

文章编号: 0253-2239(2005)05-577-4

洛伦兹光谱线型的高层大气风场被动探测原理分析*

贺 健¹ 张淳民¹ 唐远河¹ 赵葆常²

(¹ 西安交通大学理学院, 西安 710049
² 中国科学院西安光学精密机械研究所空间光学实验室, 西安 710068)

摘要: 通过探测高层大气中气辉(极光)辐射线的多普勒频移,可以反演出高层大气中的速度、温度和压强等物理量。以高层大气中的极光(原子氧跃迁所辐射的两条主要谱线)为被探测源,对于洛伦兹光谱线型高层大气风场的探测原理和方法进行了研究;给出了基于洛伦兹光谱线型高层大气的速度场、温度场和压力场的分布规律和理论计算公式;采用计算机模拟,描绘了洛伦兹光谱线型风场的误差曲线,表明了洛伦兹光谱线型在高层大气风场探测中占有相当重要的地位。

关键词: 大气光学; 高层大气风场探测; 洛伦兹光谱线型; 干涉成像光谱技术
中图分类号: P427.1 文献标识码: A

The Principle Analysis of Passive Detection of Upper Atmospheric Wind Field of the Lorentzian Profile

He Jian¹ Zhang Chunmin¹ Tang Yuanhe¹ Zhao Baochang²

(¹ The Science School, Xian Jiaotong University, Xi'an 710049
² The Space Optics Laboratory, Xian Institute of Optics and Precision Mechanics,
The Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710068)

Abstract: Through detecting the Doppler shifts of airglow (aurora) in upper atmosphere, the physical quantity such as velocity, temperature and pressure of upper atmosphere is derived. Taking the aurora (two major lines of the emission of the atomic oxygen) in upper atmosphere as the detection source, the detection principle and method of the line based on the Lorentzian profile are researched; the distribution of the velocity, temperature and pressure and their calculation formula are given out based on the Lorentzian profile, using computer imitation, the error curve is described, so it is shown that the Lorentzian profile is very important in the upper atmospheric wind detection.

Key words: atmospheric optics; upper atmospheric wind field detection; Lorentzian profile; interference imaging spectroscopy

1 引 言

高层大气对大气物理、地球物理、航天器的发射和运行、中长期天气预报和人类生存环境的研究具有重要意义,对高层大气的研究越来越受到人们的关注^[1~3]。高层大气被动探测通过探测气辉(或极光)的多普勒频移和带宽,来反演高层大气的视线速度和温度,然后利用两个相互垂直的视场探测的视线速度矢量合成风场的二维速度。其光源主要为亚稳态原子氧 O(¹S) 和 O(¹D) 跃迁所形成的两条谱线,波长分别为 557.7 nm 的绿线和 630.0 nm 的红

线^[4]。由于原子氧的运动,根据多普勒效应其频率发生漂移,形成的谱线为高斯光谱线型;由于原子氧与周围大气粒子的碰撞和热运动,形成的谱线为洛伦兹光谱线型。到目前为止,国内外学者在高层大气风场探测中认为极光谱线为高斯光谱线型^[5]。

但是,亚稳态粒子辐射到基态前要和周围粒子发生多次碰撞,而碰撞加宽和自然加宽导致的光谱线型均为洛伦兹光谱线型,高斯光谱线型也称为多普勒光谱线型,只是考虑到多普勒效应所导致的一种光谱线型,所以洛伦兹光谱线型比高斯光谱线型更接近实际

* 国家自然科学基金(40375010,60278019)资助课题。

作者简介: 贺 健(1978~),男,陕西蓝田人,西安交通大学硕士研究生,主要从事高层大气风场光学被动探测和成像光谱技术方面的研究。E-mail: hejian405@163.com

收稿日期: 2004-07-21; 收到修改稿日期: 2005-01-07

情况,研究洛伦兹光谱线型对提高高层大气风场探测的精确度有重要意义;而且理论和实践都表明,最接近实际的是高斯光谱线型和洛伦兹光谱线型的叠加-佛克脱光谱线型^[6]。所以,研究洛伦兹光谱线型不仅扩大了研究范围,而且也接近实际的佛克脱光谱线型风场探测提供理论依据。

2 洛伦兹光谱线型的大气风场测量

亚稳态原子氧在跃迁前将与周围大气粒子发生多次碰撞,如果我们把每次弹性碰撞视为一场原子对抗,虽干扰了发射跃迁,但跃迁仍继续进行,只是比无干扰情况的相干寿命缩短,因而辐射具有较大的频带宽度,这种机理所形成的谱线形状即为洛伦

兹光谱线型^[7]。通过观测谱线展宽,就能获知高层大气的风场的速度、温度和压强等物理量。

2.1 洛伦兹线型光谱干涉强度

洛伦兹线型光谱为^[8]:

$$B(\sigma) = \frac{s}{\pi} \frac{\gamma_L}{(\sigma - \sigma_0)^2 + \gamma_L^2}, \quad (1)$$

其中 σ 为波数, γ_L 为压力展宽半宽度, s 为与跃迁有关的量, γ_L 与压强 p 和温度 T 的关系为

$$\gamma_L(p, T) = \gamma_L(p_0, T_0) \frac{p}{p_0} \sqrt{\frac{T_0}{T}}, \quad (2)$$

其中 $p_0 = 10^5$ Pa, $T_0 = 300$ K。由光谱学知识,干涉强度的分布则为(1)式的傅里叶变换:

$$I(\Delta) - \frac{1}{2}I(0) = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{s}{\pi} \frac{\gamma_L}{(\sigma - \sigma_0)^2 + \gamma_L^2} \exp(i2\pi\sigma\Delta) d\sigma, \quad (3)$$

其中 Δ 为光程差, $I(0)$ 对应零光程差的强度。利用傅里叶变换的位移公式, (3) 式为:

$$I(\Delta) - \frac{1}{2}I(0) = \exp(i2\pi\sigma_0\Delta) \frac{s\gamma_L}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{\sigma^2 + \gamma_L^2} \exp(i2\pi\sigma\Delta) d\sigma = s \exp(i2\pi\sigma_0\Delta) \exp(-2\pi\gamma_L\Delta),$$

考虑实际情况,要加上其镜像对称^[9], 则:

$$I(\Delta) - \frac{1}{2}I(0) = s \exp(-2\pi\gamma_L\Delta) [\exp(i2\pi\sigma_0\Delta) + \exp(-i2\pi\sigma_0\Delta)] = 2s \exp(-2\pi\gamma_L\Delta) \cos(2\pi\sigma_0\Delta), \quad (4)$$

如果取 $\Delta = 0$, 通过(4)式有 $2s = I(0)/2$, 其中 $I(0)$ 为当 $\Delta = 0$ 时的强度, 令 $I_0 = I(0)/2$, (4) 式变为 $I(\Delta) = I_0 [1 + \exp(-2\pi\gamma_L\Delta) \cos(2\pi\sigma_0\Delta)]$, (5)

可见,洛伦兹光谱线型的干涉强度为一个指数衰减的余弦函数,洛伦兹光谱线型及其干涉图如图1和图2所示。

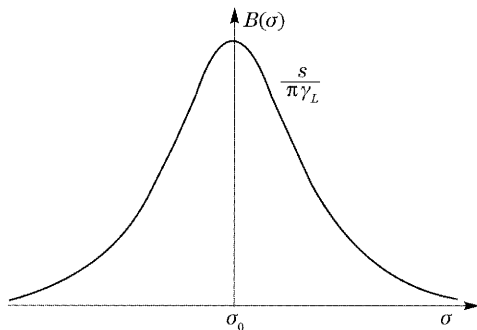


图1 洛伦兹光谱线型

Fig. 1 The Lorentzian profile

由多普勒效应可知,当光源和探测器之间的相对速度为 v 时,探测器接收到频率为

$$f = \frac{\sqrt{1 - (v/c)^2}}{(1 - v/c)} f_0 \approx (1 + v/c) f_0, \quad (6)$$

式中 f_0 为光源的真实频率。(6) 式用波数 σ 表示为

$$\sigma = (1 + v/c) \sigma_0, \quad (7)$$

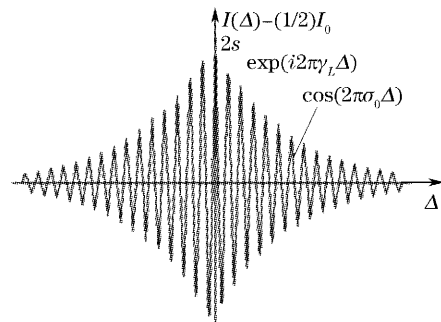


图2 洛伦兹光谱线型的干涉图

Fig. 2 The interferogram of the Lorentzian profile

设成像光谱仪引起的光程差为 $\Delta = \Delta_0 + x$, 其中 x 为基准光程差 Δ_0 上的附加光程差。将(5)式中的 σ_0 与波长对应, $\sigma_0 = 1/\lambda_0$, 则(5)式可写为

$$I(\Delta) = I_0 \left\{ 1 + \exp(-2\pi\gamma_L\Delta) \cos \left[\frac{2\pi}{\lambda_0} (\Delta_0 + x) \right] \right\}, \quad (8)$$

由(8)式可知干涉条纹的可见度(调制度)

$$V = (I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min}) = \exp(-2\pi\gamma_L\Delta), \quad (9)$$

则
$$I(\Delta) = I_0 \left\{ 1 + V \cos \left[\frac{2\pi}{\lambda_0} (\Delta_0 + x) \right] \right\}, \quad (10)$$

I_0 是未知量, $(2\pi/\lambda_0)\Delta_0$ 是光谱仪的内秉相位差, 可以设置 $(2\pi/\lambda_0)\Delta_0 = 2m\pi (m = 0, 1, 2, \dots)$, 可见度可以通过干涉条纹确定, x 可以通过移相干涉仪的扫描方法获得。

2.2 风场速度、温度和压强的计算

风场的测量是由于气辉的多普勒移动引起的相位 ϕ 的微小变化所决定的。我们有:

$$\phi = \frac{2\pi\Delta}{\lambda_0} \frac{v}{c}, \quad (11)$$

其中 v 为风的速率, c 为光速。如果在(10)式中, 光程差 x 按 $\lambda_0/4$ 移相的方式取值, 即 $x = \lambda_0/4, \lambda_0/2, 3\lambda_0/4, \lambda_0$, 则可以测出 4 个强度值 I_1, I_2, I_3, I_4 , 于是就得到^[10]:

$$I_0 = (I_1 + I_3)/2 = (I_2 + I_4)/2, \quad (12)$$

$$V = \sqrt{(I_1 - I_3)^2 + (I_4 - I_2)^2} / (2I_0), \quad (13)$$

$$\delta\phi = \arctan[(I_4 - I_2)/(I_1 - I_3)], \quad (14)$$

另外, 洛伦兹线型主要发生于较低高度, 压强 p 与温度 T 可近似认为处于理想气体状态。在激光雷达技术中, 经常利用以下关系式

$$pV' = \nu RT, \quad (15)$$

其中 R 为普适常数, 在标准大气状况下 $R = 8.31432 \times 10^3 \text{ N} \cdot \text{m}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$, V' 为气体体积。

可见利用(14)式和(11)式计算出速度 v ; 利用(13)式、(9)式和(2)式就可计算出温度 T 与压强 p 的关系, 再与(15)式联立, 就可求出压强 p 与温度 T 。

2.3 计算机模拟和误差分析

由于实际测量中存在着一一定的误差, 现在用计算

机模拟, 描绘出此原理测量误差曲线。设观察源为 $\text{O}(\text{I})\text{S}$ 绿线, 其波长为 557.7 nm , 则其波数为 $\sigma_0 = 1/(557.7 \times 10^7) \text{ cm}^{-1} = 17930 \text{ cm}^{-1}$ 。取 $\gamma_L(p_0, T_0)$ 为 0.02 cm^{-1} 。基准光程差为 $\Delta_0 = 4.2 \text{ cm}$ 。设大气的运动速度 $v = 100 \text{ m/s}$, 大气温度 $T = 150 \text{ K}$, 此时压强 $p = 55676 \text{ Pa}$, $\phi_0 = 0$ 。用上面的方法, 可以得到四个强度值 $I_1 = 1.2617$, $I_2 = 0.7094$, $I_3 = 0.7383$, $I_4 = 1.2906$ 。

实际测量中, 由于各种因素, 必然对测量结果有一定的误差存在。设测量到的四个强度值分别为 I'_1, I'_2, I'_3 和 I'_4 , 那么由此四个强度值计算得到的大气的运动速度 v' 、大气温度 T' 和压强 p' 分别为:

$$v' = \phi' c / (2\pi\sigma_0\Delta_0), \quad (16)$$

$$T' = \left[\frac{11.2p_0 \ln V'}{\pi\gamma_L(p_0, T_0)\Delta_0 R \sqrt{T_0}} \right]^2, \quad (17)$$

$$p' = 22.4 \left[\frac{p_0 \ln V'}{2\pi\gamma_L(p_0, T_0)\Delta_0 \sqrt{R} \sqrt{T_0}} \right]^2, \quad (18)$$

假设测量到的四个强度值分别 I'_1, I'_2, I'_3 和 I'_4 与实际值的误差在 5% 范围以内, 在此误差区间范围内我们取 50 个分段误差区间, 即 $0 \sim \pm 0.1\%$, $0 \sim \pm 0.2\%$, $0 \sim \pm 0.3\%$, \dots , $0 \sim \pm 5\%$, 在每个分段误差区间内分别取 200 个误差值, 代入(17)式和(20)式, 在每个分段误差区间内可得 200 个 T_i, v_i, p_i 由于随机误差具有统计规律, 其中最常见的是高斯分布, 因此我们可以定义相对标准偏差来表示测量结果误差的大小。在每个分段误差区间内, 定义相对百分标准偏差:

$$X_{T_j} = \left\{ \sqrt{\sum_{i=1}^{200} (\Delta T_i)^2 / [200 \times (200 - 1)] / \bar{T}} \right\} \times 100\%, \quad (19)$$

$$X_{v_j} = \left\{ \sqrt{\sum_{i=1}^{200} (\Delta v_i)^2 / [200 \times (200 - 1)] / \bar{v}} \right\} \times 100\%, \quad (20)$$

$$X_{p_j} = \left\{ \sqrt{\sum_{i=1}^{200} (\Delta p_i)^2 / [200 \times (200 - 1)] / \bar{p}} \right\} \times 100\%, \quad (21)$$

$$X_{I_j} = \left\{ \sqrt{\sum_{i=1}^{200} (\Delta P_i)^2 / [200 \times (200 - 1)] / \bar{P}} \right\} \times 100\%, \quad (22)$$

式中 $j = 1, 2, \dots, 50$, $X_{T_j}, X_{v_j}, X_{p_j}$ 和 X_{I_j} 分别表示温度、速度、压强和随机误差的相对百分标准偏差, $\Delta T_i = T_i - \bar{T}$, $\Delta v_i = v_i - \bar{v}$, $\Delta p_i = p_i - \bar{p}$, $\Delta P_i = P_i - \bar{P}$, 而 $\bar{T}_i, \bar{v}_i, \bar{p}_i, \bar{P}_i$ 分别表示 T_i, v_i, p_i 和 P_i 在每个分段误差区间内的平均值。 P_i 为该误差区间内的随机误差值。由(19)式 ~ (22)式计算得出的

相对百分标准偏差如图 3 所示。从图中可以看出, 速度相对百分标准偏差 X_v 、温度相对百分标准偏差 X_T 和压强相对百分标准偏差 X_p 随着随机误差相对百分标准偏差 X_I 的增大而增大。考虑到误差后, 温度相对百分标准偏差 X_T 和压强相对百分标准偏差 X_p 大约为随机误差相对百分标准偏差 X_I 的 0.4

倍,而速度相对百分标准偏差 X_v 大约为随机误差相对百分标准偏差 X_I 的0.2倍,前者大约为后者的2倍。因为温度对应的碰撞对应洛伦兹光谱线型,而速

度对应的频率漂移对应高斯光谱线型,说明在特定条件下,洛伦兹光谱线型在高层大气风场探测中占有相当重要的地位。

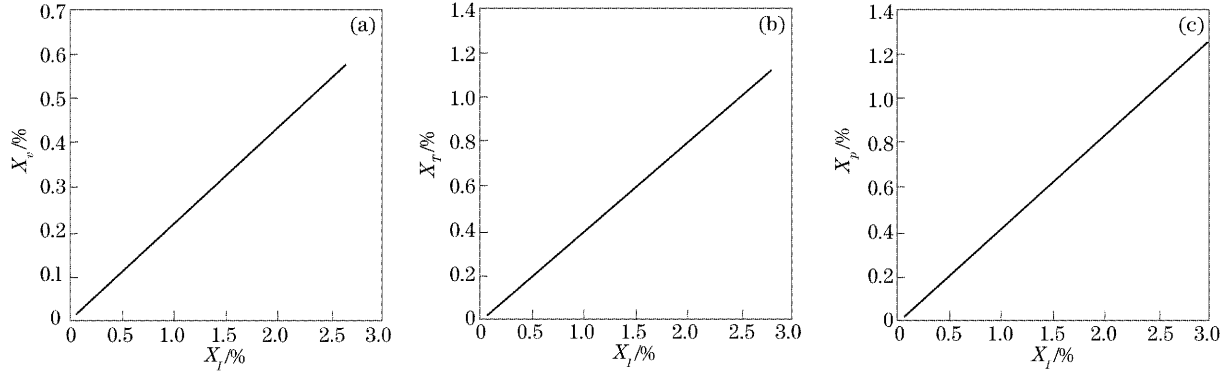


图3 (a)速度,(b)温度,(c)压力的相对测量误差

Fig. 3 The relative measurement errors of (a) the velocity, (b) the temperature, (c) the pressure

3 结 论

1) 由于粒子的热运动及频繁碰撞,高层大气被探测的光源辐射的谱线为洛伦兹光谱线型。目前国内外文献中尚未报道洛伦兹光谱线型的风场探测。本文对基于洛伦兹光谱线型的风场探测进行了研究,给出了基于洛伦兹光谱线型的风场的速度场、温度场和压力场的分布规律和理论计算公式,不仅对提高高层大气风场的探测精度有重要意义,也为接近实际风场的探测奠定了基础和提供了理论依据。

2) 采用计算机模拟描绘出的速度相对百分标准偏差 X_v 、温度相对百分标准偏差 X_T 和压强相对百分标准偏差 X_p 随着随机误差的相对百分标准偏差 X_I 的增大而增大。

3) 从图3可以看出, X_T 和 X_p 随 X_I 的变化大致相同,主要是因为(15)式中温度 T 与压强 p 之间的近似线性关系; X_T 和 X_p 随 X_I 的变化而要大于 X_v 随 X_I 的变化(前者大约为后者的2倍)。我们知道,温度对应的碰撞对应洛伦兹光谱线型,而速度对应的频率漂移对应高斯光谱线型,说明在特定条件下,洛伦兹光谱线型在高层大气风场探测中占有相当重要的地位,在高层大气风场探测中,应将其列入考虑之中。

4) 理论和实践证明,高层大气风场探测的实际光源谱线为佛克脱光谱线型(高斯光谱线型和洛伦兹光谱线型卷积的实部),但由于佛脱克光谱线型没有解析式,理论计算相当困难。对洛伦兹光谱线型的研究,将为更接近实际的佛克脱光谱线型风场探测的研究提供理论和实践依据。

参 考 文 献

- 1 Wei Heli, Wu Chengjiu, Ma Zhijun *et al.*. A new method for improving the measurement spectral resolution of atmospheric absorption spectra[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(2): 165~169 (in Chinese)
魏合理, 邹承就, 马志军等. 提高大气吸收光谱测量分辨率的新方法[J]. *光学学报*, 2002, **22**(2): 165~169
- 2 Zhou Bin, Liu Wenqing, Qi Feng *et al.*. Error analysis in differential absorption spectroscopy [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(8): 957~961 (in Chinese)
周斌, 刘文清, 齐锋等. 差分吸收光谱法测量大气污染的测量误差分析[J]. *光学学报*, 2002, **22**(8): 957~961
- 3 Sun Gang, Weng Ningquan, Xiao Liming *et al.*. Profile and character of atmospheric temperature [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(5): 592~596 (in Chinese)
孙刚, 翁宁泉, 肖黎明等. 大气温度分布特性及对折射率结构常数的影响[J]. *光学学报*, 2004, **24**(5): 592~596
- 4 Gordon G. Shepherd. Application of Doppler michelson imaging to upper atmospheric wind measurement: WINDII and beyond [J]. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(16): 2764~2773
- 5 Gerard Thuillier, William Gault, Jean-Francis Brun *et al.*. In-flight calibration of the wind imaging interferometer (WINDII) on board the upper atmosphere research satellite [J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(8): 1356~1369
- 6 Zhang Chunmin, Wang Wei, Xiang Libin *et al.*. Interference image spectroscopy for upper atmospheric wind field measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(2): 234~239 (in Chinese)
张淳民, 王伟, 相里斌等. 利用干涉成像光谱技术测量大气风场[J]. *光学学报*, 2000, **20**(2): 234~239
- 7 Zhou Bingkun, Gao Yizhi, Chen Jianye *et al.*. *Laser Principle* [M]. Beijing: National Defence Industrial Press, 1995. 99~105 (in chinese)
周炳琨, 高以智, 陈建业等. *激光原理*[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995. 99~105
- 8 Hinkley. *Atmosphere Laser Measurement Science* [M]. Song Zhengfang trans. Beijing: Science Press, 1984. 263~264
Hinkley. *大气激光监测*[M]. 宋正方译, 北京: 科学出版社, 1984. 263~264
- 9 Zhang Guangzhao. *Principles of Fourier Transform Spectroscopy* [M]. Guangzhou: Zhong Shan University Press, 1987. 75~76
张光昭. *傅里叶变换光谱学原理*[M]. 广州: 中山大学出版社, 1987. 75~76
- 10 W. A. Gault, S. Brown, A. Moise *et al.*. ERWIN: an E-region wind interferometer[J]. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(16): 2913~2922