

利用干涉成像光谱技术测量大气风场*

张淳民^{1), 2)} 王 炜²⁾ 相里斌²⁾ 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研究室, 西安 710068

摘 要 以上层大气中的气辉(极光)为被探测源, 利用干涉成像光谱技术和电磁波的多普勒效应对上层大气风场进行测量, 分析和计算了大气风场的速度和温度, 并就被探测源和探测器之间的相对速度与其连线成任意角时的情形进行了讨论。采用计算机模拟, 分析了大气风场的测量效果。

关键词 大气风场, 干涉成像光谱技术, 多普勒效应。

1 引 言

利用极光作为光源的大气风场被动探测方法, 主要是利用干涉成像光谱技术和电磁波的多普勒效应。通过多普勒迈克耳孙成像干涉仪观察原子氧辐射的气辉, 来确定上层大气风场的速度和温度, 获得大量的有关大气风场的可贵资料^[1]。干涉成像光谱技术在上层大气研究中得到了广泛的应用。

2 原 理

2.1 气辉(极光)的形成

被动式探测大气风场的光源是上层大气中的气辉(极光), 来源于中层大气的 OH, 热大气层(电离层)中的 O₂、O(¹S) 和中热大气层中的 O(¹S)、O(¹D)、O⁺(²P), 其高度分布在距地面 80~ 300 km 之间。两条主要谱线 O(¹S) 和 O(¹D) 主要来源于亚稳态原子氧的跃迁, 从 O(¹S) 态跃迁到 O(¹D) 态产生 557.7 nm 的光子谱线, 然后再从 O(¹D) 态跃迁到基态产生 630.0 nm 的谱线, 这一辐射即形成了理想的多普勒目标——极光, 如图 1 所示。能级寿命分别为 1 s 和 130 s 左右。因为氧的核自旋磁距为零, O(¹S) 和 O(¹D) 两条单线均为禁戒跃迁^[2]。

2.2 风场速度、温度的测量

一般情况下, 亚稳态原子氧在辐射前与周围的粒子多次碰撞, 处于热平衡状态, 因此, 它们有一个整体的运动速度和温度, 这就是要测量的风场的速度和温度。

我们可认为这些谱线为高斯轮廓^[3]。对高斯线型, 其光谱为:

* 国防科技预研基金资助项目(97J20.7.3.Zk1803)。

收稿日期: 1999-07-14; 收到修改稿日期: 1999-10-15

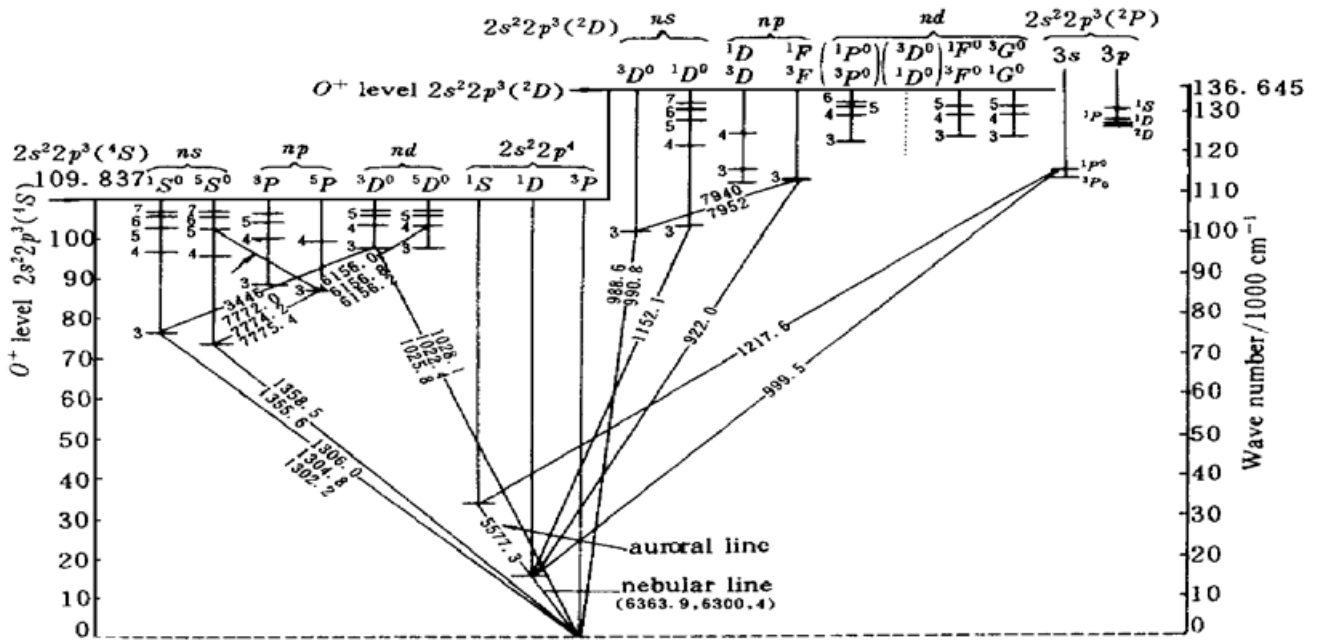


Fig. 1 Diagram of the auroral line

$$B(\sigma) = B_0 \exp \{ [-4(\sigma - \sigma_0)^2 \ln 2] / W^2 \}, \tag{1}$$

式中 $W = [(7.16 \times 10^{-7})^2 \sigma_0^2 T / M]^{1/2}$ 为半高宽; σ 为波数, σ_0 为谱线中心的波数(单位均为 cm^{-1}); T 为热力学温度(单位为 K); M 为原子质量; B_0 为 σ 等于中心波数时光源的辐射强度。干涉强度分布则为(1)式的傅里叶变换^[4],

$$I_{(\Delta)} = I_0 [1 + \exp(-QT\Delta^2) \cos(2\pi\sigma_0\Delta)], \tag{2}$$

Δ 为光程差(单位为 cm), $Q = 1.82 \times 10^{-12} (\sigma_0^2 / M) (\text{K}^{-1} \text{cm}^{-2})$ 。调制度为:

$$V = V_{(\Delta)} = \exp(-QT\Delta^2) = (I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min}), \tag{3}$$

则,

$$I_{(\Delta)} = I_0 [1 + V \cos(2\pi\sigma_0\Delta)]. \tag{4}$$

由电磁波的多普勒效应可知,当光源和观察者之间的相对速度 v 与二者连线成 θ ($\theta \neq \pi/2$) 角时,观察者接收到的光源频率为:

$$f = [(1 - \frac{v^2}{c^2})^{1/2} / (1 - \frac{v}{c} \cos \theta)] f_0 \approx (1 + \frac{v}{c} \cos \theta) f_0, \tag{5}$$

式中, f_0 为光源的真实频率,当光源和观察者相互靠近时, v 取正值;相互远离时, v 取负值。则波数为:

$$\sigma = (1 + \frac{v}{c} \cos \theta) \sigma_0, \tag{6}$$

σ_0 为对应于零风速(即 $v = 0$) 时的波数。设光程差 $\Delta = \Delta_0 + \Delta'$, 则(4)式变为:

$$\begin{aligned} I &= I_0 (1 + V \cos 2\pi\sigma\Delta) = \\ &I_0 \{ 1 + V \cos 2\pi[(\sigma_0 + \frac{v}{c}\sigma_0 \cos \theta)(\Delta_0 + \Delta')] \} = \\ &I_0 \{ 1 + V \cos (2\pi\sigma_0\Delta_0 + 2\pi\sigma_0\Delta' + 2\pi\sigma_0\Delta_0 \frac{v}{c} \cos \theta + 2\pi\sigma_0\Delta' \frac{v}{c} \cos \theta) \}. \end{aligned}$$

选择 Δ_0 使 $\sigma_0\Delta_0 = K$ ($K = 0, 1, 2, \dots$), 因为 $\Delta_0 \gg \Delta'$, 所以略去 $2\pi\sigma_0\Delta' \frac{v}{c} \cos \theta$ 项, 则

$$I = I_0 [1 + V \cos(\Phi_1 + \Phi)], \tag{7}$$

式中

$$\Phi_1 = 2\pi\sigma_0\Delta', \quad (8)$$

$$\Phi = 2\pi\sigma_0\Delta_0 \frac{v}{c} \cos \theta = 2K\pi \frac{v}{c} \cos \theta, \quad (9)$$

下面计算风场速度 v 和温度 T 。

设光程差 Δ' 从 0 开始, 按 $\lambda/4$ 取步递增, 共取 4 步, 从(7)式、(8)式可得出 4 个强度值:

$$\Delta' = 0, \quad \Phi_1 = 0, \quad I_1 = I_0(1 + V \cos \Phi), \quad (10)$$

$$\Delta' = \frac{\lambda}{4}, \quad \Phi_1 = \frac{\pi}{2}, \quad I_2 = I_0(1 - V \sin \Phi), \quad (11)$$

$$\Delta' = \frac{\lambda}{2}, \quad \Phi_1 = \pi, \quad I_3 = I_0(1 - V \cos \Phi), \quad (12)$$

$$\Delta' = \frac{3\lambda}{4}, \quad \Phi_1 = \frac{3\pi}{2}, \quad I_4 = I_0(1 + V \sin \Phi). \quad (13)$$

联立求解(10)~(13)式, 得:

$$I_0 = (I_1 + I_3)/2 = (I_2 + I_4)/2, \quad (14)$$

$$V = [(I_1 - I_3)^2 + (I_2 - I_4)^2]^{1/2}/2I_0, \quad (15)$$

$$\tan \Phi = (I_4 - I_2)/(I_1 - I_3). \quad (16)$$

从(15)式可看出, 知道了 V , 就可以由(3)式求出上层大气的温度; 由(16)式可看出, 知道了 Φ , 就可以由(9)式求出风场的速度。

3 讨 论

以上讨论的是当光源和探测器之间的相对速度与二者连线成任意角 θ ($\theta \neq \pi/2$) 时的情况, 文献[1~3]中讨论的 $\theta = 0$ (即光源与探测器之间的相对速度在二者连线上时) 的情形已包含在内。特别当光源与观察者之间的相对速度与二者连线垂直 (即 $\theta = \pi/2$) 时, 电磁波的多普勒效应为:

$$f = [1 - (\frac{v}{c})^2]^{1/2} f_0 = [1 - \frac{1}{2}(\frac{v}{c})^2] f_0,$$

则波数为

$$\sigma = [1 - \frac{1}{2}(\frac{v}{c})^2] \sigma_0, \quad (17)$$

代入(4)式得

$$\left. \begin{aligned} I &= I_0[1 + V \cos(\Phi_1 + \Phi)], \\ \Phi_1 &= 2\pi\sigma_0\Delta, \\ \Phi &= 2\pi\sigma_0\Delta_0 \frac{v^2}{2c^2} = \pi\sigma_0\Delta_0 \frac{v^2}{c^2} = K\pi \frac{v^2}{c^2}. \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

只要利用(15)、(18)式分别求出了 V 、 Φ , 即可求出上层大气的温度 T 与风速 v 。

4 模拟实验

风场的温度取决于光源辐射线的宽度(半高宽), 速度取决于辐射线中心波数 σ_0 的移动。设风场的速度 $v = 100$ m/s, 温度 $T = 200$ K, 原子氧 $O(^1S)$ 谱线波长为 $\lambda = 557.7$ nm,

取 $\Delta_0 = 22.308 \text{ cm}$, 则 $\sigma_0 = [1/(557.7 \times 10^{-5})] \text{ cm}^{-1} = 17930 \text{ cm}^{-1}$ 。对氧原子, $M = 16$ 。则

$$B_{(\sigma)} = B_0 \exp \{ [-4(\sigma - \sigma_0)^2 \ln 2]/W^2 \} =$$

$$B_0 \exp \{ [-4(\sigma - 17930)^2 \ln 2]/(7.16 \times 10^{-7} \times 17930)^2 (200/16) \} =$$

$$B_0 \exp [-1345.8(\sigma - 17930)^2]$$

$$I_{(\Delta)} = I_0 [1 + V \cos 2\pi\sigma_0\Delta] =$$

$$I_0 \{ 1 + \exp [-1.82 \times 10^{-12} \times 17930^2 / (16 \times 200 \times \Delta^2)] \cos \frac{2\pi\Delta}{5.577 \times 10^{-5}} \} =$$

$$I_0 [1 + \exp (-0.0073\Delta^2) \cos \frac{2\pi\Delta}{5.577 \times 10^{-5}}],$$

图 2 和图 3 分别为原子氧 557.7 nm 在 200 K 时辐射的光谱图和相应的干涉图。干涉图中每个周期代表了 23000 个实际周期。

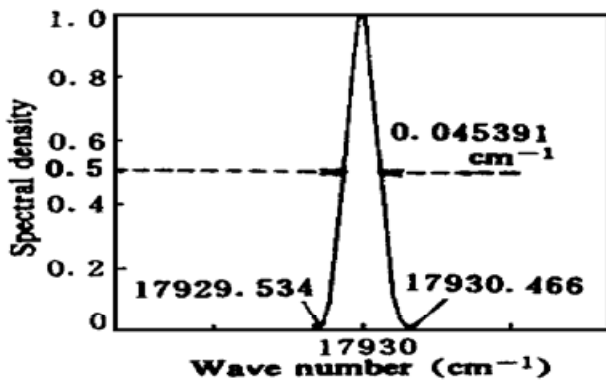


Fig. 2 Spectrum of $O(^1S)$ auroral line at 200 K

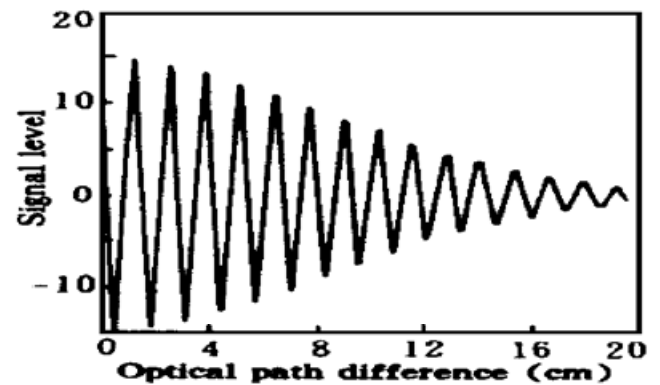


Fig. 3 Interferogram at 200 K

由给出的数值可得出:

$$V = \exp(-QT\Delta_0^2) = 0.026252,$$

当 $\theta = 0^\circ$ 时,

$$\Phi = 2\pi\sigma_0\Delta_0 \frac{v}{c} \cos \theta = 0.837758.$$

由(10)~(13)式可得

$$I_1 = 1.017566, \quad I_2 = 0.988491, \quad I_3 = 0.982434, \quad I_4 = 1.019509.$$

在实际测量中光程差按 $\lambda/4$ 递增取值, 由于各种随机原因, 必然会对测量值引起一定的误差。考虑引入误差后的测量值分别为 I'_1, I'_2, I'_3, I'_4 , 将其代入(14)~(16)式后, 得

$$I'_0 = (I'_1 + I'_3)/2 = (I'_2 + I'_4)/2, \quad (19)$$

$$V' = [(I'_1 - I'_3)^2 + (I'_2 - I'_4)^2]^{1/2} / 2I'_0, \quad (20)$$

$$\Phi' = \arctan [(I'_4 - I'_2)/(I'_1 - I'_3)], \quad (21)$$

由(3)、(20)式和(9)、(21)式, 得风场的温度和速度分别为

$$T' = -\ln \frac{V'}{Q\Delta_0^2}, \quad (22)$$

$$v' = \Phi'c / 2\pi\sigma_0\Delta_0, \quad (23)$$

考虑 I'_1, I'_2, I'_3, I'_4 与 I_1, I_2, I_3, I_4 之间的误差在 $0 \sim \pm 5\%$ 范围内时, 在此误差范围内取 20 个分段误差区间, 即 $0 \sim \pm 0.25\%$, $0 \sim \pm 0.5\%$, $0 \sim \pm 0.75\%$ …… $0 \sim \pm 5\%$, 在每个分段误差区间内分别取 200 个随机误差值, 代入(20)、(21), 由(22)、(23)即可得到 200 个 T_i 、

$v_i (i = 1, 2, \dots, 200)$ 。在每个分段误差区间内, 定义相对测量误差

$$X_{T_j} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{200} (T_i - \bar{T}_i)^2}{\sum_{i=1}^{200} \bar{T}_i^2}}, \quad (24)$$

$$X_{v_j} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{200} (v_i - \bar{v}_i)^2}{\sum_{i=1}^{200} \bar{v}_i^2}}, \quad (25)$$

$$X_{I_j} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{200} (p_i - \bar{p}_i)^2}{\sum_{i=1}^{200} I_0^2}}, \quad (26)$$

式中, $j = 1, 2, \dots, 20$, $\bar{T}_i = \sum_{i=1}^{200} T_i / 200$, $\bar{v}_i = \sum_{i=1}^{200} v_i / 200$, $\bar{p}_i = \sum_{i=1}^{200} p_i / 200$, p_i 为误差区间内的随机误差。由(24)、(25)式得出的温度、速度的相对测量误差如图4、图5。由图可以看出, 加误差以后, 温度测量误差放大2.5倍, 而速度测量误差放大约10倍。

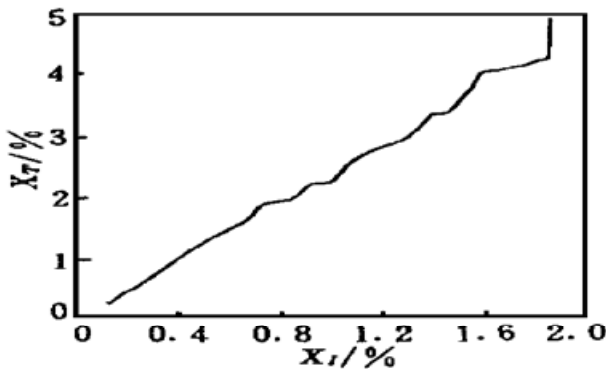


Fig. 4 Relative measurement errors of the temperature

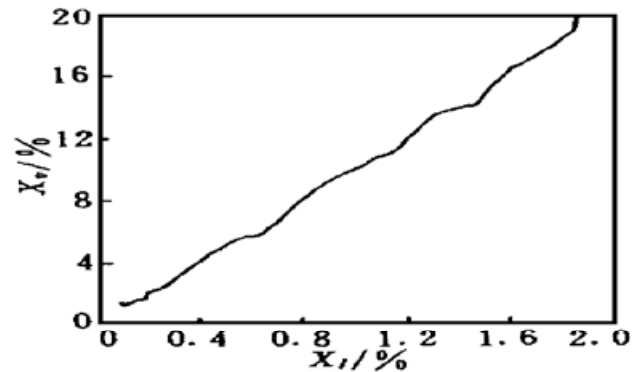


Fig. 5 Relative measurement errors of the velocity

从上面的讨论, 可以得出如下结论:

1) 利用干涉成像光谱技术, 通过对干涉图连续4次测量(光程差按 $\lambda/4$ 递增取值, 共4步), 可以对上层大气中自然形成的极光[$O(^1S)$ 、 $O(^1D)$] 谱线进行探测, 从而确定出上层大气风场的速度、温度。

2) 被探测源(原子氧)随大气以相同的速度运动, 并与周围大气其它粒子发生碰撞形成热平衡态从而与周围大气具有相同的温度。由于风场运动产生多普勒增宽, 其光谱线的轮廓可认为是高斯分布; 由于碰撞, 谱线轮廓预示为洛伦兹形, 最后叠加的谱线可能为佛克脱(Voigt)轮廓^[5]。但此处多普勒增宽占主导地位, 故可认为被探测源谱线为高斯轮廓, 此已从理论和实践测量结果方面得到证实。

3) 给出了被探测源与观察者(探测器)之间的相对速度与其二者连线成任意角时, 大气风场速度、温度的探测方法和计算公式, 扩充了目前国外(文献[1~3])所讨论的被探测源与观察者之间的相对速度只限于二者连线上的情形, 使一个方向的探测变成了多方向、多方位的探测, 极大地提高了探测效率, 扩大了研究范围, 更加符合航空、航天遥感探测的实际情况。

4) 从计算机模拟得到的温度相对测量误差 X_T 、速度相对测量误差 X_v , 随着干涉图测量误差 X_I 的增大(横坐标值增大), X_T 、 X_v 也增大(纵坐标值增大)。

5) 从图4、图5可以看出, X_T 随 X_I 的变化曲线走向的斜率小于 X_v 随 X_I 的变化曲线走向的斜率, 即 X_v 随 X_I 的变化大于 X_T 随 X_I 的变化(大约为4倍)。温度对应的碰撞形成洛伦

兹轮廓, 而速度对应的频率(或波数) 漂移对应的是高斯轮廓, 这即是认为被探测源谱线近视为高斯轮廓的原因。

参 考 文 献

- [1] Shepherd G G. Application of Doppler Michelson imaging to upper atmospheric wind measurement: WINDII and beyond. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(16) : 2764~ 2773
- [2] Shepherd G G, Thuillier G, Gault W A *et al.*. WINDII, the wind imaging interferometer on the upper atmosphere research satellite. *J. Geophys Res.*, 1993, **98**(D6) : 10725~ 10750
- [3] Shepherd G G, Gault W A, Miller D W *et al.*. WIMDII, wind-angle Michelson Doppler image interferometer for spacelab. *Appl. Opt.*, 1985, **24**(11) : 1571~ 1583
- [4] Hilliard R L, Shepherd G G. Wide-angle Michelson interferometer for measuring Doppler line widths. *J. Opt. Soc. Am.*, 1965, **56**(3) : 362~ 368
- [5] 科尼 A 著. 邱元武等译. 原子光谱学和激光光谱学. 北京: 科学出版社, 1984. 199~ 209

Interference Image Spectroscopy for Upper Atmospheric Wind Field Measurement

Zhang Chunmin^{1), 2)} Wang Wei²⁾ Xiangli Bin²⁾ Zhao Baochang²⁾

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

(Received 14 July 1999; revised 15 October 1999)

Abstract The interference image spectroscopy coupled with the Doppler effect of electrical and magnetic waves are employed to measure the natural airglow and auroral visible emission lines in the upper atmosphere. The velocity and temperature of the upper atmospheric wind field are analyzed and calculated. The relative velocity of the source to the detector with arbitrary angle to their link line is discussed. Computer simulation is employed for analyzing the effects of the measurement of the upper atmospheric wind field.

Key words atmospheric wind field, interference image spectroscopy, Doppler effect.