

文章编号: 1001-3806(2003)04-0365-03

## 大气的布里渊散射特性研究\*

王连亮<sup>1</sup> 任 钢<sup>1</sup> 张 艳<sup>1</sup> 张 彬<sup>1</sup> 李 丹<sup>2</sup> 蔡邦维<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>四川大学电子信息学院,成都,610064) (<sup>2</sup>中国航天集团总公司 7306 研究所,成都,610100)

**摘要:** 建立了大气布里渊散射光频移的数学模型,分析计算了温度、水汽压、大气压力等大气参量对布里渊散射特性的影响。结果表明,布里渊散射光频移受大气压、水汽压的影响很小,而受大气温度的影响很大。这些结果对大气中隐形目标的探测技术具有重要的参考意义。

**关键词:** 大气布里渊散射;布里渊频移;隐形目标探测;数学模型

**中图分类号:** O437.2 **文献标识码:** A

### Study of Brillouin scattering in atmosphere

Wang Lianliang<sup>1</sup>, Ren Gang<sup>1</sup>, Zhang Yan<sup>1</sup>, Zhang Bin<sup>1</sup>, Li Dan<sup>2</sup>, Cai Bangwei<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Department of Electronics and Information Science, Sichuan University, Chengdu, 610064)

(<sup>2</sup> 7306 Graduate School of Spaceflight Group Parent Company of China, Chengdu, 610100)

**Abstract:** A mathematic model of frequency shift of atmospheric Brillouin scattering light is established and the influences of the mathematic parameters, such as air temperature, air pressure, vapor pressure, on the property of Brillouin scattering have been analyzed. The result shows that the frequency shift of Brillouin scattering light is scarcely influenced by air pressure and vapor pressure, and greatly affected by air temperature. The result has some referenced value for the detection of concealed object in atmosphere.

**Key words:** atmospheric Brillouin scattering; Brillouin frequency shift; concealed object detection; mathematic model

## 引 言

布里渊散射自从被提出后,由于它测量的不是激光回波的幅度,而是散射光的频移,是一种调频的测量方法,具有高信噪比、高灵敏度的优点,因此已经得到了深入的研究和应用。近年来,关于晶体及液体的布里渊散射特性的研究已经取得了很大的进展,刘大禾等人进行了用布里渊散射实时遥测海水中的声速和盐份的研究<sup>[1~5]</sup>。但是,利用布里渊散射对大气中隐形目标的探测研究,还未见国内外报道过。笔者对大气布里渊散射特性进行了研究分析和数值模拟,建立了一种有效的大气布里渊散射模型,其散射频移与空间隐形目标散射频移(一般为几十吉赫)差异较大,从而为大气中隐形目标的探测提供了理论依据,并讨论了应用的可行性。

## 1 大气的布里渊散射频移模型

大气的成分复杂,气体状态也不固定,这给对大气的分析带来一定的困难。为了简化模型,假设空气为理想气体,并忽略了大气湍流、气溶胶及大气中尘埃的影响。当激光束在大气中传输时,激光在大气中激发出光学声场,而该光学声场又对激光束发生衍射作用,这就是大气的布里渊散射。布里渊散射光的频移为:

$$= 2 n_0 (v / c_0) \sin(\theta / 2) \quad (1)$$

式中, $n$  为介质折射率, $v$  为介质中的声速, $\theta$  为入射光频率, $c_0$  为真空中光速, $\theta$  为入射光与散射光波矢间的夹角。当  $\theta = 180^\circ$  时,即为背向散射光时,利用关系式  $v = c_0 / \theta$ , (1) 式变为:

$$= 2 n v / \theta \quad (2)$$

式中, $\theta$  为入射光波长,单位都为国际单位制。由此可见,大气的布里渊背向散射光频移与大气中的声速及大气的折射率有关,而大气中的声速和大气的折射率又是大气压、水汽压和大气温度的函数。

声波在大气中的传播速度为:

$$v = \sqrt{p / \rho} \quad (3)$$

\* 中国航天科技集团公司 7306 所资助项目。

作者简介:王连亮,男,1979 年 8 月出生。硕士研究生。现从事信息光学研究工作。

收稿日期:2002-08-26;收到修改稿日期:2002-10-09

式中,  $\gamma$  为空气的比定压热容和比定容热容之比, 一般  $\gamma = 1.405$ ,  $p$  为大气静压力,  $\rho$  为大气密度。根据空气的状态方程, 可得空气 ( $e \ll p$  时) 中的声速:

$$v = v_0(1 + t/2)(1 + 0.14e/p) \quad (4)$$

式中,  $v_0$  为标准状态下大气中的声速,  $v_0 = 331\text{m/s}$ ,  $\rho = 1/273$ ,  $t$  为大气温度,  $e$  为水汽压。

对于大气的折射率, 可以利用经验公式。在大气压力  $p_0 = 760\text{mmHg}$  和温度  $t = 15$  时, 对于波长为  $\lambda_0$  的入射光, 干空气的折射率  $n_0$  为:

$$(n_0 - 1) \times 10^6 = 64.328 + \frac{29498.1}{146 - (1/\lambda_0)^2} + \frac{255.4}{41 - (1/\lambda_0)^2} \quad (5)$$

式中,  $\lambda_0$  单位为  $\mu\text{m}$ 。当空气中的水汽压为  $e(\text{mmHg})$  时, 折射因子  $(n_0 - 1) \times 10^6$  按下式减小:

$$(0.0624 - 0.000680/\lambda_0^2)e / (1 + 0.003661t) \quad (6)$$

即水汽压为  $e$  时, (6) 式变为:

$$(n_0 - 1) \times 10^6 = 64.328 + \frac{29498.1}{146 - (1/\lambda_0)^2} + \frac{255.4}{41 - (1/\lambda_0)^2} - \frac{0.0624 - 0.000680/\lambda_0^2}{1 + 0.003661t} e \quad (7)$$

在其它温度  $t$  和压力  $p$  下的大气折射率  $n$  为:

$$(n - 1) = (n_0 - 1) \times \frac{p[1 + (1.049 - 0.0157t) \times 10^{-6} p]}{720.883(1 + 0.003661t)} \quad (8)$$

将(4)式~(8)式代入(2)式得大气的布里渊背向散射光频移表达式:

$$(p, e, t) = \frac{2 \times 10^6}{\lambda_0} v_0 \left[ 1 + \frac{t}{2} \right] \left[ 1 + 0.14 \frac{e}{p} \right] \times \left\{ 1 + (n_0 - 1) \frac{p[1 + (1.049 - 0.0157t) \times 10^{-6} p]}{720.883(1 + 0.003661t)} \right\} \quad (9)$$

式中,  $\lambda_0$  单位为  $\mu\text{m}$ ,  $p, e$  单位为  $\text{mmHg}$ ,  $n_0$  由(7)式决定。

## 2 数值模拟

以下对大气布里渊散射频移的数值模拟都是采用波长为  $0.532\mu\text{m}$  的激光作为入射光, 可由 Nd:YAG 激光倍频获得。

### 2.1 大气中各参量对频移的影响

根据所建数学模型(9)式知, 大气的布里渊频移是大气压  $p$ 、水汽压  $e$  和大气温度  $t$  的函数。当  $e$  一定时, 在不同温度下随  $p$  的变化曲线如图 1 所示, 基本上呈一水平线, 说明  $\Delta\nu$  受  $p$  变化的影响非常小, 可以忽略; 当  $p$  一定时, 在不同温度下

随  $e$  的变化曲线如图 2 所示, 可以看出,  $\Delta\nu$  受  $e$  变化的影响很小, 经计算知, 当  $p = 760\text{mmHg}$ ,  $t = 10$  时,  $e$  每升高  $1\text{mmHg}$ ,  $\Delta\nu$  只增大  $0.2334\text{MHz}$ ; 当  $p, e$  一定时,  $\Delta\nu$  随  $t$  的变化曲线如图 3 所示, 可见随  $t$  的变化比较明显, 经计算知,  $t$  每增加  $10$ ,  $\Delta\nu$  就增大  $22.78\text{MHz}$ , 与  $p, e$  相比,  $t$  对频移的影响是显著的。

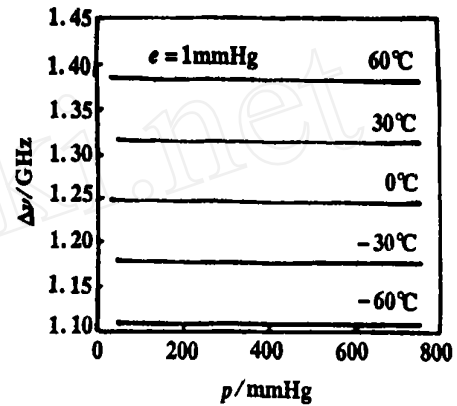


Fig. 1 The frequency shift curve that varies with the atmospheric pressure

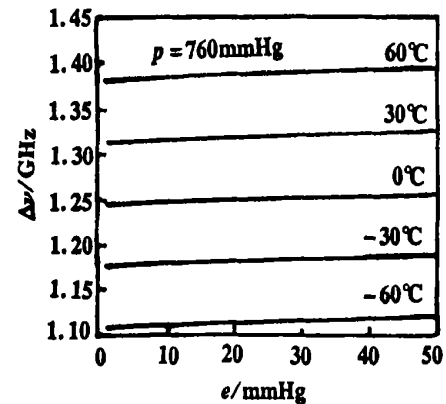


Fig. 2 The frequency shift curve that varies with the vapor pressure

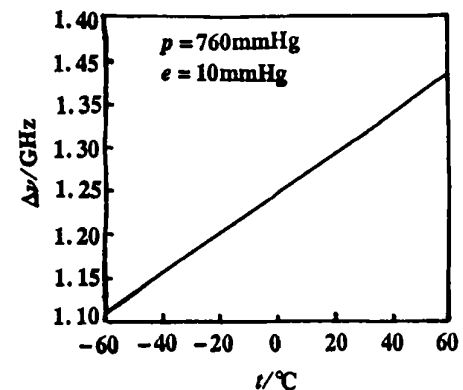


Fig. 3 The frequency shift curve that varies with the temperature

### 2.2 大气的布里渊频移随高度的分布

一般而言, 地球大气层的物理条件相对固定, 随高度有一个垂直分布。根据海拔高度  $h = 0$  时纯水或冰上的饱和空气的水汽压  $e$  及温度  $t$  的对应关系

见表 1。

Table 1 The change of atmospheric saturated vapor pressure over pure water or ice with the change of the temperature

<i>t</i> /	- 30	- 20	- 10	0	10	20	30	40
<i>e</i> / mmHg	0.29	0.77	1.95	4.58	9.21	17.5	31.8	55.3

通过拟合得到饱和水汽压 *e* 随温度 *t* 的变化关系式:

$$e = 4.58 + 0.3355 t + 0.0101 t^2 + 0.0002 t^3 + 0.000003 t^4 \quad (10)$$

当 *t* = 15 时, *e* = 12.7mmHg。根据水汽压 *e* 随高度 *h* 的变化关系式:

$$e = e_0 \cdot 10^{-h'} \quad (11)$$

可得任意高度的水汽压值(见表 2)。式中, *e*<sub>0</sub> 为 *h* = 0 时的水汽压, *e* 为对应于高度 *h* 的水汽压, = 5km 为经验系数。

Table 2 The distribution of atmospheric Brillouin scattering property varies with the height

<i>h</i> / km	log <i>p</i> / (10 <sup>-5</sup> N cm <sup>-2</sup> )	<i>p</i> / mmHg	<i>e</i> / mmHg	<i>T</i> / K	<i>t</i> /	<i>t</i> / GHz
0	6.01	768	12.7	288	15	1.2819
1	5.95	669	8.01	282	9	1.2673
2	5.90	596	5.06	275	2	1.2507
3	5.85	531	3.19	269	- 4	1.2365
4	5.79	463	2.01	262	- 11	1.2203
5	5.73	402	1.27	256	- 17	1.2063
6	5.67	351	0.801	249	- 24	1.1902
8	5.55	266	0.319	236	- 37	1.1604
10	5.42	197	0.127	223	- 50	1.1306
15	5.08	90.2	0.0127	217	- 56	1.1168
20	4.75	42.2	1.27 × 10 <sup>-3</sup>	217	- 56	1.1168
30	4.08	9.02	1.27 × 10 <sup>-5</sup>	230	- 43	1.1464
40	3.47	2.21	1.27 × 10 <sup>-7</sup>	253	- 20	1.1988
50	2.91	0.610	1.27 × 10 <sup>-9</sup>	273	0	1.2444
60	2.36	0.172	1.27 × 10 <sup>-11</sup>	246	- 27	1.1828

从表 2 中可以看出,在高度为 50km 以下时,频

移在 1.11 GHz ~ 1.28 GHz 之间变化。-*h* 的变化曲线如图 4 所示。频移基本上和随温度的变化趋势相同,从而验证了大气布里渊频移受大气压、水汽压的影响很小,而受大气温度的影响较大的结论。

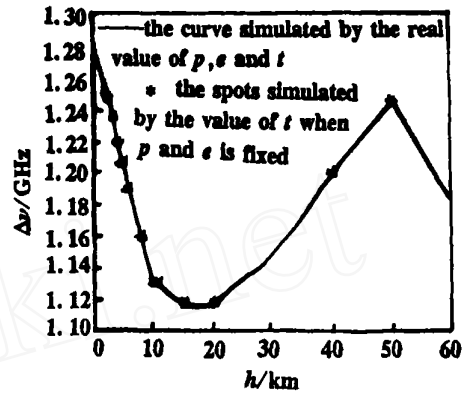


Fig. 4 The frequency shift curve that varies with the height

### 3 结 论

建立了大气布里渊散射光频移的数学模型,分析计算了温度、水汽压和大气压力等大气参量对布里渊散射特性的影响。根据研究模型的计算结果表明,大气压、水汽压对散射光频移几乎没有影响,温度对散射光频移的影响较大,大约每增加 10 ,频移就增大 22.78MHz。在 50km 以下,大气的散射频移约在 1.1 GHz ~ 1.3 GHz 之间,而空间隐形目标的散射频移约为几十吉赫,二者相差 1 ~ 2 个量级。这一结论为利用布里渊散射频移探测大气中的隐形目标提供了理论依据。技术的难点是对探测系统的要求高,笔者认为,采用高分辨率光谱探测技术和高灵敏度光子计数器是能够测量目标散射频移信号的。这将是进一步研究的目标和内容。

#### 参 考 文 献

[1] 刘大禾. 声学学报, 1998, 23(2): 184 ~ 188.  
 [2] Cummins H Z, Gammon R W. J Chem Phys, 1966, 44(7): 2785 ~ 2796.  
 [3] Patterson D. J Phys Chem, 1985, 89: 1344 ~ 1354.  
 [4] Sandercock J R, Wettling W. J A P, 1979, 50(11): 7784 ~ 7789.  
 [5] Bennett B I, Maradudin A A, Swanson L R. Ann Phys, 1972, 71: 357 ~ 394.