

两种干涉成像光谱技术方案的比较

相里斌¹, 吕群波¹, 黄 昱^{1,3}, 姚 涛^{2,3}

1. 中国科学院光电研究院, 北京 100080
2. 中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119
3. 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘要 对“大孔径静态干涉成像光谱技术”方案与以色列学者提出的“两维景物光谱同时测量方法”进行了分析和比较, 讨论了这2种干涉成像光谱技术方案中干涉仪与成像光学系统两方面的差异, 通过计算机模拟, 给出了“两维景物光谱同时测量方法”的光程差非线性变化。受“两维景物光谱同时测量方法”的启发, 提出基于横向剪切干涉仪的时间调制型干涉成像光谱技术方案, 研究了匀速转动横向剪切干涉仪时, 各不同视场像元处光程差的变化规律。

关键词 干涉成像光谱仪; Sagnac 干涉仪; 光程差

中图分类号: TP731 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2010)05-1422-05

引言

随着成像光谱技术的快速发展和应用, 干涉成像光谱仪已成为化学分析、生物研究、矿产调查、航天航空遥感等领域的重要探测手段, 其新型技术方案也层出不穷。20世纪90年代, 美国 Lawrence Livermore 国家实验室研究了基于迈克尔逊干涉仪的时间调制干涉成像光谱技术^[1], 与此同时, 美国空军资助对空间调制干涉成像光谱技术进行了研究^[2-6], 这种技术在光路一次像面处设置了入射狭缝, 虽然狭缝的形状不影响光谱分辨率, 但还是限制了光学系统的通量。为了同时获得高通量与高稳定性, 作者提出了大孔径静态干涉成像光谱技术(见: 相里斌的博士后研究工作总结报告, 中国科学院西安光学精密机械研究所, 1995)(large aperture static imaging spectrometer, LASIS), 在平行光路中设置横向剪切 Sagnac 干涉仪获得了时空联合调制干涉图; 以色列学者提出了两维景物光谱同时测量方法(Dario C, et al. US: 5539517, 1996) (method for simultaneously measuring the spectral intensity as a function of wavelength of all the pixels of a two dimensional scene, MSMSI), 在平行光路中设置变形 Sagnac 干涉仪, 通过机械扫描或平台扫描得到时空联合调制干涉图、通过旋转 Sagnac 干涉仪获得时间调制干涉图。由于基于 Sagnac 干涉仪的时空联合调制干涉成像光谱仪方案的简洁、高稳定、高灵敏度等特点, 国外一些学者也开展了对此类技术的研究^[7-12]。可以预计, 这类高稳定性、高灵敏度

的干涉成像光谱技术, 将成为高空间分辨率高光谱航天遥感领域的一个新的发展方向。

虽然国内外在此类技术研究方面纷纷提出相似的创新方案, 但不同方案有各自独到的思路。本文对 LASIS 和 MSMSI 两种表面上十分相像的方案进行研究, 在分析其差异的同时, 受 MSMSI 旋转干涉仪获取时间调制干涉图的启发, 提出基于 LASIS 方案的时间调制干涉成像光谱技术方案。

1 MSMSI 简介

MSMSI 由准直物镜、机械扫描机构、变形 Sagnac 干涉仪、成像镜和探测器等部分组成。其基本光路图如图1所示。

MSMSI 工作模式有2种: 一是通过机械扫描机构的扫描或者平台的扫描, 使得每一时刻, 探测器不同单元对应于景物不同物元, 由于不同视场角处具有不同光程差, 景物中任意物元扫过二维探测器后, 就得到完整干涉图, 由于这种模式需要相对扫描运动(即时间调制)、不同光程差又分布在不同视场处(即空间调制), 所以是“时空联合调制型”; 二是通过旋转 Sagnac 干涉仪产生光程差, 这种模式下, 探测器同一单元始终对应于景物同一物元, 随着干涉仪的旋转, 获得完整干涉图, 这种方式与基于迈克尔逊干涉仪的时间调制干涉成像光谱技术得到的干涉图相似, 但零光程差的位置不同, 同一物元不同光程差的干涉强度信息只由同一单元接收, 不是在探测器某一空间方向分布, 干涉图只随干涉仪的旋转而变化(即时间调制), 所以是“时间调制型”。MSMSI 的

收稿日期: 2009-05-10, 修订日期: 2009-08-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(60532070)和国家(973计划)项目(2009CB7240005)资助

作者简介: 相里斌, 1967年生, 中国科学院光电研究院研究员 e-mail: xiangli @opt.cn

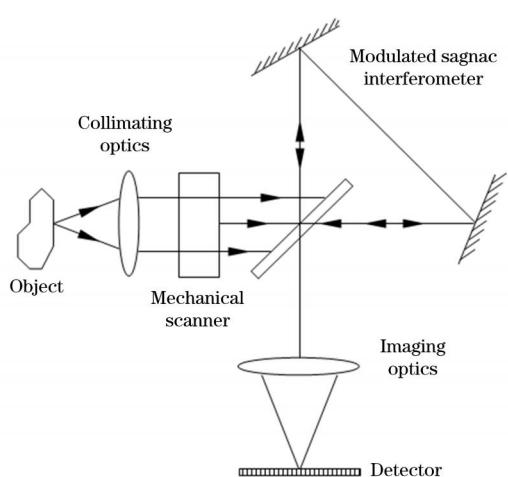


Fig 1 Optical principle schematic of MSMSI

光程差为^[8]

$$= dJ \sqrt{(n^2 - \sin^2(\alpha + \beta))} - \sqrt{(n^2 - \sin^2(\alpha - \beta))} + 2 \sin \alpha \sin J \quad (1)$$

其中， α 是 Sagnac 干涉仪的转角或者入射光线与光轴的夹角； β 是入射光线与分束板法线的夹角； d 是分束板厚度； n 是分束板折射率。当 J 较小时，上述公式可以简化为

$$= 2dsin J [1 - \sqrt{(n^2 - \sin^2 \alpha) \cos J}] \quad (2)$$

2 LASIS 简介

LASIS 由前置光学系统、横向剪切干涉仪、傅里叶镜成像系统、探测器等部分构成。如图 2 所示。

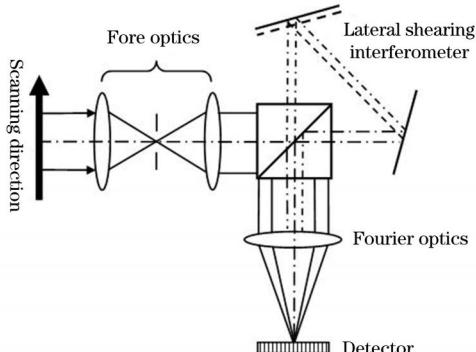


Fig 2 Optical principle schematic of LASIS

LASIS 内部没有运动部件。当景物与仪器之间发生相对运动时，探测器得到干涉图像，与 MSMSI 的“时空联合调制”模式相似，不同的是 MSMSI 依靠扫描机构完成干涉图获取，仪器整体与目标间不发生相对移动，而 LASIS 依靠仪器整体的推扫完成干涉图获取，仪器整体与目标间发生相对运动。

设傅里叶成像系统焦距为 f ，光束横向剪切量为 h 时，则探测器距零光程差位置 x 处的光程差为（参见相里斌的博士后报告，见上文）

$$= hx/f \quad (3)$$

3 MSMSI 与 LASIS 的差异分析

尽管 MSMSI 与 LASIS 的光学原理图看上去十分相似，但其光程差产生的机理不同，下面进行分析。

3.1 干涉仪的区别

MSMSI 的核心单元是变形 Sagnac 干涉仪，该干涉仪的分束板单面镀制分束膜、两反射镜关于分束膜对称，这一点可以根据(1)式得到证明，即当 $d=0$ 时，无论入射光线角度或者干涉仪转角为何，光程差恒为零，说明两反射镜关于分束膜对称。当入射光线进入 Sagnac 干涉仪，被分束膜分割为两束，一束沿顺时针方向传播，另一束沿逆时针方向传播，如图 3 所示。两束光在 Sagnac 干涉仪中传播时，由于在分束板中传播距离的差异，产生了如(1)式所示的光程差。

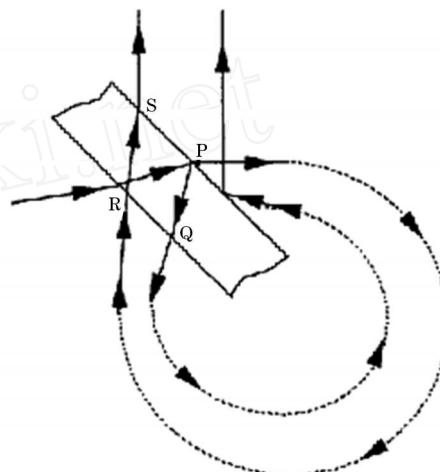


Fig 3 Beam splitting principle of interferometer in MSMSI

MSMSI 在目标全光程差获取过程中，干涉仪匀速旋转，角线性变化，因此光程差是非线性的，当 J 角很小时，可近似为线性。图 4 给出了 MSMSI 非线性光程差随 J 角变化的情况，图 5 给出非线性光程差随 J 角的变化量。

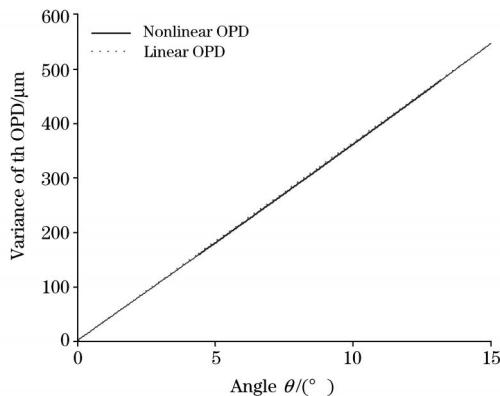


Fig 4 Relationship between OPD and angle

输入参数： $\alpha = 60^\circ$, $d = 2 \text{ mm}$, $n = 1.5$ ，当 J 角从 $0^\circ \sim 15^\circ$

变化时，光程差从0增加到540 μm，光程差非线性变化量最大达到3.5 μm。

此外，由于不同波长光的折射率不同，MSMSI的光程差还与折射率有关。当任选一种玻璃(K9)时，图6给出在几个角情况下，光程差非线性随波长的变化。

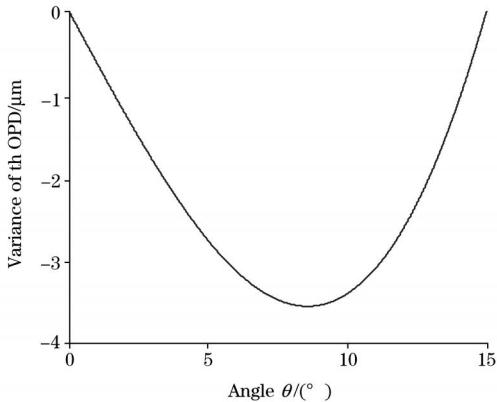


Fig 5 Variance of the OPD with the angle

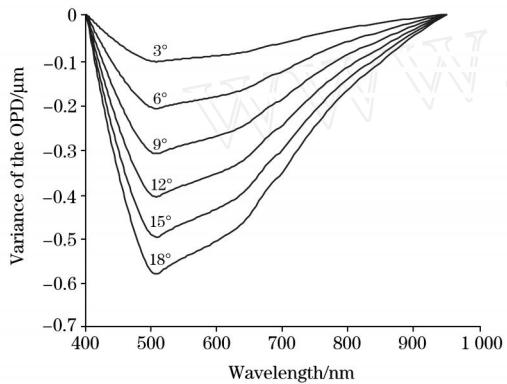


Fig 6 Nonlinear variance of the OPD with $n(\lambda)$

输入参数： $\theta = 60^\circ$, $d = 2 \text{ mm}$ ，当角按 $3^\circ, 6^\circ, 9^\circ, 12^\circ, 15^\circ, 18^\circ$ 变化时，光程差随波长的非线性变化量最大达到 $0.6 \mu\text{m}$ ($= 18\%$)。

在SMSMI中，如果要更换其他形式的干涉仪，必须重新设计计算光程差。

另一方面，LASIS采用横向剪切干涉仪，图示采用了Sagnac横切干涉仪，其分束板关于分光膜对称、两反射镜之一偏置对称位置，此时，入射光线进入干涉仪后的传播如图7所示。

当入射光线与光轴夹角为 θ 时，两出射光线被沿垂直光轴方向剪切，剪切量为 h 。从图4得到，两光线的光程差为

$$= h \sin \theta \quad (4)$$

3.2 成像光学系统的区别

文献[7]并未明确MSMSI采用何种成像光学系统，但研究其简化的光程差公式可以发现，没有考虑 $\sin \theta$ 与 $\tan \theta$ 的区别。

LASIS的成像光学系统采用了傅里叶镜成像系统，主要是为了与横向剪切Sagnac干涉仪所产生的光程差相匹配，

以保证光程差与探测器不同像元位置的线性关系。根据傅里叶镜成像系统的性质，其像高与焦距之比与视场角的关系为

$$\sin \theta = x/f \quad (5)$$

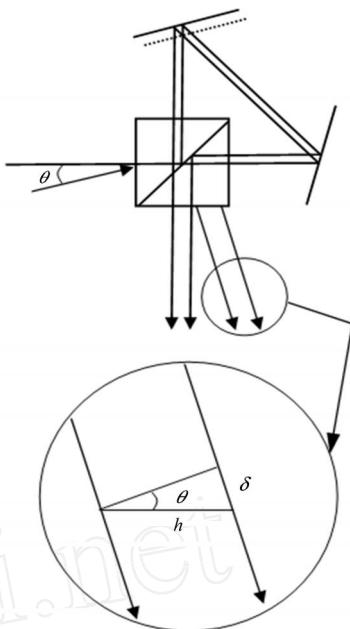


Fig 7 Lateral shearing principle of Sagnac interferometer in LASIS

将此式代入(4)式，就得到(3)式所示光程差的线性表达式。

若采用普通成像系统，则有

$$\tan \theta = x/f \quad (6)$$

此时光程差公式变为

$$= h \cos \theta / f \quad (7)$$

可见光程差成为非线性表达，对复原光谱会产生较大影响，这是LASIS成像光学系统采用傅里叶镜的主要原因。

在LASIS中，横向剪切干涉仪可以是Sagnac横切干涉仪，也可以是Michelson横切干涉仪、Savart棱镜、M-Z横切干涉仪等，只需确定干涉仪的横向剪切量，其光程差表达式都是一样的，显然，这比SMSMI简洁明了。

可见，MSMSI与LASIS在分光干涉仪和成像光学系统两个主要环节上都有区别，LASIS巧妙应用横向剪切干涉仪与傅里叶成像镜的配合，实现了光程差的线性表达。这一点继承了空间调制干涉成像光谱技术的优点^[3, 4]。

4 一种时间调制型干涉成像光谱技术

MSMSI通过旋转Sagnac干涉仪得到时间调制干涉图的工作模式，同样可以应用于基于横向剪切干涉仪的LASIS中。此时景物与仪器之间保持相对静止，通过转动横向剪切干涉仪完成干涉图扫描，探测器各单元与景物各物元间的对应关系不变，随着横向剪切干涉仪的旋转，各单元的光程差发生变化，各单元的初始光程差为 $h \sin \theta_j$ ，其中 j 为干涉仪处于初始位置时(如图8所示)各单元所处的视场角。当横向剪切干涉仪旋转角度 α 时， j 单元的光程差为

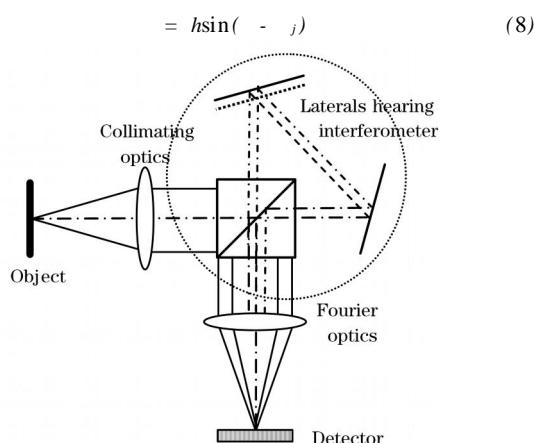


Fig 8 Time modulated Fourier transform imaging spectrometer with rotated lateral shearing interferometer

当横向剪切干涉仪匀速转动角速度为 ω ，旋转横向剪切干涉仪的时间调制干涉成像光谱仪光程差为

$$j = h \sin(-\omega t - \phi_j) \quad (9)$$

可见，当匀速转动干涉仪、等时间间隔采样时，干涉图是不等光程差间隔采样的，复原光谱时应考虑这一非线性影响。

设 $h = 1 \text{ mm}$, $\omega = 2 \pi \text{ rad/s}$, 为研究双边视场中各单元的光程差变化情况，令 t 从 $-5 \text{ s} \sim +5 \text{ s}$ 变化，不同视场 j 单元($\phi_j = -5^\circ, -4^\circ, -3^\circ, -2^\circ, -1^\circ, 0^\circ, 1^\circ, 2^\circ, 3^\circ, 4^\circ, 5^\circ$)光程差及其非线性变化情况如下图所示。

图9表示的上述11个视场的光程差变化范围不同，当

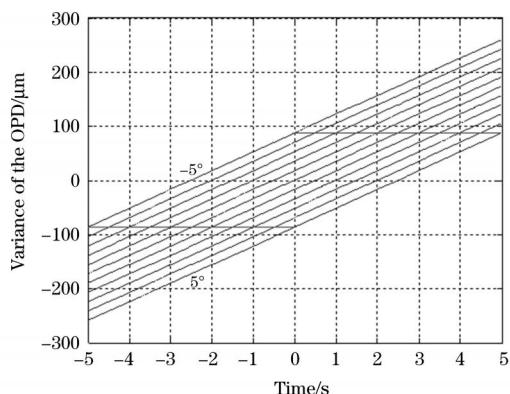


Fig 9 OPD of different field of view

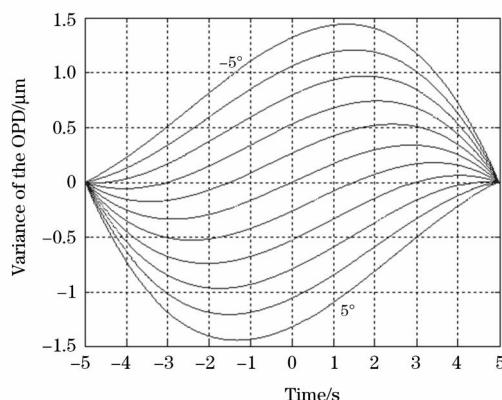


Fig 10 Nonlinear variance of OPD at different field of view

各单元干涉图按双边采样时，图中形成一个平行四边形，表示了双边干涉图的起始与终止时间，复原光谱之前应按此规律重新排列；图10所示为光程差的非线性，即光程差曲线与其两端点连线之差，自上到下分别对应 ϕ_j 从 $-5^\circ \sim +5^\circ$ ，最大偏差约为 $\pm 1.5 \mu\text{m}$ 。一般地，当 ϕ_j 的值越大时，非线性越严重。

5 结 论

本文首先对作者提出的 LASIS 方案与以色列学者提出的 MSMSI 的光学系统进行了分析比较，发现 2 种方法使用的干涉仪不同，LASIS 使用了横向剪切干涉仪，依靠剪切量产生光程差；而 MSMSI 使用了一种变形 Sagnac 干涉仪，依靠光线在分束板中不同传输距离产生光程差。在成像光学系统方面，LASIS 采用了傅里叶镜成像系统，与横向剪切干涉仪配合，得到了线性光程差；而 MSMSI 的光程差是非线性的，随不同视场角和不同波长折射率变化。由于在所研究的方案中，主要采用了 Sagnac 型横向干涉仪，从形式上看与 MSMSI 相似，但实际上 LASIS 方案中的横向干涉仪可以更换为 M-Z 型、Michelson 型、Savart 型等等，其物理模型是相同的；而 MSMSI 若更换干涉仪，则需要重新设计。

最后，受 MSMSI 旋转干涉仪获得时间调制干涉图的启发，提出一种旋转横向剪切干涉仪的时间调制干涉成像光谱技术方案，该方案稳定性高、可实现高速探测。研究了匀速转动横向剪切干涉仪时，各不同视场像元的光程差变化规律，推导了光程差计算公式，给出了计算机模拟结果。

参 考 文 献

- [1] Bennett C L, Carter M, Fields D, et al. SPIE, 1993, 1937: 191.
- [2] Hammer P D, Valero F P J, Peterson D L. SPIE, 1993, 1937: 244.
- [3] Rafert J B, Sellar R G, Blatt J H. Appl. Opt., 1995, 34(31): 7228.
- [4] Rafert J B, Sellar R G. SPIE, 1995, 2480: 410.
- [5] XIANGLI Bin, ZHAO Baochang, XUE Mingqiu(相里斌, 赵葆常, 薛鸣球). Acta Optica Sinica(光学学报), 1998, 18(1): 16.
- [6] Xiangli B, Gao Z, An B Q. SPIE, 1998, 3502: 30.
- [7] Slough W J, Rafert J B, Rohde C A, et al. SPIE, 1998, 3393: 207.

- [8] Wilson A J , Rafert J B. International Symposium on Spectral Sensing Research , 2003.
- [9] Marcoionni P. Proceedings of the Youth Forum , ISPRS Congress Istanbul , 2004.
- [10] Sellar R G, Branly R , Ayala A I, et al. 38th Space Congress , 2001.
- [11] Harnisch B , Posselt W , Holota K, et al. Acta Astronautica , 2003 , 52 : 803.
- [12] Minnett P J , Sellar R G. 8th Conference on Polar Meteorology and Oceanography , 2005.

Comparison of Two Types of Fourier Transform Imaging Spectrometry

XIAN GLI Bin¹ , L Ü Qun-bo¹ , HUANG Min^{1,3} , YAO Tao^{2,3}

1. Academy of Opto-Electronics , Chinese Academy of Sciences , Beijing 100080 , China

2. Xi 'an Institute of Optics and Precision Mechanics , Chinese Academy of Sciences , Xi 'an 710119 , China

3. Graduate University of Chinese Academy of Sciences , Beijing 100049 , China

Abstract The comparison between "large aperture static imaging spectrometry (LASIS) " designed by author and " method for simultaneously measuring the spectral intensity as a function of wavelength of all the pixels of a two dimensional scene " (MSMSI) designed by Israeli researchers is given. The difference of the interferometers and imaging systems in LASIS and MSMSI is discussed. The nonlinear curve of optical path difference of MSMSI is simulated. Inspired by the operation of MSMSI, the time modulated Fourier transform imaging spectrometry based on lateral shearing interferometer was presented. The optical path differences of different field of view were given under the condition of regularly rotating the lateral shearing interferometer.

Keywords Fourier transform imaging spectrometer ; Sagnac interferometer ; Optical path difference

(Received May 10 , 2009 ; accepted Aug. 20 , 2009)