

文章编号: 0253-2239(2001)03-0330-05

大孔径静态干涉成像光谱仪的干涉系统分析*

董 瑛 相里斌 赵葆常

(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: 从不同方面说明大孔径静态干涉成像光谱仪的特点, 介绍其干涉系统的光学原理, 分析基于横向剪切干涉仪的干涉系统设计思想, 讨论两种高通量大视场横向剪切干涉仪, 总结了大孔径静态干涉成像光谱仪的主要优点。

关键词: 成像光谱技术; 干涉仪; 静态; 高通量

中图分类号: O433.1 文献标识码: A

1 引 言

成像光谱技术是本世纪 80 年代出现的一项融光学、光谱学、精密机械、电子技术及计算机技术于一体的高新科技。由于它能够获得被测目标的空间和光谱的丰富信息, 因此在航空航天遥感、军事侦察、科学实验、环境监测、资源勘测以及工、农业等许多方面具有重要的应用价值。成像光谱技术目前主要有三种类型, 即色散型、干涉型和计算层析型。其中色散型最为成熟, 已应用于工程且已取得了很好的效果; 计算层析型还处于研究阶段, 由于它必须以像元数十分巨大的 CCD 探测器及计算速度更快的计算机为支持, 因而在应用上还存在一定的困难; 介于两种之间的干涉型已处于研究新原理、新方案、设计新仪器、研制实验室样机和初步应用阶段, 因此专家预测, 它将成为下一代实用化成像光谱技术的代表^[1]。

干涉成像光谱技术目前主要有两种, 一种是基于迈克耳孙干涉仪的时间调制型, 另一种是基于横向剪切干涉仪的空间调制型。干涉型光谱仪较之色散型光谱仪具有高通量和高信噪比两大优势, 但作为成像光谱仪, 时间调制型的成像视场受到光谱分辨率的限制, 而空间调制型的能通量与空间分辨率之间也存在着矛盾。

鉴于此, 我们以高通量大视场干涉系统为核心, 设计了大孔径静态干涉成像光谱仪(LASIS)。本文从不同方面介绍大孔径静态干涉成像光谱仪的特点, 重点论述干涉系统的光学原理和设计思想, 并对这一新型成像光谱仪的主要优点作出总结。

2 大孔径静态干涉成像光谱仪原理

大孔径静态干涉成像光谱仪是在普通照相系统中加入横向剪切干涉仪, 从而使像面上得到的不再是目标的直接图像, 而是目标的“干涉图像”, 如图 1 所示。“大孔径静态”的提法是针对干涉系统的特点而言的。与通常意义上的空间调制型干涉成像光谱仪不同, 此干涉系统没有入射狭缝, 因而是“大孔径”的; 与时间调制型干涉成像光谱仪不同, 此干涉系统中没有扫描运动部件, 因而是“静态”的。

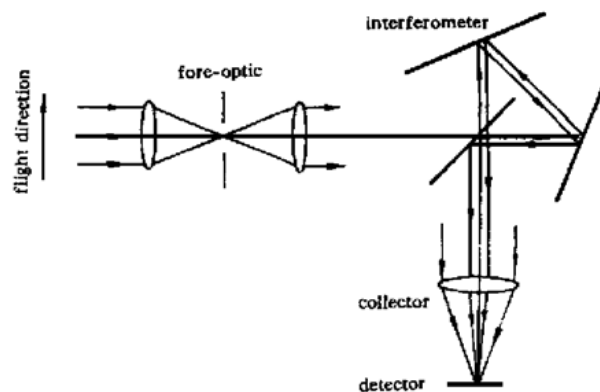


Fig. 1 Large aperture static imaging spectrometry (LASIS)

2.1 图像特征

图 2 是某一时刻大孔径静态干涉成像光谱仪获得的一幅完整的 CCD 图像, 可以看作是被干涉仪调制过的一幅全视场景物图像。在图的中部, 干涉条纹很明显, 景物的空间信息则有些模糊; 在图的边缘, 物像对应关系很明显, 却几乎看不到干涉条纹。得到这样的图像是由大孔径静态干涉成像光谱仪干涉系统的特点决定的: 随着视场角的增大, 干涉仪产生的光程差增大, 干涉现象减弱, 图像被调制的程度就降低。

* 863-2 高科技资助项目。

收稿日期: 1999-05-10; 收到修改稿日期: 1999-12-13



Fig. 2 CCD image of LASIS

2.2 数据处理

根据傅里叶变换光谱学原理,干涉图与光源的光谱分布之间存在傅里叶变换关系,这正是大孔径静态干涉成像光谱仪获得光谱信息的依据。大孔径静态干涉成像光谱仪数据处理包含两个主要内容,即从干涉图像复原物点的光谱分布以及还原景物的真实图像。

大孔径静态干涉成像光谱仪利用面阵探测器并依靠推扫获得二维空间信息和一维光谱信息。对于视场中的每一点,随着飞行器的推扫,其相对于干涉仪的视场角将发生变化,当飞行器扫过一个全视场的面积时,将得到这一点的干涉图,对干涉图实施傅里叶变换就得到该物点的光谱分布。如果对视场中的每一点作同样的处理,再将它们的光谱信息与其空间位置信息结合起来,就能合成一幅景物的真彩色图像。

2.3 大孔径静态干涉成像光谱仪与空间调制干涉成像光谱仪的比较

大孔径静态干涉成像光谱仪与空间调制干涉成像光谱仪(SMII)都是基于横向剪切干涉仪的无动镜干涉成像光谱仪,二者产生光程差的原理是相同的。大孔径静态干涉成像光谱仪是在空间调制干涉成像光谱仪的基础上提出的,但与空间调制干涉成像光谱仪在系统结构和工作方式上有明显的区别。

1) 系统结构 图 3 是空间调制干涉成像光谱仪的示意图,与图 1 相比不难发现,图 1 所示的大孔径静态干涉成像光谱仪中没有入射狭缝,也没有柱面镜。在空间调制干涉成像光谱仪中,入射狭缝的形状和大小虽然不影响光谱分辨率(由探测器单元数决定)却会影响空间分辨率(由探测器单元数和狭缝宽度共同决定),柱面镜使探测器在一个方向上获得一维光谱分辨率的同时又在另一个方向上获得了一维空间分辨率。由于入射狭缝和柱面镜的共同作

用,使得空间信息只在狭缝高度方向上获得,而光谱信息则只在狭缝宽度方向上获得。这样,对于横向剪切干涉仪只需研究从狭缝宽度方向入射的光线。

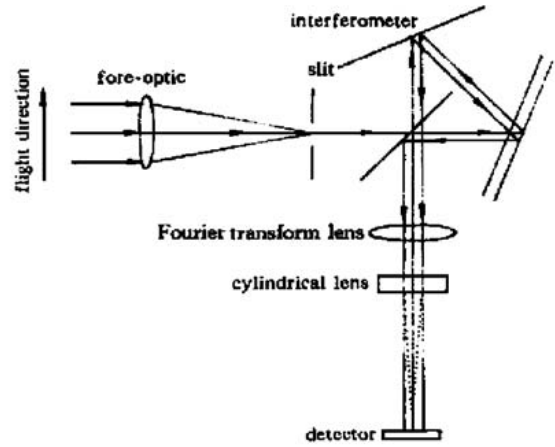


Fig. 3 Spatially modulated imaging interferometer (SMII)

对于图 1 所示的大孔径静态干涉成像光谱仪,去掉其中的横向剪切干涉仪就成为一个典型的照相系统。这时面阵探测器上得到的将是与景物有着简单物像对应关系的图像。加入横向剪切干涉仪后,携带景物空间信息的光线在到达探测器之前都要经过干涉仪的调制,因而面阵探测器上得到的图像不仅体现了视场中物点的空间分布情况同时又包含了物点的光谱信息。探测器单元将图像离散化,相当于对空间信息和光谱信息同时进行采样,因此空间分辨率和光谱分辨率都是由探测器单元数决定的。

2) 工作方式 在空间调制干涉成像光谱仪中,一幅 CCD 图像对应一个限制在入射狭缝内的视场,沿狭缝高度方向的不同视场单元的干涉强度被 CCD 的不同行接收,这样,CCD 在行方向上获得一维光谱信息的同时又在列方向上获得了一维空间信息,通过推扫可以获得另一维空间信息。由于干涉图的获得不需要推扫,因此空间调制干涉成像光谱仪对光谱的测量是实时的。

大孔径静态干涉成像光谱仪产生光程差的方式属于空间调制,而获得干涉图的方式却有时间调制的特点。虽然大孔径静态干涉成像光谱仪的一幅 CCD 图像中同时包含着二维空间信息和一维光谱信息,但要获得一幅完整的干涉图必须经过一次全视场的推扫过程。因此,大孔径静态干涉成像光谱仪对光谱的测量是非实时的。

从以上两个方面的比较中不妨可以这样认为:空间调制干涉成像光谱仪是一台能够成像的光谱仪,而大孔径静态干涉成像光谱仪则是一台能够获得光谱信息的成像仪。

3 干涉系统分析

3.1 像平面干涉仪的原理

像平面干涉仪是大孔径静态干涉成像光谱仪的核心。简单地说,像平面干涉仪就是在成像系统中加入这样一种双光束干涉仪,它将每一束成像光分为相干的两束。它们在像平面上发生干涉,使得像平面被自己的自相关函数所调制,从而在面阵探测器上形成一个静态的“自相关调制场”^[2],场中各点的相位关系与它们在物空间中的位置关系相对应。

3.2 两种像平面干涉仪的方案

美国科学应用国际公司应用光学部 1996 年研制的“高通量成像傅里叶变换光谱仪实验装置 PhaseI”^[3]中采用非准直光条件下的马赫-曾德尔(Mach-Zehnder)干涉仪作为像平面干涉仪,图 4 是这一系统的等效光路图。在没有干涉仪存在的情况下,成像物镜将景物的像成在面阵探测器上;干涉仪的作用就是将它前面的光学系统分为两套,并使这两套光学系统的成像波面等光程,但要倾斜一定的角度。该装置通过这种干涉系统成功地获得了干涉图,但这个系统存在着原理上的缺陷。

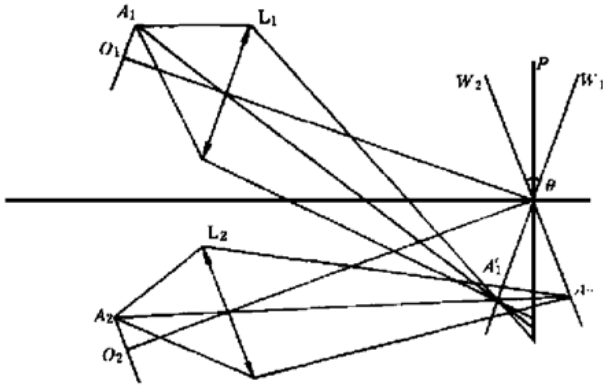


Fig. 4 Image plane interferometer based on modified Mach-Zehnder Interferometer

从图中可以看出,轴外点 A 在探测器平面上的两个像斑必须重合在同一个探测器单元上才能干涉。这一点可以通过两种途径来实现,一种是减小成像系统的孔径,使像斑扩大成为弥散斑,直至两个弥散斑有足够的重合部分,但这样做会降低干涉图的调制度;另一种是直接调整干涉仪使两个像斑重合,但这样的调整只能针对视场中的某一点来进行。

两个成像波面间的夹角 θ 是由干涉仪产生的。这个角度决定了像平面上干涉条纹的空间频率,因此必须满足一定的要求,如要满足采样定理,即干涉条纹的空间频率应略大于 2 倍的探测器空间采样频率。另外, θ 角不能太小,否则光瞳的衍射曲线所包

络的干涉信息就太少;但如果 θ 角过大,两个成像波面将超出成像系统的焦深范围,使像面变得模糊不清。这些条件都会给干涉仪的设计带来一定困难。

另一种像平面干涉仪的设计方案就是我们在大孔径静态干涉成像光谱仪中采用的准直光条件下的萨尼亚克(Sagnac)型横向剪切干涉仪。以下将详细介绍这种基于横向剪切干涉仪的干涉系统的原理和设计思想。

3.3 基于横向剪切干涉仪的干涉系统

3.3.1 光程差的形成和干涉图的获得

图 5(a)中,像面 P_1 是前置光学系统的后焦面, s_0, s_ω 分别表示视场角为 0 和为 ω 的平行光在像面 P_1 上的会聚点,可以当作干涉仪的两个点光源。横向剪切分束器是干涉仪的核心,它的作用是将一个点光源沿垂直于光轴的方向等光程地分成两个。一束入射光经横向剪切分束器后成为两束互相平行的相干光,由于这两束光对于前面的分束器来说等光程面是垂直于光轴方向的,而对于后面的成像系统来说等光程面则是垂直于光线方向的。对于视场角不为 0 的光线这两个等光程面是不重合的,因此当两束平行的相干光会聚到收集镜 L_2 的后焦面 P_2 上同一点时就存在着光程差,从而发生干涉。设被剪切开的两束光之间的横向距离(沿垂直于光轴方向度量)为 Z ,则它们在像面 P_2 上干涉时的光程差为

$$\delta(\omega) = Z \sin \omega, \tag{1}$$

当 L_2 采用傅里叶透镜时,

$$\sin \omega = x/f_2, \tag{2}$$

其中 x 为干涉点的横向坐标, f_2 为收集镜的焦距。当视场角 ω 很小时,可用一般物镜代替傅里叶透镜,这时

$$\sin \omega \approx \tan \omega = x/f_2, \tag{3}$$

光程差为

$$\delta(x) = (Z/f_2)x. \tag{4}$$

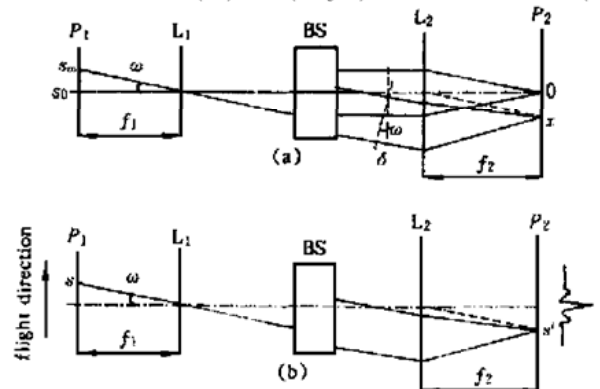


Fig. 5 Principle of interferometer system in LASIS

图 5(b) 表示某一时刻物点 s 刚刚进入干涉仪视场的情形, 在飞行器推扫整个视场的过程中, s 对干涉仪的视场角将从正的最大值变到 0 又变到负的最大值, 其几何像点 s' 也将沿横向从 CCD 的一端移动到中心又移动到另一端。由于不同的像点位置对应不同的光程差, 因此记录 s' 在不同位置时探测器输出的干涉强度, 将得到与物点 s 的光谱分布相对应的干涉图。若 s 为单色点光源, 则输出干涉强度为

$$I_{\nu}(x) = B_0(\nu) \cos \left[2\pi \frac{Z}{f_2} \nu x \right] \quad (5)$$

当光源具有一定的光谱分布时, 得到的干涉图应表示为

$$I(x) = \int_{\nu_1}^{\nu_2} B_0(\nu) \cos \left[2\pi \frac{Z}{f_2} \nu x \right] d\nu, \quad (6)$$

其中 ν_1 、 ν_2 分别表示光源所包含的最小和最大波数。根据傅里叶变换光谱学的基本关系式^[4], 光源的光谱分布可由干涉图的傅里叶变换来求得, 即

$$B(\nu) = \int_0^{\delta_m} I(\delta) \cos(2\pi\nu\delta) d\delta = \int_0^{\delta_m} I(x) \cos \left[2\pi \frac{Z}{f_2} \nu x \right] d\delta \quad (7)$$

积分上限 δ_m 和 x_m 分别表示最大光程差及其对应的干涉点的位置。

3.3.2 空间光线分析

在前面介绍大孔径静态干涉成像光谱仪的原理时我们注意到, 进入横向剪切干涉仪的光线来自空间任意方向, 而在推导光程差公式时只考虑了干涉仪子午面内的光线。为了全面研究大孔径静态干涉成像光谱仪干涉系统的特点, 就必须对空间光线的光程差进行分析。

以萨尼亚克横向剪切干涉仪为例, 利用矢量分析和空间坐标变换的方法编写了一个计算空间光线光程差的程序, 并通过计算机仿真实验归纳出光程差的表达式为^[5]

$$\delta(\omega, u) = d \sin \omega \cos u, \quad (8)$$

其中 u 为光线偏离干涉仪子午面的角度, ω 为光线在子午面内的投影与光轴的夹角, d 为横向剪切分束器对光线产生的横向剪切距离, 它是在子午面内度量的。从式中可以看出, 光程差由两个因素决定, 即光线的方向和横向剪切分束器对光线产生的横向剪切量, 后者是一个由横向剪切分束器的结构参数决定的常量。因此, 下面对横向剪切分束器的讨论就

只在子午面内进行。

3.3.3 高通量大视场横向剪切分束器的设计

我们在研究空间调制干涉成像光谱仪时, 总结了一种高通量大视场横向剪切分束器的等效模型, 以此模型为基础构造了两种高通量大视场横向剪切分束器, 即双角反射体横向剪切分束器和半五角棱镜横向剪切分束器^[6,7]。

双角反射体横向剪切分束器的想法来自采用角反射体的迈克耳孙干涉仪, 其原理如图 6(a)。可以看出, 被分割的两束光经过分束面时都是一次反射一次透射, 因此对分束膜的要求可以放松, 但由于两束光分别走过不同的光路, 因此对分束面两边的结构对称性, 包括角度、面形、胶合层均匀性、楔角等有较高的要求。

半五角棱镜横向剪切分束器的想法来自三角循环光路的萨格纳克干涉仪, 如图 6(b) 所示。萨格纳克型横向剪切分束器是一种共光路分束器, 被分割的两束光在分束器内走过的光路基本相同, 因此这种分束器对分束面两边的结构参数, 如半五角棱镜的角度, 胶合层楔角等要求不高, 但由于两束光经过分束面的情况不同, 其一是两次透射, 另一为两次反射, 因此对分束膜的分束比要求较严。

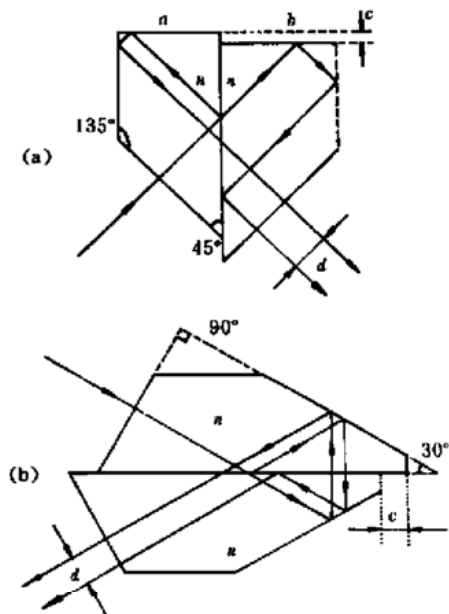


Fig. 6 Field-widened super-throughput lateral shearing beamsplitters

经过比较, 我们决定在大孔径静态干涉成像光谱仪中采用共光路的萨格纳克型横向剪切分束器, 并对分束器的结构形式进行了设计和改进^[8]。

总结 基于萨尼亚克横向剪切干涉仪的高通量大视

场干涉系统的设计,使大孔径静态干涉成像光谱仪具有许多优点,主要表现在:

1) 原理简单,使得系统结构简化,系统设计难度降低;

2) 没有运动部件,提高了系统的稳定性、可靠性、抗震动性和抗冲击性,能够适用于野外和航空航天环境,从而扩大了仪器的使用范围;

3) 允许有很大的视场和任意形状、大小的通光口径,在满足光通量的要求下可以大大减小仪器的体积、重量、功耗等。

以上这些优点构成了实现轻型、高稳定度干涉成像光谱技术的基础。

参 考 文 献

- [1] Breckinridge J B. Evolution of imaging spectrometry: Past, present, and future. *Proc. SPIE*, 1996, **2819**: 121~ 132
- [2] Horton R F. Optical design for a high étendue imaging Fourier transform spectrometer. *Proc. SPIE*, 1996, **2819**: 300~ 315
- [3] Horton R F, Conger C A, Pellegrino L S. High étendue imaging Fourier transform spectrometer initial results. *Proc. SPIE*, 1996, **2819**: 380~ 390
- [4] Bell R J. *Introduction Fourier Transform Spectroscopy*. New York, London, San Francisco: Academic Press, 1972. 34~ 39, 108~ 127
- [5] 董 瑛,相里斌,杨建峰等. 大孔径静态干涉成像光谱仪中横向剪切干涉仪的空间光线分析. *光子学报*, 1999, **28**(10): 901~ 905
- [6] Xue Mingqiu, Xiangli Bin, An Baoqing. Optical systems of imaging interferometers. *Proc. SPIE*, 1998, **3482**: 475~ 483
- [7] 相里斌,赵葆常,薛鸣球. 空间调制干涉成像光谱技术. *光学学报*, 1998, **18**(1): 18~ 22
- [8] 董 瑛,相里斌,赵葆常. 大孔径静态干涉成像光谱仪中的横向剪切干涉仪. *光子学报*, 1999, **28**(11): 991~ 995
- [1] Breckinridge J B. Evolution of imaging spectrometry: Past,

Analysis of Interferometer System in a Large Aperture Static Imaging Spectrometer

Dong Ying Xiangli Bin Zhao Baochang

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

(Received 10 May 1999; revised 13 December 1999)

Abstract: Characteristics of the large aperture static spectrometer (LASIS) are described from different aspects. Principles of its interferometer system is introduced. Design of the interferometer system based on lateral shearing interferometer is presented and analyzed. Two kinds of high étendue large view field lateral shearing interferometers are discussed. Primary merits of LASIS are summarized.

Key words: imaging spectroscopy; interferometer; static; throughput