \quad (10)$$

由以上分析可知, 由入射激光波长的不确定度带来的大气声速测量的不确定度非常小, 因此, 在实际计算和仿真大气声速测量的不确定度时, 此项带来的测量误差可忽略不计。

综上所述, 当入射激光波长、大气折射率分别取典型值  $\lambda = 532\text{nm}$ ,  $n = 1$  时, 将(5)式、(7)式、(9)式代入(4)式中可得由入射激光波长、大气折射率和大气布里渊频移的不确定度带来的大气声速测量的总不确定度:

$$\delta v < 0.269 \text{ m/s} \quad (11)$$

为了更直观、精确地看出利用布里渊散射激光雷达测量大气声速的不确定度与各个参量的关系。分别根据理论计算了假定大气折射率一定大气布里渊频移与大气声速测量的不确定度关系, 和假定大气布里渊频移

一定大气折射率与大气声速测量的不确定度关系。

由图2和图3可以看出,当大气折射率 $n$ 一定的时候,大气声速测量的不确定度随着大气布里渊频移

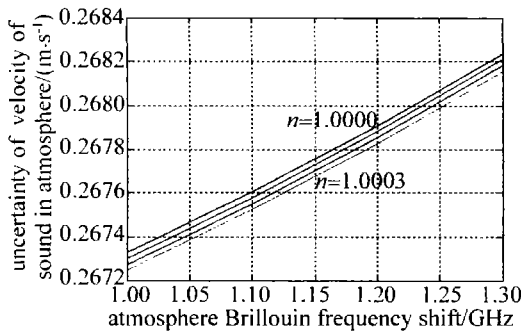


Fig. 2 Atmosphere Brillouin frequency shift versus the uncertainty of velocity of sound in atmosphere

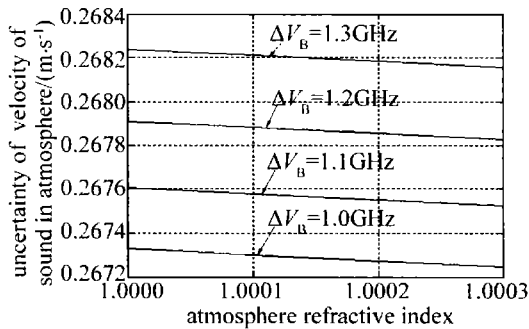


Fig. 3 Atmosphere refractive index versus the uncertainty of velocity of sound in atmosphere

的增大而增大,并近似成线性关系,且斜率较大,说明大气布里渊频移对大气声速的测量精度影响较大。当大气布里渊频移 $\Delta V_B$ 一定的时候,大气声速测量的不确定度随着大气折射率的增大而减小,也近似成线性关系,但斜率较小,说明大气折射率对大气声速的测量精度影响较小。所以在实际测量时,由于大气折射率的 $n=1$ 对测量结果影响很小。在典型值 $\Delta V_B=1.3\text{GHz}$ , $n=1$ 时,声速测量的总不确定度小于 $0.269\text{m/s}$ 。

### 3 结论

分析了布里渊激光雷达系统测量大气声速的误差,对各物理量具体对声速测量精度的影响做了详细

分析和数值计算。结果表明,在 $0\text{km}\sim 86\text{km}$ 海拔高度范围内使用该方法测量大气声速的不确定度小于 $0.269\text{m/s}$ ,同时,大气声速的误差受布里渊频移量测量精度的影响较大,而受大气折射率和激光入射波长的误差影响较小。该误差的分析对布里渊激光雷达测量大气声速系统的设计有着重要的参考意义。

### 参考文献

- [1] KORB C L, GENTRY B M, WENG Ch Y. Edge technique: theory and application to the lidar measurement of atmospheric wind [J]. Appl Opt, 1992, 31(21): 4202-4213.
- [2] PIIRONEN P, ELORANTA W. Demonstration of a high-spectral-resolution lidar based on an iodine absorption filter [J]. Opt Lett, 1994, 19(3): 234-236.
- [3] KORB C L, GENTRY B, HAYS P B. Observations winds with an incoherent lidar detector [J]. Appl Opt, 1992, 31(22): 4509-4514.
- [4] MA Y, LIN H, JI H, et al. Lidar system design based on brim detecting technology [J]. Chinese Journal of Lasers, 2007, 34(2): 170-175 (in Chinese).
- [5] WANG L L, REN G, ZHANG Y, et al. Study of Brillouin scattering in atmosphere [J]. Laser Technology, 2003, 27(4): 365-367 (in Chinese).
- [6] HUANG Zh H, REN G, CAI B W, et al. Calculation of detecting spatial object based on Brillouin scattering [J]. Laser Technology, 2004, 28(5): 518-520 (in Chinese).
- [7] CHENG G X. Roman Brillouin scattering [M]. Beijing: Science Press, 2001: 576-580 (in Chinese).
- [8] ZHANG X J, JIANG W H. Numerical calculation and results analysis for atmospheric refraction and atmospheric dispersion [J]. Opto-electronic Engineering, 2002, 29(2): 1-5 (in Chinese).
- [9] MA Y, LIANG K, LIN H, et al. Model of atmosphere detection in based on Brillouin scattering [J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(6): 962-966 (in Chinese).
- [10] PAN Q, ZHANG T C, ZHANG Y, et al. Intracavity frequency-doubled and frequency-stabilized CW ring Nd: YAP laser [J]. Appl Opt, 1998, 37(12): 2394-2396.
- [11] LI X Y, PAN Q, JING J T, et al. LD pumped intracavity frequency-doubled and frequency-stabilized Nd: YAP/KTP laser with 1.1W output at 540nm [J]. Opt Commun, 2002, 201(1/3): 165-171.
- [12] FRY E S, EMERY Y, QUAN X H, et al. Accuracy limitations on Brillouin lidar measurements of temperature and sound speed in the ocean [J]. Appl Opt, 1997, 36(27): 6887-6894.

(上接第93页)

- [13] LIN Y. Distributed phase plates for super-Gaussian focal-plane irradiance profiles [J]. Opt Lett, 1995, 20(7): 764-766.
- [14] BENNETT A P, SHAPIRO J L. Analysis of genetic algorithms using statistical mechanics [J]. Phys Rev Lett, 1994, 72(9): 1305-1309.
- [15] FENG D, TAN Q F, YAN Y B, et al. A new hybrid algorithm for designing the continuous phase screen used for beam shaping [J].

SPIE, 2001, 4443: 16-23.

- [16] DONG M F, SONG X X, LI S. The designation and experiment of the DOE applied to shape the laser beam to square frame shape [J]. Laser Technology, 2005, 29(2): 169-182 (in Chinese).
- [17] WEN Sh L, SU J Q, DONG J, et al. Spheric long-focal-depth lens [J]. Opt Commun, 2007, 278(1): 14-16.