

大视场消色差温度补偿型风成像干涉仪 调制度的分析与计算^{*}

步志超¹⁾ 张淳民^{1)†} 赵葆常²⁾ 朱化春¹⁾

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, 西安 710068)

(2008 年 6 月 3 日收到, 2008 年 8 月 19 日收到修改稿)

摘要论述了大视场、消色差、温度补偿型风成像干涉仪用于高层探测的基本原理. 对自行设计的风成像干涉仪的调制度进行了理论分析与计算, 推导了调制度的理论表达式. 采用计算机模拟, 分析了仪器调制度随入射角的变化关系. 当调制度大于 0.75 时, 风成像干涉仪视场角可达 12.9° , 充分显示了大视场、高调制度的显著特点. 分析了玻璃折射率对调制度的影响, 得到了调制度取得最大值时玻璃的优化组合; 分析了温度对调制度的影响, 得到了调制度随着温度变化的曲线. 此研究为高层大气探测理论的发展、大气探测以及大视场、消色差、温度补偿型风成像干涉仪的研制提供了重要的理论依据及实践指导.

关键词: 干涉成像技术, 迈克尔逊干涉仪, 调制度, 双光束干涉

PACC: 4225K, 4225B, 0760

1. 引 言

大气层与人类的生存和生活密切相关. 近年来由于臭氧空洞以及由此带来的一系列环境问题, 使中高层大气的研究成为热门课题. 对大气的探测方式也多种多样, 按照探测模式划分, 大气遥感探测可分为主动探测和被动探测. 主动探测是以发射信息载体, 经大气中的微粒反射后, 再接收回波信号, 经数据处理和计算得出大气风场的速度、温度、压强等分布情形. 被动法大气风场探测主要是利用大气中携带了风场信息的气辉和极光谱线为目标源进行探测. 利用了干涉成像光谱技术和电磁波的多普勒效应^[1-8], 通过探测目标光源在基准光程差 Δ_0 以上以 $\lambda/4$ 步长步进的四个强度值, 即可得目标光源的相移和调制度, 得到大气温度、压力、风场速度等信息的方法. 被动探测的方法以其装置简单、分辨率高、探测精度高、受天气影响小等优点得到了广泛应用.

1991 年, 美国航空航天局 (NASA) 发射了一颗上层大气研究卫星 UARS (Upper Atmosphere Research

Satellite), 搭载了一台研究上层大气风场的广角迈克尔逊干涉仪 WINDII^[9], 开创了被动式探测上层大气风场的先河. 多年来, 迈克尔逊干涉仪因其视场展宽的优点在被动风场探测中得到了越来越广泛的应用. 之后, 美国国家航空航天局 (NASA), 加拿大空间署 (CSA), 加拿大 York 大学的地球空间科学研究中心 (CRESS) 和法国空间中心 (CNRS) 又陆续成功研制了多种干涉仪^[9-17], 目前, 最新的风成像干涉仪是同温层风场输运干涉仪 SWIFT (Stratospheric Wind Interferometer for Transport Studies), 它与 WINDII 的原理完全相同, 是 CSA SmallSat 计划中的主要部分, 并计划于 2011 年发射升空.

目前国内只有西安光机所和西安交大联合课题组对上层大气风场的探测原理、极光 (气辉) 谱线、实验室模拟和定标模式正在进行研究^[18-25]. 本课题组自行研制了一种新型大视场、消色差、温度补偿风成像干涉仪, 它的创新点是将原来动镜臂上的 2 块补偿玻璃变成了一块玻璃, 同样可以实现大视场、消色差、温度补偿的条件, 并且增加了玻璃材料的可选择性、系统的稳定性, 有很大的应用前景.

^{*} 国家自然科学基金重点项目 (批准号: 40537031), 国家高技术研究发展计划 (批准号: 2006AA12Z152), 国防基础科研计划 (批准号: A1420080187), 陕西省科技攻关计划 (批准号: 2005K04-G18) 和西安交通大学 985 二期电子信息平台项目资助的课题.

[†] 通讯联系人, E-mail: zcm@mail.xjtu.edu.cn

从被动式风场探测的原理可以看出,调制度是衡量仪器性能优劣的重要标准,对它的研究将直接影响到温度反演的准确性.目前,国内外被动法大气风场探测的研究机构所做的原理性分析^[9-25]都是基于傅里叶变换原理,仅仅是对于光源的调制度,而没有考虑仪器本身对调制度的影响.这会使得人们对结果的准确反演和仪器性能的正确评估都带来较大的偏差.本文利用双光束干涉原理,针对我们课题组自行研制的风成像干涉仪装置,对干涉强度值进行详细计算,从而得到包括仪器调制度在内的总调制度,并同时模拟了入射角、温度、波长和折射率对仪器调制度的影响.此研究为大视场、消色差、温度补偿型风成像干涉仪的研制以及用于高层大气风场探测提供了重要的理论依据及实践指导.

2. 上层大气风场探测的基本原理

2.1. 四强度探测法基本原理

对于较高层大气,多普勒展宽占主要地位.因此谱线线型分布函数用高斯函数表示为

$$B(\sigma) = B_0 \exp\{-4(\sigma - \sigma_0)^2 \ln 2 / W^2\}. \quad (1)$$

这里 B_0 为波数 σ 等于中心波数 σ_0 时光源的辐射强度, W 为半高宽,

$$W = [(7.16 \times 10^{-7})^2 \sigma_0^2 T/M]^{1/2}, \quad (2)$$

式中 T 为热力学温度(单位为 K), M 为原子量.干涉强度分布则为(1)式的傅里叶变换

$$K(\Delta) = I_0 [1 + \exp(-QT\Delta^2) \cos(2\pi\sigma_0\Delta)], \quad (3)$$

式中 $Q = 1.82 \times 10^{-12} (\sigma_0^2/M)$ (单位为 $K^{-1} \text{cm}^{-2}$), Δ 为有效光程差,单位为 cm, I_0 为平均强度.由光学基本原理可知^[26]条纹的调制度为

$$V = \exp(-QT\Delta^2) = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}, \quad (4)$$

那么(3)式也可以写为

$$I = I_0 [1 + V \cos(2\pi\sigma_0\Delta)]. \quad (5)$$

如果 σ_0 对应于零风速时的波数,由电磁波的多普勒效应可知,当光源与观察者的相对速度为 v 时,波数为

$$\sigma = \sigma_0(1 + v/c), \quad (6)$$

式中 c 为光速.若设 $\Delta = \Delta_0 + \Delta'$, Δ_0 称为基准光程差,且满足 $\cos 2\pi\sigma_0\Delta_0 = 1$, Δ' 为测试中以 $\lambda/4$ 为间隔从 0 到 $3\lambda/4$ 的光程差变量,得到

$$I = I_0 [1 + V \cos(2\pi\sigma_0\Delta' + \phi)], \quad (7)$$

其中

$$\phi = 2\pi\sigma_0\Delta_0 v/c, \quad (8)$$

只要测量得到了调制度 V 和相位 ϕ , 就可以根据公式(4)(8)得到风场速度 v 和温度 T .

假定 Δ' 从 $\Delta' = 0$ 以 $\lambda/4$ 的步进递增,分别得到每一步的强度为

$$\begin{aligned} I_1 &= I_0(1 + V \cos \phi), \\ I_2 &= I_0(1 - V \sin \phi), \\ I_3 &= I_0(1 - V \cos \phi), \\ I_4 &= I_0(1 + V \sin \phi). \end{aligned} \quad (9)$$

由以上(9)式可得

$$I_0 = (I_1 + I_2)/2 = (I_2 + I_4)/2, \quad (10)$$

$$V = [(I_1 - I_3)^2 + (I_4 - I_2)^2]^{1/2}/2I_0, \quad (11)$$

$$\tan \phi = (I_4 - I_2)/(I_1 - I_3). \quad (12)$$

这样就可以得到风场的速度和温度.这种探测方法称为四步法^[18].

由四强度探测原理可知,调制度是从干涉强度表达式得到的,而干涉强度是对光谱的傅里叶变换,整个推导过程只考虑到了光源的作用,而忽略了具体的干涉仪器的影响.为了得到更准确的调制度,本文采用了一种新方法——双光束干涉法,下面就对此方法进行详细阐述.

2.2. 大视场、消色差、温度补偿原理^[27]

多层介质组成的迈克尔逊干涉仪的光程差

$$\begin{aligned} \Delta &= \sum_{j=1}^k 2n_j d_j \cos i_j \\ &= 2 \sum_{j=1}^k n_j d_j - \sin^2 i \sum_{j=1}^k d_j/n_j \\ &\quad - \frac{\sin^4 i}{4} \sum_{j=1}^k d_j/n_j^2 + \dots, \end{aligned} \quad (13)$$

其中 n_j, d_j 分别是迈克尔逊干涉仪臂上第 j 块补偿玻璃的折射率和厚度, k 是补偿玻璃的总数.

基准光程差、大视场、消色差、温度补偿的方程为^[27]

$$\Delta_0 = 2 \sum_{j=1}^N n_j d_j,$$

$$\sum_{j=1}^N d_j/n_j |_{\lambda=\lambda_0} = 0,$$

$$\frac{\partial}{\partial \lambda} \sum_{j=1}^N d_j/n_j = - \sum_{j=1}^N \frac{d_j}{n_j^2} \frac{\partial n_j}{\partial \lambda} = 0,$$

$$\frac{\partial \Delta_0}{\partial T} = \frac{\partial}{\partial T} 2 \sum_{j=1}^N n_j d_j$$

$$= 2 \sum_{j=1}^N (n_j d_j \alpha_j + d_j \beta_j) = 0, \quad (14)$$

其中 α_j, β_j 是热膨胀系数。

总体而言,如果满足上述方程的补偿玻璃对都可以实现大视场、消色差、温度补偿的条件,即光程差不随着入射角、波长、温度的变化而变化。基于这个原理,WINDII 选择了 4 块补偿玻璃,而我们课题组选择了 3 块补偿玻璃,这样做会使得可以选择的玻璃种类变多(大概有 200 多种),而且得到的结果能更精确地在多个波长上满足风成像仪的大视场、消色差、温度补偿的要求。

3. 风成像干涉仪调制度的分析与计算

图 1 为自行设计的大视场消色差温度补偿型风成像干涉仪的工作原理示意图。此干涉仪的结构包含两个相同材质的直角三角形棱镜,在共有面上镀半透半反膜并胶合在一起组成六面体。另外三个不同材质的玻璃作为两臂胶合在棱镜的两边。在其中一个臂的末端留有窄的空气层,紧接着就是可以移动的反射镜,用于产生步进光程差。

由(5)式可知,干涉仪的调制度完全可以通过光强 I 来确定,而 I 是入射光经干涉仪后所得的光强,它主要由干涉仪的透射率 T 决定。下面我们就对大视场消色差温度补偿型风成像干涉仪透射率进行具体的分析和计算。

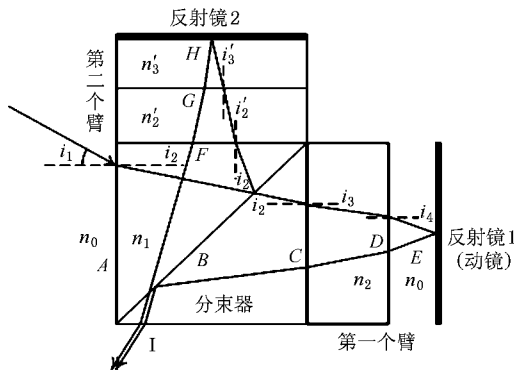


图 1 自行设计的大视场消色差温度补偿型风成像干涉仪的工作原理示意图

3.1. 大视场消色差温度补偿型风成像干涉仪各界面透射率的计算

如图 1 所示,以一束光以角度 i_1 入射干涉仪,在分束器处分成两束光,需要分别计算它们的透射率。经过第一个臂的光束从左到右分别经过界面 A,

B, C, D, E, D, C, B, I 后出射,而经过第二个臂的光束从左到右分别经过 A, B, F, G, H, G, F, B, I 后出射,两个光束在 CCD 上相遇。图 1 中 $n_0, n_1, n_2, n'_2, n'_3$ 为折射率, i_1 为光线的入射角, $i_2, i_3, i_4, i'_3, i'_4$ 为折射角。

因为入射光的 p 分量和 s 分量的透射率不同,所以需要菲涅耳公式逐一计算。满足折射率公式

$$n_0 \sin i_1 = n_1 \sin i_2 = n_2 \sin i_3 = n_0 \sin i_4, \quad (15)$$

显然有 $i_1 = i_4$, 光线经过第一个臂后出射光的总透射率为

$$\begin{aligned} T_p &= t_{pA}^2 \left(\frac{1}{2} \right)^2 t_{pC}^2 t_{pD}^2 \\ &= \frac{1}{4} \left(\frac{2n_0 \cos i_1}{n_1 \cos i_1 + n_0 \cos i_2} \right)^2 \\ &\quad \times \left(\frac{2n_1 \cos i_2}{n_2 \cos i_2 + n_1 \cos i_3} \right)^2 \\ &\quad \times \left(\frac{2n_2 \cos i_3}{n_0 \cos i_3 + n_2 \cos i_4} \right)^2, \quad (16) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T_s &= t_{sA}^2 \left(\frac{1}{2} \right)^2 t_{sC}^2 t_{sD}^2 \\ &= \frac{1}{4} \left(\frac{2n_0 \cos i_1}{n_0 \cos i_1 + n_1 \cos i_2} \right)^2 \\ &\quad \times \left(\frac{2n_1 \cos i_2}{n_1 \cos i_2 + n_2 \cos i_3} \right)^2 \\ &\quad \times \left(\frac{2n_2 \cos i_3}{n_2 \cos i_3 + n_0 \cos i_4} \right)^2, \quad (17) \end{aligned}$$

其中 T_p 和 T_s 分别为 p 分量和 s 分量总的光强透射率, $t_{pA}, t_{pB}, t_{pC}, t_{pD}$ 分别是光经过 A, B, C, D 面的 p 分量透射率, $t_{sA}, t_{sB}, t_{sC}, t_{sD}$ 分别是光经过 A, B, C, D 面的 s 分量透射率, 而且有 $t_{pB} = t_{sB} = \frac{1}{2}$ 。

同理可以计算出光线经过第二个臂的透射率, 满足折射率公式

$$n_0 \sin i_1 = n_1 \sin i_2 = n'_2 \sin i'_3 = n'_3 \sin i'_4, \quad (18)$$

光线经过第二个臂后出射光的总透射率为

$$\begin{aligned} T'_p &= t'_{pA}^2 \left(\frac{1}{2} \right)^2 t'_{pF}^2 t'_{pG}^2 \\ &= \frac{1}{4} \left(\frac{2n_0 \cos i_1}{n_1 \cos i_1 + n_0 \cos i_2} \right)^2 \\ &\quad \times \left(\frac{2n_1 \cos i_2}{n'_2 \cos i_2 + n_1 \cos i'_3} \right)^2 \\ &\quad \times \left(\frac{2n'_2 \cos i'_3}{n'_3 \cos i'_3 + n'_2 \cos i'_4} \right)^2, \quad (19) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 T'_s &= t_{sA}^2 \left(\frac{1}{2} \right)^2 t_{sF}^2 t_{sG}^2 \\
 &= \frac{1}{4} \left(\frac{2n_0 \cos i_1}{n_0 \cos i_1 + n_1 \cos i_2} \right)^2 \\
 &\quad \times \left(\frac{2n_1 \cos i_2}{n_1 \cos i_2 + n'_2 \cos i'_3} \right)^2 \\
 &\quad \times \left(\frac{2n'_2 \cos i'_3}{n'_2 \cos i'_3 + n'_3 \cos i'_4} \right)^2, \quad (20)
 \end{aligned}$$

其中 T'_p 和 T'_s 分别为 p 分量和 s 分量总的光强透射率, t_{pA} , t_{pB} , t_{pF} , t_{pG} 分别是光经过 A, B, F, G 面的 p 分量透射率, t_{sA} , t_{sB} , t_{sF} , t_{sG} 分别是光经过 A, B, F, G 面的 s 分量透射率, 而且有 $t_{pB} = t_{sB} = 1/2$.

3.2. 干涉强度的计算

相同分量的光才会相干涉, 分别计算 p 分量和 s 分量出射光的光强. 设 $\epsilon(\sigma)$ 是波数为 σ 的入射光光强, 因为入射光为自然光, 对于 p 分量、 s 分量有 $\epsilon_p(\sigma) = \epsilon_s(\sigma) = \frac{1}{2} \epsilon(\sigma)$. 对于 p 分量, 第一个臂的出射光强可以表示为

$$E_p(\sigma) = \frac{1}{2} \epsilon(\sigma) T'_p \exp(i 2\pi\sigma\Delta_1) d\sigma, \quad (21)$$

第二个臂的出射的光强可以表示为

$$E'_p(\sigma) = \frac{1}{2} \epsilon(\sigma) T'_p \exp(i 2\pi\sigma\Delta_2) d\sigma, \quad (22)$$

其中 Δ_1, Δ_2 分别为两束光经过干涉仪系统后的光程. 由大视场、消色差、温度补偿条件可知^[9], 两束出射光之间的光程差是稳定的, 不因为入射角度、波长等发生变化, 可以将两个出射光束的光程差看作固定的值, 即当仪器各个参数确定以后, $\Delta = \Delta_1 - \Delta_2$ 为常数. 所以总光强为

$$\begin{aligned}
 \epsilon_R(\sigma) &= \frac{1}{2} \epsilon(\sigma) T'_p \exp(i 2\pi\sigma\Delta_1) d\sigma \\
 &\quad + \frac{1}{2} \epsilon(\sigma) T'_p \exp(i 2\pi\sigma\Delta_2) d\sigma. \quad (23)
 \end{aligned}$$

干涉强度即可表示为

$$\begin{aligned}
 \mathcal{K}(\sigma) d\sigma &= \epsilon_R(\sigma)^* \epsilon_R(\sigma) = \frac{1}{4} \epsilon(\sigma)^2 [T_p^2 + (T'_p)^2 \\
 &\quad + 2T_p T'_p \cos 2\pi\sigma(\Delta_2 - \Delta_1)] d\sigma. \quad (24)
 \end{aligned}$$

又因为入射光是高斯分布, 且满足 $B(\sigma) = \frac{1}{2} cK_0 \epsilon(\sigma)^* \epsilon(\sigma)$ ^[28], 即 $B(\sigma) = \frac{1}{2} cK_0 \epsilon(\sigma)^2$, 其中 c 为真空中的光速, K_0 为真空介电常数, 大小为 8.85×10^{-12} F/m. 因此干涉强度可写为

$$\begin{aligned}
 I_p &= \int_{-\infty}^{+\infty} \mathcal{K}(\sigma) d\sigma \\
 &= (T_p^2 + T_p'^2) \frac{1}{2cK_0} \sqrt{\pi} B_0 \sqrt{w^2/4 \ln 2} \\
 &\quad + T_p T'_p \frac{1}{cK_0} B_0 \sqrt{\pi} \sqrt{w^2/4 \ln 2} \\
 &\quad \times \exp\left(-\frac{w^2}{4 \ln 2} \pi^2 \Delta^2\right) \cos 2\pi\sigma_0 \Delta. \quad (25)
 \end{aligned}$$

同理, 对于 s 分量干涉强度为

$$\begin{aligned}
 I_s &= \int_{-\infty}^{+\infty} \mathcal{K}(\sigma) d\sigma \\
 &= (T_s^2 + T_s'^2) \frac{1}{2cK_0} \sqrt{\pi} B_0 \sqrt{w^2/4 \ln 2} \\
 &\quad + T_s T'_s \frac{1}{cK_0} B_0 \sqrt{\pi} \sqrt{w^2/4 \ln 2} \\
 &\quad \times \exp\left(-\frac{w^2}{4 \ln 2} \pi^2 \Delta^2\right) \cos 2\pi\sigma_0 \Delta. \quad (26)
 \end{aligned}$$

所以最后总的出射光光强应为两个相互垂直分量强度的非相干叠加, 即

$$\begin{aligned}
 I &= I_p + I_s \\
 &= (T_p^2 + T_p'^2 + T_s^2 + T_s'^2) \frac{1}{2cK_0} \sqrt{\pi} B_0 \sqrt{w^2/4 \ln 2} \\
 &\quad \times \left[1 + \frac{2T_p T'_p + 2T_s T'_s}{T_p^2 + T_p'^2 + T_s^2 + T_s'^2} \right. \\
 &\quad \left. \times \exp\left(-\frac{w^2}{4 \ln 2} \pi^2 \Delta^2\right) \cos 2\pi\sigma_0 \Delta \right]. \quad (27)
 \end{aligned}$$

3.3. 仪器的调制度

设总的调制度为 V_G , 光源的调制度为 V_L . 将 (27) 式与 (5) 式比较可知,

$$V_G = \frac{2T_p T'_p + 2T_s T'_s}{T_p^2 + T_p'^2 + T_s^2 + T_s'^2} \exp\left(-\frac{w^2}{4 \ln 2} \pi^2 \Delta^2\right), \quad (28)$$

因为

$$\exp\left(-\frac{w^2}{4 \ln 2} \pi^2 \Delta^2\right) = \exp(-QT\Delta^2) = V_L, \quad (29)$$

所以

$$V_G = \frac{2T_p T'_p + 2T_s T'_s}{T_p^2 + T_p'^2 + T_s^2 + T_s'^2} V_L = UV_L, \quad (30)$$

其中

$$U = \frac{2T_p T'_p + 2T_s T'_s}{T_p^2 + T_p'^2 + T_s^2 + T_s'^2} \quad (31)$$

为仪器的调制度.

4. 计算机模拟

由公式(30)可知,大视场消色差温度补偿型风成像干涉仪中调制度由仪器调制度和光源调制度两部分组成.仪器的调制度取决于透射率 T_p, T'_p, T_s, T'_s , 而从公式(16)(17)(19)(20)可知,透射率由入射角、各个玻璃的折射率所决定,所以仪器的调制度完全取决于入射角和各个玻璃的折射率,其中玻璃的折射率又与波长有关.由(29)式可知,光源调制度与温度有关.下面就具体分析调制度随着这些量的变化关系.

4.1. 入射角对调制度的影响

入射角只与仪器调制度有关,所以下面的讨论都是针对仪器的调制度.我们首先假设玻璃的折射率都是常数,其中 $n_1 = 1.5152$,材料是 BK7; $n_2 = 1.878775$,材料是 LASF31A; $n'_2 = 1.578676$,材料是 LF5; $n'_3 = 1.644010$,材料是 SF2.这一组数据是本课题组得出的一组满足大视场消色差条件的风成像干涉仪的数据.此时,由(31)式可知,仪器的调制度仅仅是关于入射角的函数,利用 Matlab 作出它们之间的关系曲线.

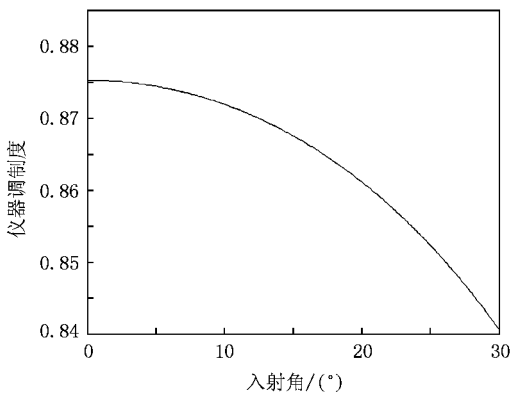


图2 仪器调制度随着入射角的变化关系

从图2可以看出,随着角度 i_1 的增加,仪器的调制度 U 单调减少,但减少的速度比较慢,而且入射角在 30° 之内时,仪器调制度都能满足在 0.84 以上.反之,我们也可以用来计算满足 $V_{\text{总}} \geq 0.75$ 的条件下,可实现的宽场入射角范围.由(29)式知,

$$V_L = \exp(-QT\Delta^2),$$

已知 $Q = 1.82 \times 10^{-12} (\sigma_0^2/M \chi \text{ 单位为 } \text{K}^{-1} \text{cm}^{-2})^{11}$,

而本课题组设计的大视场消色差温度补偿型风成像干涉仪中 $\Delta \approx \Delta_0 = 4.5 \text{ cm}$, $T = 200 \text{ K}$, 波长为 $\lambda_0 = 557 \text{ nm}^{[25]}$, 经计算可知 $V_L = 0.8622$, $V_C \geq 0.75$, 从而可以得到仪器调制度的最小值 $U = 0.8698$. 根据(31)式可得 $i = 12.9^\circ$, 这个角度远远大于一般的风成像干涉仪的入射角 $i = 3^\circ$. 由此可见,本课题组的设计具有高调制度、宽场的特点.

4.2. 折射率对调制度的影响

4.2.1. 波长恒定的情况

由上述分析知,入射角对调制度的影响很小,在考虑折射率对调制度影响的过程中可以忽略不计,下面都是在入射角 $i_1 = 3^\circ$ 且波长为 557.7 nm 下进行讨论.

自行研制的干涉仪其分束器的材料是折射率为 $n_1 = 1.5152$ 的玻璃 BK7,同时空气隙的折射率 $n_0 = 1$ 也是常数,只有 n_2, n'_2, n'_3 这三种玻璃的折射率可变.从我们得到的一组满足宽场玻璃的数据中可以看出,有很多情况下 $n_2 = 1.878775$,材料是 LASF31A,这样我们利用这个数值对另外两个折射率对仪器调制度的影响进行了仔细的分析.

(1)用 Matlab 以 n'_2, n'_3 两个折射率为变量,做出它们关于调制度的三维图.如图3所示, n'_2 和 n'_3 的范围都选择在 1.4—1.9,可以明显看出调制度随着 n'_3 的增大而减少.由于从图3中 n'_2 与调制度的关系不能明显确定,所以下面就固定 n'_3 的值,讨论调制度随 n'_2 的变化关系.

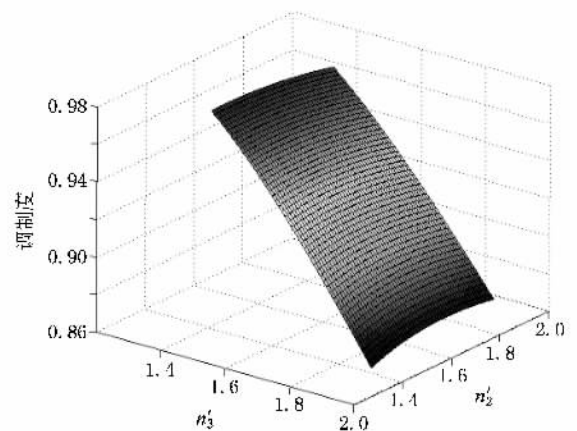


图3 调制度随折射率 n'_2, n'_3 的变化关系

(2)如图4,固定 $n'_3 = 1.644010$,可以看出,随着 n'_2 的增大,调制度先增大,后减小,在中间有个极

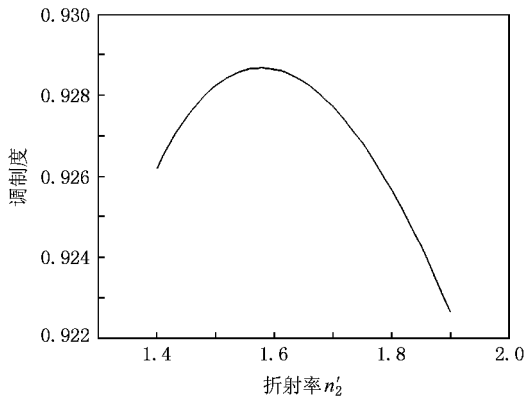


图 4 调制度随折射率 n'_2 的变化关系 ($n'_3 = 1.644010$)

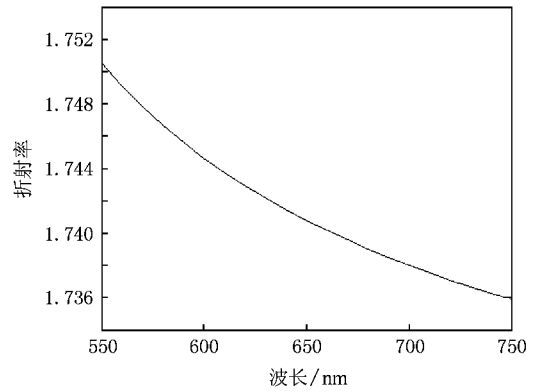


图 5 折射率随波长的变化关系

大值. 让 n'_3 在 1.4—1.9 之间变换不同的值, 也会得到相同的结论.

(3) 根据上述分析, 我们将得到的满足大视场、消色差、温度补偿条件的 200 组玻璃的数据代入, 求出仪器调制度的极大值. 经过计算可知, 在 $n'_2 = 1.616748$ 材料为 F2, $n'_3 = 1.525315$ 材料为 P-PK53 的情况下, 仪器调制度可以取到最大值 $U = 0.9522$.

4.2.2. 波长变化的情况

以上讨论了波长为恒定值时折射率与仪器调制度的关系. 但是由于风成像干涉仪是大视场、消色差、温度补偿型迈克尔逊干涉仪, 允许入射光有一定的波长范围(风成像干涉仪 WINDII 选择波段为 550—750 nm), 因此讨论波长对调制度的影响是必要的.

波长对仪器调制度的影响是通过波长对玻璃折射率的影响体现出来的. 玻璃折射率随着波长变化有一个经验公式^[9], 即

$$n^2 = A_0 + A_1 \lambda^2 + A_2 \lambda^{-2} + A_3 \lambda^{-4} + A_4 \lambda^{-6} + A_5 \lambda^{-8}, \quad (32)$$

式中常数 $A_0, A_1, A_2, A_3, A_4, A_5$ 都因玻璃种类不同而变化, 为了研究波长与折射率的变化关系, 本文只需考虑常数的数量级, 即 $A_0 = 1, A_1 = -1 \times 10^{-2}, A_2 = 10^{-2}, A_3 = 10^{-4}, A_4 = 10^{-6}, A_5 = 10^{-6}$. 图 5 所示为折射率随着波长的变化关系.

从图 5 可以看出, 在 550—750 nm 的波段范围内, 折射率最大值为 1.7505, 最小值为 1.7359, 变化量为 0.0146. 根据图 3、图 4 可以看出, 在如上的折射率变化值时, 相应的调制度变化就更小, 为 10^{-4} — 10^{-3} 数量级. 对于一般要求不是很精确的情况下, 这样的变化完全可以忽略不计.

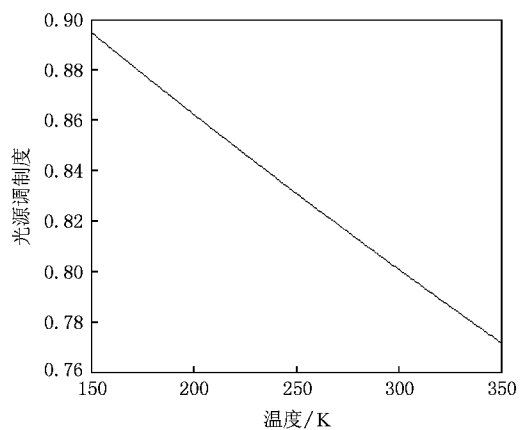


图 6 调制度随温度的变化关系

4.3. 温度对调制度的影响

由(29)式可知, 温度的变化会引起光源调制度的改变. 下面就讨论温度对调制度的影响.

如图 6 所示, 光源调制度随着温度的增加而减小, 当温度在 150—300 K 之间变化时, 可以看到调制度由 0.9 变化到 0.76, 变化幅度比较大. 这说明调制度随温度变化比较灵敏.

5. 结 论

(1) 分析了大视场、消色差、温度补偿型风成像干涉仪的基本原理, 利用双光束干涉原理, 推导出了自行设计的风成像干涉仪出射光的光强, 得到了总调制度的理论计算公式.

(2) 理论上证明了风成像干涉仪的调制度是与入射角有关的量. 随着角度 i_1 的增加, 调制度 U 单调减少, 但减少的速度比较慢. 在满足 $V_C \geq 0.75$ 的

条件时,可实现宽场下入射角的范围为 $i = 12.9^\circ$.

(3) 分析了补偿玻璃对仪器调制度的影响,首先讨论了恒定波长为 557.7 nm,且保持分束器的材料和第一个臂上 $n_2 = 1.878775$ 折射率不变的情况下,给出了仪器调制度关于另两块补偿玻璃的变化曲线,并用计算机得到的满足大视场、消色差、温度补偿条件的 200 组玻璃的数据进行逐个计算,得到了调制度取得最大值时玻璃的最优组合,即 $n_1 = 1.5152$ 材料为 BK7, $n_2 = 1.878775$ 材料是 LASF31A, $n'_2 = 1.616748$ 材料为 F2, $n'_3 = 1.525315$ 材料是 P-PK53. 然

后讨论变波长的情况,得知在调制度要求不是很精确的情况下,波长的影响完全可以忽略不计.

(4) 光源调制度是与温度有关的量. 分析得到随着温度的增加调制度迅速减小.

(5) 该风成像干涉仪满足了大视场、消色差、温度补偿的设计原理,并充分显示了高调制度的显著优点,可用于高层大气风场速度场、温度场和微粒辐射率测定. 这风成像干涉仪的研制提供了重要的理论依据及实践指导.

- [1] Zhang C M, Zhao B C, Xiang L B 2004 *Appl. Opt.* **43** 6090
- [2] Zhang C M, Xiang L B, Zhao B C 2004 *J. Opt. A* **6** 815
- [3] Zhang C M, Xiang L B, Zhao B C 2002 *Opt. Commun.* **203** 21
- [4] Zhang C M, Zhao B C, Xiang L B 2003 *Opt. Commun.* **227** 221
- [5] Wu L, Zhang C M, Zhao B C 2007 *Opt. Commun.* **273** 67
- [6] Jian X H, Zhang C M, Zhao B C 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 824 (in Chinese) [简小华、张淳民、赵葆常 2007 物理学报 **56** 824]
- [7] Yuan Z L, Zhang C M, Zhao B C 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 6413 (in Chinese) [袁志林、张淳民、赵葆常 2007 物理学报 **56** 6413]
- [8] Peng Z H, Zhang C M, Zhao B C, Li Y C, Wu F Q 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 6374 (in Chinese) [彭志红、张淳民、赵葆常、李英才、吴福全 2006 物理学报 **55** 6374]
- [9] Gault W A, Shepherd G G 1983 *Adv. Space Res.* **2** 111
- [10] Rochon Y J, Rahnama P, McDade I C, Scott A, Gault W A, Lukovich J V 2004 *Proc. SPIE* **5234** 335
- [11] Gault W A, McDade I C, Rochon Y J, Scott A 2003 *Proc. SPIE* **4881** 60
- [12] McDade I C, Shepherd G G, Gault W A, Rochon Y J, McLandress C, Scott A, Rowlands N, Buttner G 2001 *IEEE* **3** 1344
- [13] Gault W A, Ward W E, Shepherd G G, Rowlands N 1999 *IEEE* **3** 1612
- [14] Shimoda H 2003 *Proc. SPIE* **4881** 52
- [15] Bird J C, Facheng L, Solheim B H, Shepherd G G 1995 *Meas. Sci. Technol.* **6** 1368
- [16] Gault W A, Brown S, Moise A, Liang D, Sellar G, Shepherd G G, Wimperis J 1996 *Appl. Opt.* **35** 2913
- [17] Ward W E, Gault W A, Shepherd G G, Rowlands N 2002 *Proc. SPIE* **4833** 226
- [18] Zhang C M, Wang W, Xiang L B, Zhao B C 2000 *Acta Opt. Sin.* **20** 234 (in Chinese) [张淳民、王 炜、相里斌、赵葆常 2000 光学学报 **20** 234]
- [19] Zhang C M, He J 2006 *Opt. Express* **14** 12561
- [20] Zhang C M, Zhao B C, Xiang L B, Li Y C 2006 *Optik* **117** 265
- [21] He J, Zhang C M, Zhang G Q 2007 *Spectroscopy and Spectral Analysis* **27** 423 (in Chinese) [贺 健、张淳民、张庆国 2007 光谱学与光谱分析 **27** 423]
- [22] He J, Zhang C M 2005 *J. Opt. A* **7** 613
- [23] Tang Y H, Zhang C M, Liu H C, Chen G D, He J 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 4065 (in Chinese) [唐远河、张淳民、刘汉臣、陈光德、贺 健 2005 物理学报 **54** 4065]
- [24] Ye J Y, Zhang C M, Zhao B C 2007 *Acta Phys. Sin.* **57** 67 (in Chinese) [叶健勇、张淳民、赵葆常 2007 物理学报 **57** 67]
- [25] Wang L, Zhao B C, Xiang L B, Zhang C M 2007 *Acta Photon. Sin.* **36** 1697 (in Chinese) [汪 丽、赵葆常、相里斌、张淳民 2007 光子学报 **36** 1697]
- [26] Zhao K H, Zhong X H 1984 *Optics* (Beijing: Peking University Press) p167 (in Chinese) [赵凯华、钟锡华 1984 光学(北京:北京大学出版社)第 167 页]
- [27] Zhang C M, Zhao B C, Li Y C, Ye J Y 2007 *Proc. SPIE* **6279** 62791D1-1
- [28] Bell, R J 1972 *Introductory Fourier Transform Spectroscopy* (New York: Academic) p37

Analysis and calculation of the modulation depth of the Michelson interferometer with wide field , chromatic compensation and thermal compensation *

Bu Zhi-Chao¹⁾ Zhang Chun-Min^{1)†} Zhao Bao-Chang²⁾ Zhu Hua-Chun¹⁾

¹⁾ School of Science , Xi'an Jiaotong University , Xi'an 710049 ,China)

²⁾ Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics , Chinese Academy of Sciences , Xi'an 710068 ,China)

(Received 3 June 2008 ; revised manuscript received 19 August 2008)

Abstract

Principle of the measurement of the upper atmospheric wind field using a Michelson interferometer with wide field , chromatic compensation and thermal compensation is briefly described. The modulation depth of the self-developed wind imaging interferometer is analyzed and calculated , and the expression of the modulation depth is derived. Computer simulation is adopted , and the dependence of the modulation depth on the angle is analyzed. The field of view of the wind imaging interferometer is 12.9° when modulation depth is greater than 0.75 , which fully shows the advantages of wide field and high modulation depth. The dependence of the modulation depth on the refractive index of glass is analyzed , and the optimized material is given. The dependence of the modulation depth on temperature is analyzed , and the curve is given. The research has important theoretical significance and practical value both for the research and development of the Michelson Interferometer with wide field , chromatic compensation and thermal compensation and the detection of the upper atmospheric wind field.

Keywords : interference imaging technology , Michelson interferometer , the modulation depth , dual-beam interference

PACC : 4225K , 4225B , 0760

* Project supported by the Key Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 40537031) , the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2006AA12Z152) , the National Defence Basic Scientific Research Program (Grant No. A1420080187) , the Key Program of Science and Technology of Shaanxi Province , China (Grant No. 2005K04-G18) and " 985 " Project of Xi 'an Electronic Information Platform of xi 'an Jiaotong University.

† Corresponding author. E-mail zcm@mail.xjtu.edu.cn