

空间调制干涉成像光谱技术*

相里斌 赵葆常 薛鸣球

(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 介绍空间调制干涉成像光谱技术, 提出基于实体迈克尔逊干涉仪的空间调制干涉成像光谱仪, 推导了这种仪器的基本几何参数公式与主要误差容限计算公式, 总结了其主要特点。文中还归纳出高通量大视场干涉仪原理模型。

关键词 成像光谱技术, 傅里叶变换, 迈克尔逊干涉仪, 空间调制干涉仪。

1 引 言

为了克服多光谱扫描仪光谱信息量太少、不能提供一定光谱范围内比较完整的光谱图的缺点, 发展了成像光谱技术。首先进入工程应用的是基于棱镜或光栅的色散型成像光谱仪, 近年来又出现了干涉成像光谱仪的新概念。至今, 这项技术演变成两类, 即依靠动镜扫描的时间调制干涉成像光谱仪(Temporarily Modulated Imaging Interferometer 简记 TMII)^[1]和依靠探测器阵列扫描的空间调制干涉成像光谱仪(Spatially Modulated Imaging Interferometer 简记 SMII)^[2-6], 后者在九十年代以后引起了人们的高度重视, 具有十分重要的研究和应用价值。

本文介绍空间调制干涉成像光谱技术的基本原理, 归纳出一种高通量大视场干涉仪物理模型, 提出基于实体迈克尔逊干涉仪的空间调制干涉成像光谱仪(SMIIM), 给出其基本几何参数与主要误差容限计算公式, 并总结其主要特点。

2 空间调制干涉成像光谱技术

本文提出如图 1 所示基于实体迈克尔逊干涉仪的双角反射体分束空间调制干涉成像光谱仪。图中 a 和 b 分别为两个角反射体的直角边长, c 为两个角反射体的错位置, d 为光束被分割后的剪切量。它主要由六部分组成: 前置望远或照相光学系统 Camera、双角反射体分束器、傅里叶透镜 FTL、柱面镜 CL、面阵探测器 Detector 及信号处理系统。其工作原理为: 前置光学系统将目标成像于 FTL 的前焦面, 此处垂直纸面放置一个狭缝, 经双角反射体分束后, 狭缝在 FTL 的同一前焦面上被分成一对虚像, 他们与原狭缝平行并且宽度方向一致。两虚狭缝在 FTL 后焦面处的干涉强度被探测器阵列接收; 柱面镜 CL 将该干涉光束收集到水平

* 中国科学院院长基金与院重点资助课题。

收稿日期: 1997-06-16; 收到修改稿日期: 1997-08-25

方向(沿探测器某一行平行于纸面), 这样, 狭缝上位于垂直纸面方向不同视场点的干涉强度分布被探测器的不同行接收, 这些干涉强度分布经逆傅里叶变换即得到目标点的光谱分布, 从而获得一维光谱和一维空间信息。当狭缝推扫过目标像时, 即可获得另一维空间信息。

2.1 高通量大视场干涉仪

对空间调制干涉成像光谱仪来说, 分束器是其核心, 它决定了仪器的性质。目前国际上比较好的分束方法有两种, 即 Sagnac 干涉仪^[2-4]与双折射棱镜^[5,6]分束, 他们的主要特点是能够将狭缝垂直于光轴等光程地分开, 其等效光路模型如图 2 所示, 注意 s_1 、 s_2 代表狭缝的宽度, 他们的方向是相同的, 图中略去了柱面镜, 这时探测器 O 点的光程差为零, 任意点 P 的

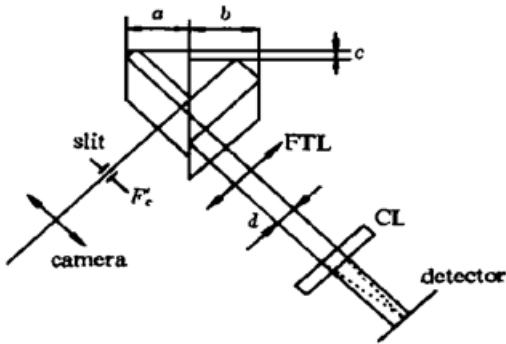


Fig. 1 Spatially modulated imaging interferometer

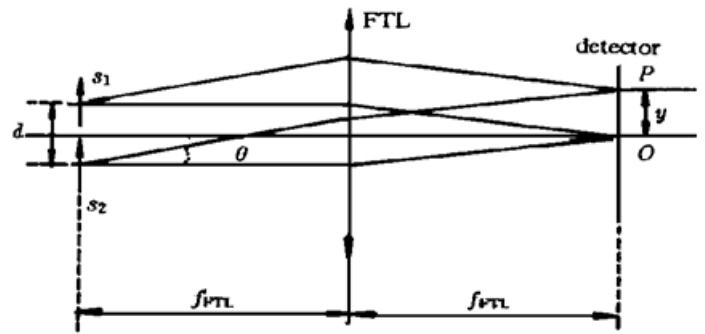


Fig. 2 Field-widened super-throughput interferometer

光程差为:

$$x = d \sin \theta = yd/f_{FTL} \tag{1}$$

上式对狭缝宽度内任意点都是成立的, 所以当波数范围 $\Delta\nu = \nu_2 - \nu_1$ 时, 干涉图表达式为:

$$I(x) = \int_{\nu_1}^{\nu_2} B(\nu) \cos(2\pi x) d\nu = \int_{\nu_1}^{\nu_2} B(\nu) \cos\left(\frac{2\pi y d}{f_{FTL}}\right) d\nu \tag{2}$$

其中 $B(\nu)$ 为入射光谱强度分布, 式中略去了一些不重要的常数项。

可见, 这时干涉图调制度不受狭缝形状、大小等因素影响^[7]。因此在空间分辨率允许的情况下, 狭缝可以很宽或具有任意形状, 从而可增大视场角(增加狭缝高度)、提高辐射通量(增大狭缝面积)。故这类分束器又被称为大视场或高通量分束器^[6], 由这种分束器构成的干涉仪就是高通量大视场干涉仪。

本文提出的双角反射体分束器在满足错位置 $c = b - a$ 时, 具有上述大视场、高通量性质。

2.2 基本几何参数公式

由图 1 可以得到:

$$d = 2 \sqrt{2} c = 2 \sqrt{2} (b - a) \tag{3}$$

设光谱波段范围是 $\Delta\nu = \nu_2 - \nu_1$, 则干涉条纹的最小周期是:

$$T_y = f_{FTL}/d\nu_2 \tag{4}$$

根据采样定理, 采样周期需不大于 T_y 的一半:

$$T_s \leq \frac{T_y}{2} = \frac{f_{FTL}}{2d\nu_2} = \frac{f_{FTL}}{4 \sqrt{2} (b - a) \nu_2} \tag{5}$$

因此探测器像元尺寸 s 必须满足:

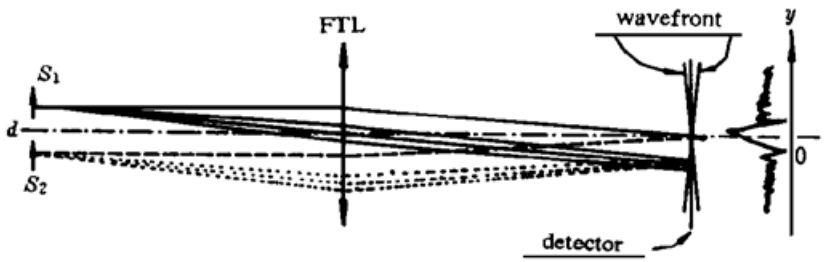
$$s \leq T_s \leq \frac{f_{FTL}}{4 \sqrt{2(b-a)v_2}} \tag{6}$$

以上公式是设计本文提出的空间调制干涉成像光谱仪的基本关系式，由它们再根据技术指标可以方便地确定出仪器的主要几何参数。

2.3 干涉图调制度

在空间调制干涉成像光谱仪中，干涉图的调制度会受到仪器固有性质的影响。考虑图 3 所示情况(略去柱面镜)，设探测器单元尺寸 $s = y_2 - y_1$ ，则某单元所收集到的干涉强度为：

$$I(x_s) = \frac{1}{x_2 - x_1} \int_{v_1 x_1}^{v_2 x_2} B(v) \cos(2\pi vx) dx dv \tag{7}$$



$$x_1 = dy_1/f_{FTL}, \quad x_2 = dy_2/f_{FTL} \tag{8}$$

因此：

$$I(x_s) = \int_{v_1}^{v_2} B(v) \sin c\left(\frac{vxs}{f_{FTL}}\right) \times \cos(2\pi vx_s) dv \tag{9}$$

Fig. 3 Optical path difference of SM II

上式说明， v 、 d 和 s 增加或 f_{FTL}

减小会使干涉图调制度降低，结合(1) 式会发现不能单纯为了提高光谱分辨率而增加 d 或减小 f_{FTL} 。

2.4 主要误差容限公式

Sellar^[2] 定性分析了傅里叶变换透镜和柱面镜的像差对干涉图的影响，下面将针对在研制基于实体迈克尔逊干涉仪的空间调制干涉成像光谱仪中发现的主要问题，讨论角反射体角度误差及柱面镜与干涉条纹垂直误差对干涉图调制度的影响(仅针对波数为 v 的单色光)。

2.4.1 角反射体角度误差

1) 方位角误差 当双角反射体的某一块有方位误差时，会引起相应反射光束的偏斜。图 4 是双角反射体的顶视图，因这里仅讨论反射面倾斜问题，故没有画出角反射体的错位 c 。图中虚线代表右角反射体经分束膜所成虚像，若如图中所示角反射体某面的偏斜为 θ ，那么出射光线将偏转 $2n\theta$ ，这时干涉图的调制度将会随狭缝宽度的增加而降低。考虑更为一般的情况，设出射光线偏转角为 θ_0 ，狭缝宽度为 w ，可以得到此时干涉图调制度的表达式为：

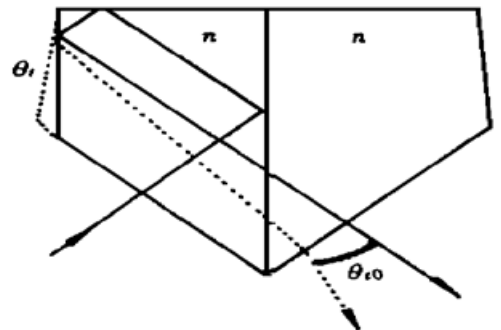


Fig. 4 Azimuthal angle error of dihedral corner

$$M = \frac{\sin(\pi vw \theta_0)}{\pi vw \theta_0} = \text{sinc}(\pi vw \theta_0) \tag{10}$$

若要求方位角误差引起干涉图调制度下降不超过 10%，则：

$$\theta_0 \leq \frac{0.254}{vw} \tag{11}$$

2) 俯仰角误差 图 5 是双角反射体的左侧视图, 图中虚线是另一个角反射体, 俯仰角误差为 θ_s , 则经过该面反射后出射的光线将偏转 $2n\theta_s$ 。考虑更为一般的情况, 设出射光线偏转角为 θ_{s0} , 这一误差使狭缝高度方向上不同位置点的光程差不再相同, 最大误差量为:

$$\delta x = \theta_{s0}[(H_c + H_s)/2] \quad (12)$$

其中 H_c 是角反射体高度, H_s 为狭缝高度。

在基于实体迈克尔逊干涉仪的空间调制干涉成像光谱仪中, 俯仰角误差会造成干涉条纹的倾斜。图 6 是作者在实验中得到的一组倾斜干涉条纹, 当调整某一角反射体的俯仰角时, 干涉条纹的倾斜方向会随之改变。

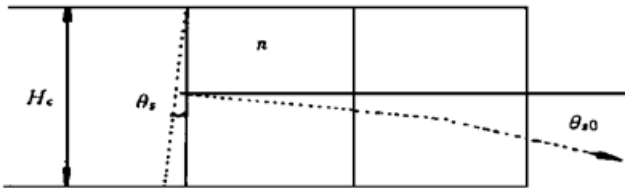


Fig. 5 Elevation angle error of dihedral corner

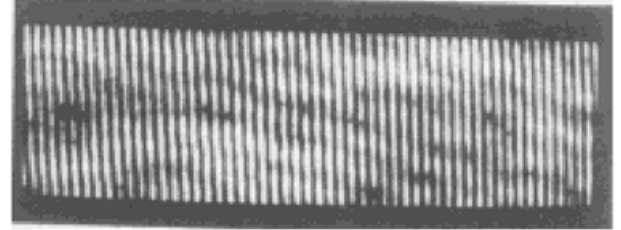


Fig. 6 Fringe inclination due to the elevation angle error

在采样干涉图时, 一般都留有一定的过零量, 设过零量为干涉图最大光程差 L 的 η 倍 ($\eta \leq 1$, 当 $\eta = 1$ 时为双边采样), 则要求:

$$\theta_{s0} \left(\frac{H_c + H_s}{2} \right) \leq \eta L$$

得到:

$$\theta_{s0} \leq \frac{2\eta L}{H_c + H_s} \quad (13)$$

2.4.2 柱面镜母线与干涉条纹垂直 柱面镜是空间调制干涉成像光谱仪获得一维空间信息必不可少的元件, 理论上讲, 其母线应与干涉条纹垂直, 但实际上二者之间总会有一定的夹角 θ_u , 设柱面镜所收集干涉条纹矩形区域的高度为 H_v , 则某一视场点干涉图的调制度为:

$$M = \text{sinc} \left(\frac{v d H_v \theta_u}{f_{FTL}} \right) \quad (14)$$

(14) 式表明柱面镜母线与干涉条纹不垂直, 会使干涉图调制度降低。若要求此时干涉图调制度下降不超过理想值的 10%, 则:

$$\theta_u < \frac{f_{FTL}}{4v d H_v} \quad (15)$$

3 空间调制干涉成像光谱仪的特点

相对于色散型成像光谱技术, 干涉成像光谱技术具有众所周知的高通量、多通道和高光谱分辨率等优点, 进一步归纳空间调制干涉成像光谱仪的特点:

1) 不需要精密扫描动镜, 避免了由于精密扫描动镜所带来的一系列技术上的困难, 使结构更紧凑, 提高了仪器的稳定性、可靠性以及抗震动冲击能力, 特别适用于野外及航天领域;

2) 具有对光谱测量的实时性, 即对目标干涉图的测量是同时的, 这使它适用于对快速运动目标或者光谱快速变化目标的测量;

3) 允许比较大的视场角和任意形状、大小的入射光孔, 因此光通量较高。这一特点也可

解释为, 这种干涉成像光谱仪对目标的空间相干性无要求;

- 4) 光谱分辨率(波段数)主要受探测器单元数的制约, 一般在 $10^2 \sim 10^3$ 量级;
- 5) 狭缝宽度仅与一维空间分辨率有关, 与光谱分辨率无关, 因此降低了设计难度;
- 6) 采用面阵探测器并依靠推扫获得二维空间信息与一维光谱信息。

本文提出的基于实体迈克尔逊干涉仪的空间调制干涉成像光谱仪除具有以上特点外, 还由于干涉光束分别经分束膜一次反射一次透射, 因此对分束膜透射、反射率的一致性要求不高。

小 结 本文介绍了空间调制干涉成像光谱仪的概念, 提出一种基于实体迈克尔逊干涉仪的双角反射体分束空间调制干涉成像光谱仪, 归纳出高通量、大视场干涉仪物理模型, 推导出该光谱仪的基本几何参数公式与主要误差容限计算公式, 并总结了空间调制干涉成像光谱仪的主要特点。

参 考 文 献

- [1] C. L. Bennett, M. Carter, D. Fields *et al.*, Imaging Fourier transform spectrometer. *Proc. SPIE*, 1993, **1937**: 191~ 200
- [2] R. G. Sellar, J. B. Rafert, The effects of aberrations on spatially modulated Fourier transform spectrometers. *Opt. Engng.*, 1994, **33**(16): 3087~ 3092
- [3] R. G. Sellar, J. B. Rafert, Fourier transform imaging spectrometer with a single toroidal optic. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(16): 2931~ 2933
- [4] J. B. Rafert, R. G. Sellar, J. H. Blatt, Monolithic Fourier transform imaging spectrometer. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(31): 7228~ 7230
- [5] P. D. Hammer, F. P. J. Valero, D. L. Peterson, An imaging interferometer for terrestrial remote sensing. *Proc. SPIE*, 1993, **1937**: 244~ 255
- [6] W. H. Smith, P. D. Hammer, Digital array scanned interferometer: sensors and results. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(16): 2902~ 2909
- [7] M. L. Junttila, J. Kauppinen, E. Ikonen, Performance limits of stationary Fourier transform spectrometers. *J. Opt. Soc. Am. (A)*, 1991, **8**(9): 1457~ 1462

Spatially Modulated Imaging Interferometry

Xiangli Bin Zhao Baochang Xue Mingqiu

(Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710068)

(Received 16 June 1997; revised 25 August 1997)

Abstract The spatially modulated imaging interferometry (SMII) is introduced. A double-dihedral-corner spatially modulated imaging interferometer based on a monolithic Michelson interferometer (SMIIM) is presented. The general model of super-throughput interferometer, the basic design equations and the tolerance of the main errors of SMIIM are discussed.

Key words imaging spectroscopy, Fourier transform, Michelson interferometer, spatially modulated interferometer.