

文章编号: 0253-2239(2007)06-0962-5

# 基于布里渊散射信号检测的大气探测模型<sup>\*</sup>

马 泳 梁 琨 林 宏 冀 航

(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:** 以激光信号在传输介质中的布里渊散射频移量模型为基础, 依据相关大气数据建立基于布里渊散射信号检测的大气探测模型。该模型中布里渊频移量只与大气高度相关, 详细描述了低空大气范围内布里渊频移量的连续分布状态。结果表明在 0~86 km 的海拔高度范围内, 大气的布里渊散射频移量分布在 1.0~1.3 GHz 之间。与有关数据相比, 该模型与实际情况非常符合, 同时具有很好的连续性和普适性。

**关键词:** 大气光学; 激光雷达; 布里渊散射; 大气参量; 数学模型

中图分类号: O437.2 文献标识码: A

## Model of Atmosphere Detection in Based on Brillouin Scattering

Ma Yong Liang Kun Lin Hong Ji Hang

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

**Abstract:** Based on Brillouin scattering frequency-shift model of laser transmitting through medium and relative atmospheric data, an atmospheric detection model based on detecting Brillouin scattering signal is established. In this model, Brillouin frequency shift is only correlative to the atmospheric altitude. The continuous distribution state of Brillouin frequency shift of low atmosphere is described in detail. The result shows that atmospheric Brillouin frequency shift is distributed from 1.0~1.3 GHz at the altitude from 0~86 km. This model, presents the data agreeing well with practical data and has good continuity and generality.

**Key words:** atmospheric optics; lidar; Brillouin scattering; atmospheric parameters; mathematic model

## 1 引 言

边缘探测技术<sup>[1~3]</sup>是近年来出现的一种光谱探测技术, 最早由 C. Laurence Korb 等<sup>[4]</sup>在 1992 年提出, 它的基本原理是使被测光的频率位于一个高分辨力光学滤波器光谱响应函数的边缘。由于高分辨力光学滤波器的光谱线型轮廓具有很陡的斜率, 因此被测光频率的微小变化都将导致通过光学滤波器后的光强发生很大变化, 从而实现被测光的精确测量。由于边缘探测技术是基于频域检测, 所以具有测量精度高、信噪比高等优点<sup>[5]</sup>。C. Laurence Korb 等首次将边缘探测技术应用于激光在大气散射多普勒频移的测量中, 采用波长 1064 nm 的激光雷达对 0~20 km 高度的大气风速进行测量, 达到

了 0.5 m/s 的精度。

基于边缘探测技术的激光雷达系统通过检测布里渊散射光信号频移量的变化监测大气环境。依据布里渊散射光信号频移量的大小进一步得到大气环境参量是激光雷达探测的核心任务。

王连亮等<sup>[6]</sup>计算了 60 km 以下 15 个不同高度下的布里渊频移量, 然而该研究仅仅计算出 15 特定高度下布里渊频移量的大小, 缺乏其他高度下布里渊频移量的计算数据, 不能描述出连续高度下布里渊频移量的分布。本文从建立大气参量模型入手, 构建了低空大气 (86 km 以下, 大气圈质量的 99.999% 都集中在这个范围内) 连续高度下的大气参量及布里渊散射频移的函数模型, 并进行了数值

<sup>\*</sup> 湖北省自然科学基金(2006ABA084)资助课题。

作者简介: 马 泳(1971—), 男, 湖北襄樊人, 副教授, 硕士生导师, 主要从事激光雷达探测和激光通信方面的研究。

E-mail: mayong@mail.hust.edu.cn

收稿日期: 2006-08-08; 收到修改稿日期: 2006-10-16

仿真,详细描述了任意高度下大气参量及布里渊频移量大小的分布状态,证实了该模型的完备性和普适性。

## 2 理论模型

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光散射现象<sup>[7]</sup>。散射光频率随入射光频率发生变化,产生布里渊频移  $\Delta\nu_B$ ,其布里渊散射峰对称分布在以入射光为中心频率的两侧,频移的大小与散射角和散射介质内的声波场特性直接相关:

$$\Delta\nu_B = 2\left(\frac{kv}{2\pi}\right) = \pm \frac{2n}{\lambda}v \cdot \sin\left(\frac{\theta}{2}\right), \quad (1)$$

式中  $n$  为介质折射率,  $v$  为介质的声速,  $\lambda$  为入射激光波长,  $k$  为波矢,  $\theta$  为入射光与散射光波矢之间的夹角。当  $\theta = 180^\circ$ , 即为后向散射光时, (1) 式变为

$$n = 1 + 0.379 \frac{7.5 \times 10^{-3} \cdot P \cdot \{1 + 7.5 \cdot P \cdot [0.817 - 0.0113(T - 273.15)] \times 10^{-9}\}}{T} \times \left(83.4213 + \frac{24060.3}{130 - \lambda^{-2}} + \frac{159.97}{38.9 - \lambda^{-2}}\right) \times 10^{-6}, \quad (3)$$

式中  $P$  为该点大气压强,  $T$  为该点绝对温度,  $\lambda$  为激光波长。

由(3)式可知,大气折射率是关于大气温度与压强的函数,大气温度与压强这两个参量可以根据标准大气模型<sup>[9]</sup>求出。

根据不同高度下温度变化率的不同把低空大气(86 km 以下部分)分为 7 层,其中每一层的温度变化率可以近似认为是高度的线性函数,不同高度的温度为

$$T = T(b) + l(b)[H - H(b)], \quad (4)$$

式中  $b$  代表某一层,  $T(b)$  为该层大气中起始点的温度,  $l(b)$  为该层的温度变化率,  $H - H(b)$  为该点与所在层起始点的高度差。

大气不同高度处的压强计算公式为

$$P = \begin{cases} P(b) \cdot \exp\left(-\frac{g_0 m_0}{R_s}\right) \cdot \frac{H - H(b)}{T(b)}, & \text{温度变化率 } l = 0 \\ P(b) \cdot \exp\left(-\frac{g_0 m_0}{R_s}\right) \cdot \lg \frac{T(b)}{T} \frac{1}{l(b)}, & \text{温度变化率 } l \neq 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中  $P(b)$  为该层初始点的大气压强,可根据该点的温度和海拔高度计算出,  $g_0$  为海平面的重力加速度,  $m_0$  为海平面上空气的分子量,  $R_s$  是气体常数。

$$\Delta\nu_B = 2\left(\frac{kv}{2\pi}\right) = \pm \frac{2n}{\lambda}v. \quad (2)$$

由(2)式可知,布里渊频移量的大小是关于折射率、声速和入射激光波长等函数,与折射率、声速成正比,与入射激光波长成反比。

在大气介质中,布里渊频移量  $\Delta\nu_B$  在激光波长一定的情况下与大气的声速及折射率有关,而大气的声速和折射率是大气温度、密度、压强、湿度等参量的函数。由于大气成分比较复杂,气体状态也不固定,这给对大气的分析带来一定困难。为了简化模型,假设空气为标准气体,并忽略大气湍流、气溶胶的影响。通常,大气折射率是大气温度、湿度和气压的函数,并且与光波的波长有关。一般情况下,大气湿度对折射率的影响较小,可以忽略不计<sup>[8]</sup>。

Elden 在 1966 年建立了一个忽略大气湿度影响的干空气折射率模型,该模型如下所示:

声音在大气中的传播速度( $v_s$ ) 主要由空气的绝对温度决定的,与空气密度无关<sup>[10]</sup>,可以近似写成:

$$v_s = \sqrt{\frac{\gamma \cdot R_s}{m_0} \cdot T}, \quad (6)$$

式中  $\gamma$  为理想气体的比热。

将(3)式~(6)式代入(2)式,得到大气布里渊后向散射频移量只与与大气高度有关,从而可以计算出连续高度上的布里渊频移量,使模型具有很好的连续性和普适性。

## 3 数值模拟与分析

本文以 Matlab 软件为实验平台进行仿真实验,参量如下:地球表面重力加速度  $g_s = 9.80665 \text{ m/s}^2$ , 地球极半径  $r_e = 6356766 \text{ m}$ , 每层大气的起始点(m):  $H_- = [0, 11000, 20000, 32000, 47000, 51000, 71000, 84852]$ ; 每层大气的温度变化率  $L_- = [-0.0065, 0, 0.0010, 0.0028, 0, -0.0028, -0.0020, 0]$ , 气体常数  $R_s = 8314.32 \text{ Nm}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$ ; 空气相对分子质量  $m_0 = 28.9644 \text{ kg/kmol}$ ; 地球表面大气压  $P_0 = 101325 \text{ Pa}$ ; 标准海平面温度  $T_0 = 288.15 \text{ K}$ ; 理想气体的比热  $\gamma = 1.40 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ; 激光波长  $\lambda = 532 \text{ nm}$ 。

通过 Matlab 仿真,低空大气温度与大气高度关系的变化曲线如图 1 所示。

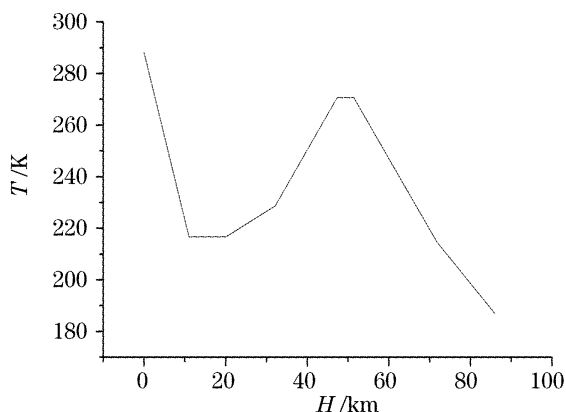


图 1 大气温度随高度变化曲线

Fig. 1 Atmospheric temperature versus height

根据(5)式仿真得出低空大气压强与大气高度关系的变化曲线,如图 2 所示。

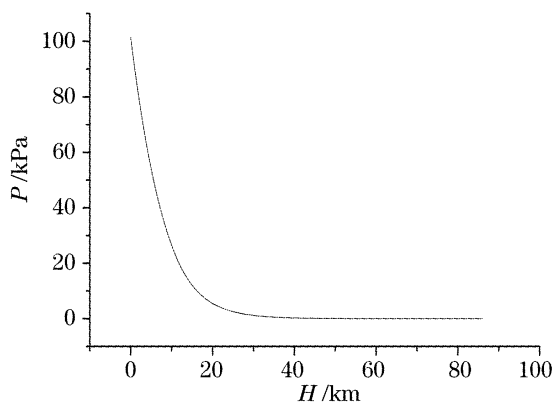


图 2 大气压强随高度变化曲线

Fig. 2 Atmospheric pressure versus height

将(4)式代入(6)式进行仿真计算,得出低空大气声速与大气高度关系的变化曲线,如图 3 所示。

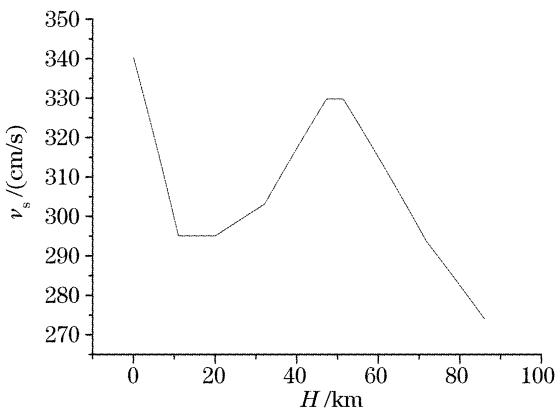


图 3 大气声速随高度变化曲线

Fig. 3 Velocity of sound versus height

将(3)式、(4)式代入(2)式进行仿真计算,得出低空大气折射率与大气高度关系的变化曲线,如图 4 所示。

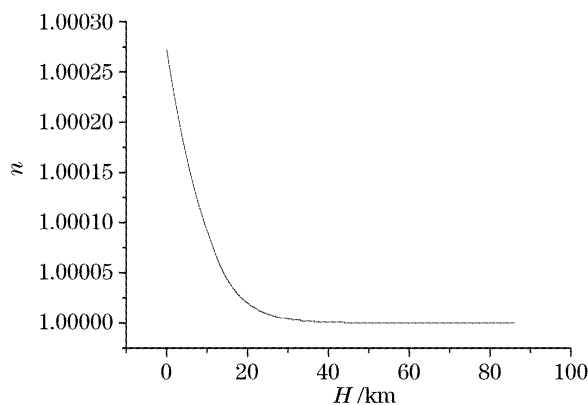


图 4 大气折射率随高度变化曲线

Fig. 4 Refractive index curve versus height

将低空大气声速、折射率及激光波长代入(2)式可得大气布里渊散射频移量,如图 5 所示。

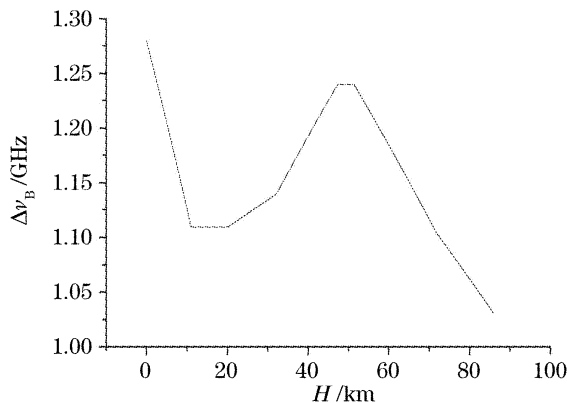


图 5 布里渊频移变化曲线

Fig. 5 Brillouin frequency shift versus height

王连亮等<sup>[6]</sup>曾根据有关数据计算出 0~60 km 之间 15 个不同高度的大气布里渊频移量,将本模型中的仿真数据与其计算数据(亦即参考数据)进行对比,如表 1 所示。

将表 1 中布里渊频移的实测数据与参考数据进行误差比较,如表 2 所示。将表 1 中布里渊频移的参考数据与仿真曲线对比,如图 6 所示。

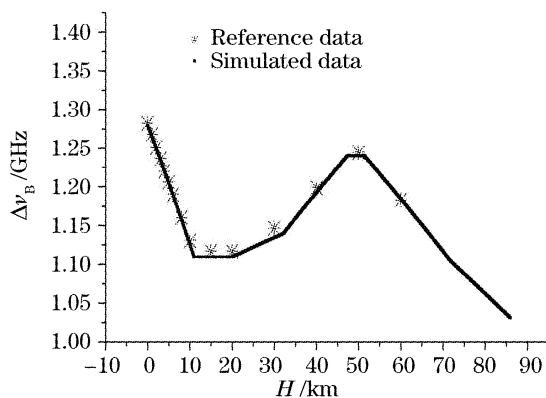


图 6 仿真曲线与参考数据对比

Fig. 6 Comparison between simulated data and reference data

表 1 仿真数据与参考数据比较  
Table 1 Comparison between simulated data and reference data

$H / \text{km}$	$P / \text{Pa}$		$T / \text{K}$		$\Delta\nu_B / \text{GHz}$	
	Reference data	Simulated data	Reference data	Simulated data	Reference data	Simulated data
0	101325	101325	288	288	1.2819	1.2796
1	89178	89865	282	282	1.2673	1.2651
2	76781	79492	275	275	1.2507	1.2504
3	70782	70112	269	269	1.2365	1.2355
4	61718	61652	262	262	1.2203	1.2205
5	53587	54041	256	257	1.2063	1.2052
6	46788	47211	249	249	1.1902	1.1898
8	35458	35646	236	236	1.1604	1.1584
10	26260	26496	223	223	1.1306	1.1262
15	12024	12110	217	217	1.1168	1.1093
20	5625.3	5528.4	217	217	1.1168	1.1093
30	1202.4	1196.9	230	227	1.1464	1.1342
40	294.59	287.11	253	250	1.1988	1.1925
50	81.313	79.769	273	271	1.2444	1.2399
60	22.928	21.956	246	247	1.1828	1.1845

表 2 参考数据与仿真数据之间的误差对比

Table 2 Error between simulated data and reference data

$H / \text{km}$	$\Delta\nu_B / \text{GHz}$		Error	
	Reference data	Simulated data	Absolute error /GHz	Relative error /%
0	1.2819	1.2796	+0.0023	0.18
1	1.2673	1.2651	+0.0022	0.17
2	1.2507	1.2504	+0.0004	0.024
3	1.2365	1.2355	+0.0010	0.081
4	1.2203	1.2205	-0.0002	0.016
5	1.2063	1.2052	+0.0011	0.091
6	1.1902	1.1898	+0.0004	0.034
8	1.1604	1.1584	+0.0020	0.17
10	1.1306	1.1262	+0.0044	0.39
15	1.1168	1.1093	+0.0075	0.67
20	1.1168	1.1093	+0.0075	0.67
30	1.1464	1.1342	+0.0122	1.06
40	1.1988	1.1925	+0.0063	0.53
50	1.2444	1.2399	+0.0045	0.36
60	1.1828	1.1845	-0.0017	0.14

由表 2 可知,文献[6]由有关数据计算出来的布里渊频移与仿真模型中的布里渊频移在 15 个不同高度下的绝对误差最大仅有 0.0122 GHz,相对误差最大为 1.06%,由图 6 可以看出,文献[6]的布里渊频移量基本在该仿真曲线附近。可见所建模型具有很高的真实度。同时,该模型中布里渊频移量只和大气高度这一单参量有关,对低空大气任意高度上布里渊频移都能够进行精确计算,具有更好的连续性和完备性。

## 4 结 论

本文建立了低空大气中大气相关参量与布里渊散射频移量的数学模型,并对其进行了仿真。与其他模型相比,该模型中布里渊频移量大小只与大气高度的单参量的数学有关,对任意高度下的布里渊频移量都能进行仿真。根据该模型的仿真数据与有关文献数据的对比分析表明该模型与实际情况非常符合。误差分析还指出在 15 个不同高度下的布里渊频移的绝对误差最大仅有 0.0122 GHz,相对误差最大为 1.06%,证明了该模型的可靠性。该模型对低空大气任意高度下的大气参量和布里渊频移量的都能够进行仿真模拟,具有很好的连续性和普适性,为大气布里渊频移探测提供了理论依据。

## 参 考 文 献

- 1 Liu Zhishen, Wu Dong, Zhang Kailin *et al.*. A mobile incoherent Mie-Rayleigh Doppler wind lidar with a single frequency and tunable operation of an injection Nd:YAG laser[J]. *Science in China*, 2003, **46**(3): 309~317
- 2 Ma Yong, Lin Hong, Ji Hang *et al.*. Lidar system design based on brim detecting technology[J]. *Chin. J. Lasers*, 2007, **34**(2): 170~175 (in Chinese)  
马 泳, 林 宏, 冀 航 等. 基于边缘探测技术的激光雷达系统设计[J]. *中国激光*, 2007, **34**(2): 170~175
- 3 Xu Jianfeng, Li rongsheng, Zhou Jing *et al.*. Measurements of bulk viscosity of water using Brillouin scattering[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(9): 1112~1115 (in Chinese)  
徐建峰, 李荣声, 周 静 等. 用布里渊散射测量水的体粘滞系数[J]. *光学学报*, 2001, **21**(9): 1112~1115
- 4 C. Laurence Korb, Bruce M. Gentry, Chi Y. Weng. Edge

- technique; theory and application to the lidar measurement of atmospheric wind[J]. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(22): 4202~4213
- 5 Ren Xiaobin, Gong Wenping, Dai Rui *et al.*. Accurate measurements of Brillouin shift in water by the filters with resonating absorption of iodine molecules [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(10): 1429~1433 (in Chinese)  
任晓斌,弓文平,戴 瑞 等. 用碘分子共振吸收滤波器精确测量水中的布里渊散射频移[J]. *光学学报*, 2004, **24**(10): 1429~1433
- 6 Wang Lianliang, Ren Gang, Zhang Yan *et al.*. Study of Brillouin scattering in atmosphere[J]. *Laser Technology*, 2003, **27**(4): 365~367 (in Chinese)  
王连亮,任 钢,张 艳 等. 大气的布里渊散射特性研究[J]. *激光技术*, 2003, **27**(4): 365~367
- 7 Cheng Guangxi. *Raman Brillouin Scattering* [M]. Beijing: Science Press, 2001. 576~580 (in Chinese)  
程光照. 拉曼布里渊散射[M]. 北京: 科学出版社, 2001. 576~580
- 8 Zhang Xuejun, Jiang Wenhan. Numerical calculation and results analysis for atmospheric refraction and atmospheric dispersion [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2002, **29**(2): 1~5 (in Chinese)  
张学军,姜文汉. 大气折射和大气色散的数值计算及结果分析[J]. *光电工程*, 2002, **29**(2): 1~5
- 9 U. S. Standard atmosphere 1976[EB/OL]. [http://modelweb.gsfc.nasa.gov/atmos/atmos\\_index.html](http://modelweb.gsfc.nasa.gov/atmos/atmos_index.html). 2006-05-13
- 10 Yao Zhanyu. Acoustic scattering attenuation in the turbulent atmosphere[J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology*, 1994, **5**(1): 82~89 (in Chinese)  
姚展予. 声波在湍流大气中的散射衰减[J]. *应用气象学报*, 1994, **5**(1): 82~89