像面干涉成像光谱技术中的复原方法

孟鑫1,李建欣1,李苏宁2,朱日宏1

(1. 南京理工大学 电子工程与光电技术学院,江苏 南京 210094;
 2. 中国电子科技集团第28 研究所,江苏 南京 210094)

摘 要:与传统的干涉成像光谱技术相比,像面干涉成像光谱技术具有高光通量、高光谱分辨率、高 目标分辨率等优点。在介绍像面干涉成像光谱技术的基本原理基础上,提出了通过推扫横向剪切分 束器对目标进行探测的方法,省去了传统推扫方法中提取物点干涉信息时的图像配准过程。研究了 信息处理中去直流项、切趾等预处理问题,分析了相位误差校正方法及各种方法的优缺点。搭建 Sagnac 型像面干涉成像光谱实验装置进行了光谱重构实验,复原了被测光源的光谱曲线,并复原了 探测目标在各个谱段的光谱图像。

关键词:光谱学; 高光谱成像; 像面干涉 中图分类号:O433 文献标志码:A 文章编号:1007-2276(2013)08-2238-06

Recovery algorithm of image plane interference imaging spectrometer

Meng Xin¹, Li Jianxin¹, Li Suning², Zhu Rihong¹

(1. Insitude of Electronic Engineering and Photoelectronic Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;

2. The 28th Research Institute of China Electronic Science & Technology Group, Nanjin 210094, China)

Abstract: A series of interferometric images were acquired by pushbroom in the image plane interferometric hyperspectral technology, where the fringe pattern of every point was extracted and the spectrum was reconstructed by Fourier transform. Compared with the traditional interference imaging spectrometer, it had the advantages of high flux, high spectral resolution, high target resolution and so on. The basic principle of imaging plane interference spectrometer was introduced and a new push - broom method was presented. The petreatment such as apodization and DC removal are researched. Then the phase error correction methods were discussed, so as their advantages and disadvantages. A Sagnac image plane interference spectrometer was set up, and the spectral curve of the measured light was got. Key words: spectrocopy; hyperspectral imaging; image plane interferometric

收稿日期:2012-12-20; 修订日期:2013-01-18

基金项目:国家自然科学基金(61205016、U1231112);教育部博士点基金(20123219120021); 中国科学院天文光学技术重点实验室开放课题基金

作者简介:孟鑫(1989-),博士生,主要从事干涉成像光谱偏振技术方面的研究。Email:15850577081@163.com

通讯作者:李建欣(1977-), 副教授, 博士, 主要从事精密光学测试和干涉成像光谱技术方面的研究。Email: Ijx@vip.163.com

0 引 言

像面干涉成像光谱技术是 20 世纪 90 年代发展 起来的新型遥感成像光谱探测技术,通过在无限远 成像系统中加入横向剪切分束器引入目标的干涉信 息^[1]。利用干涉信息和光谱信息之间存在的傅里叶变 换关系来复原光谱信息。像面干涉成像光谱技术已 成为国内外研究热点,以色列、美国、法国、意大利以 及国内中国科学院西安光学精密机械研究所、西安 交通大学、北京理工大学等研究机构都在开展此类 研究工作^[2-7]。与传统的干涉成像光谱技术相比,具 有高光通量、高光谱分辨率、高目标分辨率等优点, 在航空航天遥感、工业产品检测、生物医学、环境监 控等领域具有潜在的应用价值^[8-10]。

像面干涉成像光谱技术通过推扫获取探测目标 的一系列干涉图像,从中提取物点不同光程差的干 涉信息进行傅里叶变换来复原光谱信息。文中首先 介绍了像面干涉成像光谱技术的基本原理,提出了 通过推扫横向剪切分束器对目标进行探测的方法, 分析了干涉信息处理中去直流项、切趾、相位误差校 正等问题。搭建 Sagnac 型像面干涉成像光谱实验装 置,对激光、LED(Light Emitting Diode)灯等光源进行 了干涉成像探测,利用文中所述的方法对目标进行 了光谱复原实验,得到了探测目标的光谱信息。

1 像面干涉成像光谱技术基本原理

像面干涉成像光谱技术通过在无限远成像系统 中加入横向剪切分束器,在像面上得到探测目标经 过自相关调制的干涉图像,其光能量利用率和一般 的照相系统相当,具有高通量的优点。像面干涉成像 光谱仪主要由横向剪切分束器、无限远成像系统、探 测器组成,基本原理如图1所示。



图1像面干涉成像光谱技术原理图



在像面干涉成像光谱技术应用中,目标处于较 远的距离,此时可认为目标物点发出的光束以平行 光束的形式进入干涉成像系统,目标上不同的物点 对应不同入射角的平行光束。当平行光束进入系统 经过横向剪切分束器后,被横向剪切成两束光。这两 束光的等光程面与横向剪切分束器的光束出射面平 行,而对于后面的成像系统而言,入射平行光束的等 光程面垂直于入射光束。当横向剪切分束器的出射 面垂直于系统光轴时,对于视场角不为零的光束,两 个等光程面不重合,则入射平行光束通过成像系统 到达像面同一点时,由于存在光程差会形成干涉。目 标上不同位置上的物点对应着不同的视场角,因此 像面上不同位置的像点对应着不同的光程差,所成 的像是经过光程差调制的干涉图像。当系统在推扫 成像过程中,每个像点在不同时刻被不同的光程差 进行调制,经过完整的推扫后该像点形成干涉条纹。 对该干涉条纹数据进行傅里叶变换计算,即可得到 所对应的物点的光谱信息。

2 内部推扫方法

现有像面干涉成像光谱仪多用于遥感探测,一般装载于卫星或者飞机等载体上对对面目标进行 探测。因此多采用整体推扫方式,即利用载体的运 动实现对目标场景的推扫成像。探测过程中,干涉 条纹的位置不发生变换,而目标像随之移动,获取 的干涉图序列分布见图 2(a)。采用这种推扫方式, 存在以下几个主要问题:一是在物点干涉信息的提 取过程中需要进行图像配准,增加了复原光谱的难 度;二是数据采集存在冗余度大,增加图像数据存 储量; 三是最大光程差受制于探测器靶面的大小, 影响复原光谱分辨率。

在进行地面探测或者室内探测时,仪器固定不动,采用内部推扫的方法可以有效的克服上述问题。 入射光束经过横向剪切分束器后被一分为二,两束 剪切光的等相位面与横向剪切分束器的出射面平 行。转动横向剪切分束器,出射光束的方向不发生变 换,因此探测器获取的目标场景不发生变换;但是两 束剪切光的等相位面会绕横向剪切分束器的旋转轴 转动,导致干涉图像中干涉条纹发生变化,获取的干 涉图序列分布见图 2(b)。采用内部推扫方法最大的 优点在于,在推扫过程中,目标场景图像不动,因此 在提取每个物点干涉信息时不需要进行图像匹配。



(a) 整体推扫方法获取的干涉图序列

(a) Interferometric images captured by rotating the whole system



(b) 内部推扫获取的干涉图序列

(b) Interferometric images captured by rotating the lateral shearing splitter

图 2 两种推扫方式获取的干涉图序列示意图

Fig.2 Two interferometric images captured by different pushbroom modes

利用内部推扫的方法来获取物点干涉信息的形 与迈克尔逊时间型干涉成像光谱仪类似。由于通过 旋转横向剪切分束器来完成推扫,而不是通过移动 一条干涉光路来完成,因此这种推扫模式不需要压 电陶瓷(Piezo material lead Zirconate Titanate,PZT)进 行精密推扫。与传统的时间型干涉成像光谱仪相比 具有结构上的优势。

采用内部推扫的方法,目标物点理论上可以获 得任意的光程差的干涉信息。而不再受到探测器靶 面大小的限制。在满足信噪比的条件下,可以获得更 高分辨率的复原光谱信息。

3 光谱复原方法

3.1 干涉信息与光谱信息对应关系

根据干涉信息和光谱信息之间的傅里叶变换关系,干涉成像光谱仪获取的物点干涉信息为:

$$I(\Delta) = 2 \int_{0}^{+\infty} B(\sigma) (1 + \cos 2\pi \sigma \Delta) d\sigma$$
 (1)

式中:B(σ)为目标物点的光谱信息;I(Δ)为采集的干 涉信息;Δ为光程差;σ为波数(σ=1/λ)。对于充分调 制的干涉信息,存在直流分量I(+∞),其不包含光谱 信息,在复原光谱信息时可以去除。将B(σ)对偶延 拓至负数域,公式(1)可改写为:

$$I(\Delta) = \int_{-\infty}^{+\infty} B(\sigma) \cos(2\pi\sigma\Delta) d\sigma = \int_{-\infty}^{+\infty} B(\sigma) e^{i2\pi\sigma\Delta} d\sigma \quad (2)$$

如果也将 I(Δ)对偶延拓扩展至负数域,则干涉 信息和光谱信息之间存在傅里叶变换的关系,即:

$$I(\Delta) = FT^{-1}[B(\sigma)] \quad B(\sigma) = FT[I(\Delta)]$$
(3)

3.2 干涉信息预处理过程

像面干涉成像光谱仪获取的干涉图序列提取目 标各物点不同光程差的干涉信息后要进行预处理, 包括去直流项、切趾处理等。

像面干涉成像光谱仪获取的干涉图序列提取 目标各物点不同光程差的干涉信息见公式 (1),首 先要去直流项,由于目标背景光强随时间发生一 定的变化,因此提取的同一物点的干涉信息中直流 项(DC)不是一个常数,而是随光程差变化的量,如 图 3(a)所示。去除这一直流量的方法很多,其中常 用的是最小二乘拟合法^[11],去除直流项后的干涉信 息如图 3(b)所示。



Fig.3 Fringe pattern with DC and fringe pattern without DC

根据公式(2),光程差从负无穷到正无穷变化, 干涉图是沿光程差方向无限延展的。但在实际测量 中,光程差在-Δ~+Δ的区间内完成干涉图测量和傅 立叶变换,也就是说干涉图不能在无限区间扫描获 得,而是在光程差最大处Δ_{max}骤然截止为0。图4(a) 所示为波数为σ₀的单色光谱经系统后形成的干涉 图和实际状况下的重构光谱展宽。从图中可以看出 重构光谱不再是一条单一谱线,而是一个 sinc 函数, 即仪器函数,其第一个旁瓣强度为主峰值的 22%^[12]。 产生旁瓣的物理根源在于极大光程差 Δ_{max} 附近干涉 图的尖锐不连续性,它既是波数 σ₀ 附近虚假光谱信 号的来源,也掩盖了真实光谱附近一些弱光谱信号。 因此需要对干涉图进行一定的处理以抑制旁瓣。抑 制旁瓣的过程称为切趾或加窗,常用的切趾函数由 三角窗、Happ-Genzel 窗、余弦窗等。利用三角窗对 图 4(a)对应的干涉信息进行切趾,复原光谱信息如 图 4(b)所示,可以看出经过切趾处理后,复原单色谱 线变窄,并且抑制了旁瓣。





3.3 相位校正

在理想情况下,干涉成像光谱仪目标光源的光 谱可以由公式(2)精确得到。此时,参与光谱重构的 干涉图函数 I(Δ)是一个精确对称的实函数,得到的 光谱函数 也相应是一个精确对称的实函数。但实 际情况下,对干涉图的采样是离散的,这就使得零 光程差位置在大多数情况下,并不是对应于所采集 干涉图的中间位置,即引入了一个位移量 ε,则公 式(2)更改为:

$B_{c}(\sigma) = \int_{-\infty}^{+\infty} I(\Delta + \varepsilon) \exp(-j2\pi\sigma\Delta) d\Delta =$ $B(\sigma) \exp[-j\phi(\sigma)]$ (4)

式中:B_c(σ)为未经过相位校正直接重构得到的光 谱;B(σ)为真实光谱; φ(σ)=2πεσ 为相位误差函数。 由公式(2)可见,当参与光谱重构的干涉图失去精确 对称性时,将会使得重构光谱虚部不为零,即在真实 光谱中引入了一个额外的相位误差 exp[-jφ(σ)],真 实光谱中的有效信息会被分散至虚部中。图 5(a)为 相位差为 π/2 时的等效干涉图,图 5(b)即为等效正 弦量的余弦傅里叶变换,可以看到,仪器函数的偶函 数特性完全消失,此时经过傅里叶变换重构的光谱 将失去其实数形式。







由于仪器对不同波长光线的折射率不同,且位移量 ε 是一个小量,可以认为 $\phi(\sigma)$ 是关于 σ 缓慢变化的函数,显然

$$\phi(\sigma) = \arctan\left[\frac{\mathsf{B}_{\mathrm{ci}}(\sigma)}{\mathsf{B}_{\mathrm{cr}}(\sigma)}\right] \tag{5}$$

式中:B_d(*o*)和 B_a(*o*)分别为 B_a(*o*)的虚部和实部。除 了因离散采样所导致的相位误差外,探测器的各类 噪声会导致采集信号的漂移,分束器的加工误差会 导致光程差的偏离,对于不同波长的光线,仪器各部 件的折射率不同,从而零光程差点也会偏离中间位 置,这些都将使得干涉图失去精确对称性,从而将相 位误差引入重构光谱中。

相位误差会引起重构光谱的畸变甚至错误,并 将光谱能量分散至虚部;在某些情况下,光谱强度还 有可能出现负值的情况,从而使测量结果失去真实 性;另外,相位误差通常是非线性的,它的引入会使 得重构光谱的波数和光程差之间也失去线性关系。 因此,有必要对相位误差进行校正,以消除由正弦分 量所导致的仪器函数畸变。目前常用的相位校正方 法包括 Connes 平方根法,Mertz 乘积法^[13],Forman 卷 积法^[14]以及三种基本方法的不同改型

由于乘积法在频域进行相位校正,因此通过短 双边干涉图计算出的相位误差光谱分辨率无法满足 真实光谱分辨率的要求,但该相位误差覆盖的光谱 范围和真实光谱是相同的,因此只需将该相位误差 拟合至所需要的光谱分辨率,即可计算出真实光谱。

目前工程上主要应用的是平方根和 Mertz 法, 因为两种方法相对运算量小。在精确求解时,一般采 用 Forman 法对干涉信息进行多次修正,但卷积法的 计算量比乘积法大。

4 实验与分析

搭建像面干涉成像光谱装置,对文中所述的光

谱复原方法进行验证,实验装置由三部分组成:推扫 镜、横向剪切分束器和成像系统,如图 6 所示。横向 剪切分束器采用 Sagnac 结构。成像系统由成像镜和 探测器组成,探测器采用 1/3 in 靶面的 CCD。实验装 置的光谱探测范围是 450~750 nm。



图 6 实验装置示意图 Fig.6 Schematic of the experimental system

4.1 均匀光源光谱复原实验

利用搭建的实验装置对单色激光,窄带 LED 灯 和宽带白色 LED 灯进行了光谱复原,实验中采用均 匀光源照明,由于光源各点的光谱分布相同,因此获 取的单幅干涉图像即可复原出光源的光谱信息,不 需要对光源进行推扫。由于条件限制,实验获取的光 谱数据未进行光谱定标。经过干涉信息预处理,采用 Mertz 法校正相位后获取的单色激光复原光谱信息 如图 7 所示,其中图 7(a)为红绿激光的原始干涉信



图 7 实验获取的激光的干涉图像、复原激光光谱、红色 LED 灯光谱和蓝色 LED 灯光谱

Fig.7 Interferometric image of laser, recovery spectrum of the laser, recovery spectrum of red LED and recovery spectrum of blue LED

息,图 7(b)为红绿激光复原光谱信息,红激光波长为 650 nm,绿激光为 532 nm。对红色和蓝色窄带 LED 等进行光谱复原实验,复原得到的光谱信息如图 7 所示,其中图 7(c)为红色 LED 灯复原光谱,图 7(d) 为蓝色 LED 灯复原光谱。

4.2 光谱成像实验

利用搭建的实验装置对色卡进行了成像光谱实验。采用自然光源照明,目标如图 8 所示;推扫 2000 幅干涉图像,选取其中两幅如图 9(a)、(b)所示。



图 8 探测目标 Fig.8 Experimental target

提取每行物点的干涉信息,选取其中两幅如图9(c)、 (d)所示,图中干涉条纹具有较高的对比度。



图 9 实验系统获取的两幅干涉图像和提取的两列图像的干涉图像 Fig.9 Two interferometric images captured by the experiment setup and two extracted fringe patterns of two column of the scene

对目标选定区域惊醒了光谱复原,获取的三幅 复原光谱图如图 10 所示,,其中图(a)、(b)、(c)对应的 复原光谱波长为 622 nm、508 nm 和 415 nm。图中可 以看出复原光谱与色卡颜色对应。实验所用探测器 噪声较大,因此复原信息具有较大噪声。



图 10 图 8 选定区域复原的三个谱段的光谱图像 Fig.10 Three recovery spectral images of the recovery region in Fig.8

5 结 论

像面干涉成像光谱技术通过推扫获取探测目标 的一系列干涉图像,从中提取物点不同光程差的干 涉信息进行傅里叶变换复原光谱信息。文中介绍了 像面干涉成像光谱技术的基本原理,提出了内部推 扫的方法。与整体推扫方式相比,可以省去提取干涉 信息时图像配准的步骤,能够简化数据处理量,同时 干涉光程差不再受限于探测器靶面的影响,可以提 高复原光谱的分辨率。研究了干涉信息处理中预处 理问题,介绍了去除直流项方法、切趾作用以及相位 误差校正的三种方法,分析了三种方法的优缺点以 及适用的场合。搭建 Sagnac 型像面干涉成像光谱实 验装置,对半导体激光、窄带 LED 灯和宽带白色 LED 灯光源进行了光谱复原实验,得到了被测光源 的光谱。在自然光照明条件先,对仪色卡进行了光谱 成像实验,得到的实验结果与其光谱信息基本一致。

参考文献:

- Breckinridge J B. Evolution of imaging spectrometry: past, present and future[C]//SPIE, 1996, 2819: 121-132.
- [2] Cabib D, Buckwald R A, Garini Y, et al. Spatially resolved Fourier transform spectroscopy (spectral imaging): a powerful tool for quantitative analytical microscopy [C]//SPIE, 1996, 2678: 278-291.
- [3] Horton R F. Optical design for a high étendue imaging fourier transform spectrometer[C]//SPIE, 1996, 2819: 300-315.
- [4] Lucey P G, Horton K A, Williams T. Performance of a longwave infrared hyperspectral imager using a Sagnac interferometer and an uncooled microbolometer array [J]. Applied Optics, 2008, 47(28): F107-F113.
- [5] Barduccia A, Cosmob V D, Marcoionnic P, et al. ALISEO: a new stationary imaging interferometer [C]//SPIE, 2004, 5546: 262-270.

- [6] Dong Ying, Xiangli Bin, Zhao Baochang. Lateral shearing interferometer in large aperture static imaging spectrometer [J]. Acta Photonica Sinica, 1999, 28(11): 991-995. (in Chinese) 董瑛, 相里斌, 赵葆常. 大孔径静态干涉成象光谱仪中的 横向剪切干涉仪[J]. 光子学报, 1999, 28(11): 991-995.
- [7] Zhang Chunmin, Zhao Baochang, Xiangli Bin, et al. Analysis and calculation of throughput of the polarization interference imaging spectrometer [J]. Acta Optica Sinica, 2001, 21(9): 192-197. (in Chinese)
 张淳民,赵葆常,相里斌,等. 偏振干涉成像光谱仪通量的 分析与计算[J]. 光学学报, 2001, 21(9): 192-197.
- [8] Wang Guangbin, Liu Yilun, Jin Xiaohong, et al. Treatment of tendency part and its MATLAB accomplishment based on least square principle[J]. Non-Ferrous Metallurgical Equipment, 2005(5): 4-8. (in Chinese) 王广斌, 刘义伦, 金晓宏, 等. 基于最小二乘原理的趋势项 处理及其 Matlab 的实现[J]. 有色设备, 2005(5): 4-8.
- [9] Xu Xiaojing, Huang Wei. Application of spectral imaging in forensic science [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(12): 3280-3284. (in Chinese)
 徐小京,黄威.光谱成像技术在物证鉴定领域的应用[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(12): 3280-3284.
- [10] Huang Shike, Zhang Tianxu, Li Lijuan, et al. IR guiding technology based on multispectral imaging for air to air missile [J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 35(1): 16-20. (in Chinese) 黄士科,张天序,李丽娟,等. 多光谱红外成像制导技术研究[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(1): 16-20.
- [11] Xu Hong, Wang Xiangjun. Applications of multispectral/ hyperspectral imaging technology in military[J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(1): 13-17. (in Chinese) 许洪, 王向军. 多光谱、超光谱成像技术在军事上的应用 [J]. 红外与激光工程, 2007, 36(1): 13-17.
- [12] Chen Kuifu, Jiao Qunying, Gao Xiaorong. Window functions of spectrum peaking method [J]. Journal of China Agricultural University, 1997, 2(4): 21-27. (in Chinese) 陈奎孚, 焦群英, 高小榕. 谱峰法的窗函数的选择[J]. 中国 农业大学学报, 1997, 2(4): 21-27.
- [13] Mertz L. Auxiliary computation for fourier spectrometry [J]. Infrared Phys, 1967, 7: 17-23.
- [14] Froman M L, Steel W H, Vanasse G A. Correction of asymmetric interferograms obtained in fourier spectroscopy [J]. J Opt Soc Am,1966, 56: 59-63.