

文章编号: 0253-2239(2008)03-0583-04

姿态倾斜对时-空联合调制型干涉成像光谱仪 成像质量的影响

赵慧洁 贾国瑞

(北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100083)

摘要 时-空联合调制型干涉成像光谱仪获取的像面干涉图是带有干涉条纹的二维空间图像, 具有对姿态变化敏感的特点。根据该类仪器的成像过程, 在竖直摄影时, 相邻两帧像面干涉图之间的像移量为一列像元; 偏离竖直摄影时, 由于像面干涉图的几何变形或旋转, 会引入非正常像移。利用共线方程导出了这一非正常像移量的表达式。利用仿真计算说明: 这一非正常像移会在像面干涉图序列中不断积累, 导致提取出的物体干涉信息失真。在竖直摄影而平台指向精度较低、倾斜摄影、探测器阵列的安装方向精度较低或者航空成像且存在偏流角时, 必须对像面干涉图进行有效校正, 才能保证最终反演出的物体光谱的真实性。

关键词 光谱学; 干涉成像光谱仪; 姿态倾斜; 共线方程; 时-空联合调制型; 像移

中图分类号 TH744.1 **文献标识码** A

Effect of Oblique Attitude on Image Quality of Spatio-Temporally Modulated Imaging Fourier Transform Spectrometers

Zhao Huijie Jia Guorui

(School of Instrument Science & Opto-Electronics Engineering, Beijing University of Aeronautics & Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract The spatio-temporally modulated imaging Fourier transform spectrometers obtain two-dimensional spatial images modulated by interference pattern, and are sensitive to the change of attitude. According to the imaging principle of these instruments, image motion between two interference images should be one column of pixels when the instruments are in a vertical attitude, and abnormal image motion would arise because of geometric distortion and rotation of the interference images when an attitude incline exists. The expression of the abnormal image motion was deduced from the collinear equation. It was proved by numeric simulation that the abnormal image motion would accumulate in the interference image series and would make the objects' interference pattern distorted. The interference images should be corrected to ensure the reality of the restored spectra in one of the following cases: vertical photography with platform of low pointing accuracy, oblique photography, low orientation accuracy of detector array, and aerial photography with a drift angle.

Key words spectroscopy; imaging Fourier transform spectrometer; oblique attitude; collinear equation; spatio-temporally modulated; image motion

1 引 言

时-空联合调制型干涉成像光谱仪是一类新型傅里叶变换成像光谱仪^[1~4], 其获取的数据是带有干涉条纹的二维空间图像, 称为“像面干涉图”。要得到物体的光谱信息, 需要利用仪器的运动对物体

进行全像面的扫描成像, 从获得的像面干涉图序列中提取该物体的干涉曲线, 然后进行傅里叶变换得到光谱曲线。由于物点的干涉信息由面阵探测器的一行记录, 该类仪器一般被归入空间调制型干涉成像光谱仪^[5,6]的范畴; 由于物点的干涉信息不是在

收稿日期: 2007-06-11; 收到修改稿日期: 2007-09-07

作者简介: 赵慧洁(1966—), 女, 辽宁沈阳人, 教授, 博士生导师, 主要从事光电检测方面的研究。

E-mail: hjzhao@buaa.edu.cn

同一瞬时获得,该类仪器又具有时间调制型干涉成像光谱仪^[7~9]对平台姿态变化敏感的特点。

为获得物体的真实光谱信息,详细分析平台姿态对该类仪器成像质量的影响,进而进行精确校正是十分必要的。余成伟等利用简化的大孔径静态干涉成像光谱仪(LASIS)干涉成像模型,分析了竖直摄影时卫星姿态抖动在像面干涉图上造成的像素位移量^[10]。当平台的姿态指向精度较低或者用于侧视成像时,该类仪器将出现姿态倾斜而偏离竖直摄影状态。对时-空联合调制型干涉成像光谱仪偏离竖直摄影时的成像进行分析,利用共线方程导出相邻两帧像面干涉图之间的非正常像移量,并通过仿真计算分析其在像面干涉图序列中的积累情况,从而为该类数据的光谱信息恢复提供参考。

2 理论推导

时-空联合调制型干涉成像光谱仪通过一个逐列推扫的过程获取物点的光谱信息(图 1^[11])。仪器对物点干涉信息的获取是在一段时间内分时完成的。竖直摄影时,图像与物体相似,在相邻两帧像面干涉图之间,像点的正常位移量为一系列像元。当偏离竖直摄影,即俯仰、滚动、偏航三个姿态角不为零时,图像相对于物体存在几何变形,其中俯仰角造成沿轨方向的梯形失真,滚动角造成交轨方向的梯形失真,偏航角造成像面相对于某中心的旋转^[12]。由于图像上不同位置的几何变形量不同,当像点在像面干涉图序列中横穿整个像面时,就会产生附加的非正常像移,造成像面干涉图之间的不匹配。这一非正常像移在像面干涉图序列中不断积累,将有可能导致直接提取的干涉曲线不能真实地反映物点的干涉信息,从而无法恢复出该物点的真实光谱。

与框幅式相机相同,这一类仪器成像时物点和对应像点之间的位置关系可以用中心投影的共线方程表示。首先在物方和像方分别建立坐标系(如图 2)。

物空间坐标系 $O-XYZ$, 原点 O 可在地面上任意选定, Z 轴竖直向上, X 轴指向航线参考方向, 构成右手系。

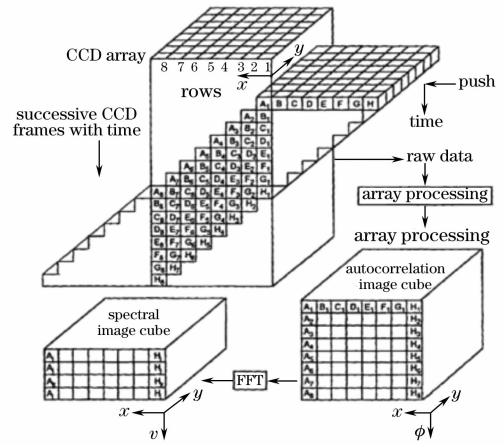


图 1 从像面干涉图序列获取物点光谱信息
Fig. 1 Object spectra acquisition from the interference image series on the image plane

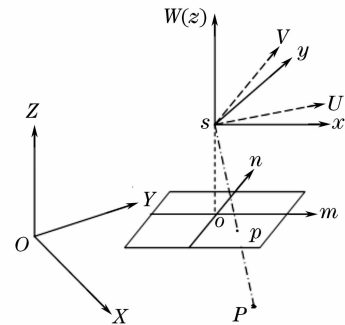


图 2 中心投影成像的物像对应关系
Fig. 2 Schematic diagram of object-image correspondence of the central projection imaging

像空间辅助坐标系 $S-UVW$, 原点 S 取为仪器成像投影中心, U 轴指向平台飞行方向, V 轴水平向左, W 轴竖直向上, 构成右手系。

像空间坐标系 $S-xyz$, x 、 y 轴分别与像面 CCD 两边缘方向平行, 并且 x 轴靠近飞行方向, z 轴与像面垂直, 构成右手系。

像平面坐标系 $o-mn$, 其原点为像主点, m 轴、 n 轴分别与 x 轴、 y 轴平行。

设物点 P 在物空间坐标系中的坐标为 (X_P, Y_P, Z_P) , 成像投影中心在物空间坐标系中的坐标为 (X_S, Y_S, Z_S) , 仪器姿态角为 φ, ω, κ , 仪器等效焦距为 f , 则对应像点在像空间坐标系中的坐标 $(x, y, -f)$ 满足(1)式^[12]:

$$\begin{aligned} x &= -f \frac{a_{11}(X_P - X_S) + a_{21}(Y_P - Y_S) + a_{31}(Z_P - Z_S)}{a_{13}(X_P - X_S) + a_{23}(Y_P - Y_S) + a_{33}(Z_P - Z_S)}, \\ y &= -f \frac{a_{12}(X_P - X_S) + a_{22}(Y_P - Y_S) + a_{32}(Z_P - Z_S)}{a_{13}(X_P - X_S) + a_{23}(Y_P - Y_S) + a_{33}(Z_P - Z_S)}, \end{aligned} \tag{1}$$

其中

$$\begin{aligned} a_{11} &= \cos \varphi \cos \kappa - \sin \varphi \sin \omega \sin \kappa, \\ a_{12} &= -\cos \varphi \sin \kappa - \sin \varphi \sin \omega \cos \kappa, \\ a_{13} &= -\sin \varphi \cos \omega, \\ a_{21} &= \cos \omega \sin \kappa, \\ a_{22} &= \cos \omega \cos \kappa, \\ a_{23} &= -\sin \omega, \\ a_{31} &= \sin \varphi \cos \kappa + \cos \varphi \sin \omega \sin \kappa, \\ a_{32} &= -\sin \varphi \sin \kappa + \cos \varphi \sin \omega \cos \kappa, \\ a_{33} &= \cos \varphi \cos \omega, \end{aligned}$$

将 $\varphi = \omega = \kappa = 0$ 代入, 得到竖直摄影时物点 P 的像点坐标

$$x_0 = -f \frac{X_P - X_S}{Z_P - Z_S}, \quad y_0 = -f \frac{Y_P - Y_S}{Z_P - Z_S},$$

再将其代入(1)式, 得到用竖直摄影时像点坐标和姿态角表示的偏离竖直摄影时的像点坐标

$$\begin{aligned} x &= -f \frac{a_{11}x_0 + a_{21}y_0 - a_{31}f}{a_{13}x_0 + a_{23}y_0 - a_{33}f}, \\ y &= -f \frac{a_{12}x_0 + a_{22}y_0 - a_{32}f}{a_{13}x_0 + a_{23}y_0 - a_{33}f}. \end{aligned}$$

设 CCD 像元大小为 d , 则物点 P 在下一帧中的理论像点坐标为 $(x_0 - d, y_0, -f)$, 代入上式可得到偏离竖直摄影时的像点坐标, 从而得到偏离竖直摄影时物点 P 在相邻两帧中的像移量

$$\begin{aligned} \Delta x &= f \frac{a_{11}x_0 + a_{21}y_0 - a_{31}f}{a_{13}x_0 + a_{23}y_0 - a_{33}f} - \\ & f \frac{a_{11}(x_0 - d) + a_{21}y_0 - a_{31}f}{a_{13}(x_0 - d) + a_{23}y_0 - a_{33}f}, \\ \Delta y &= f \frac{a_{12}x_0 + a_{22}y_0 - a_{32}f}{a_{13}x_0 + a_{23}y_0 - a_{33}f} - \\ & f \frac{a_{12}(x_0 - d) + a_{22}y_0 - a_{32}f}{a_{13}(x_0 - d) + a_{23}y_0 - a_{33}f}, \end{aligned} \quad (2)$$

一般情况下, $\Delta x = -d$ 和 $\Delta y = 0$ 不能同时严格成立, 即偏离竖直摄影时的姿态角会造成非正常像移。

根据像平面坐标与像空间坐标之间的对应关系, 可以得到以像元为单位的非正常像移量的大小

$$\Delta m = \frac{\Delta x}{d} + 1, \quad \Delta n = \frac{\Delta y}{d}. \quad (3)$$

3 仿真计算

以下针对仅存在单一方向姿态角的情况取具体数值进行仿真计算。设系统焦距 $f = 157 \text{ mm}$, CCD 面阵 $512 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$, 像元尺寸 $d = 10 \text{ } \mu\text{m}$ 。

3.1 仅存在俯仰角 φ , 即 $\omega = \kappa = 0$ 时

$$\begin{aligned} \Delta m &= \frac{f}{d} \left[\frac{(m_0 - 1) \cos \varphi - (f/d) \sin \varphi}{(m_0 - 1) \sin \varphi + (f/d) \cos \varphi} - \right. \\ & \left. \frac{m_0 \cos \varphi - (f/d) \sin \varphi}{m_0 \sin \varphi + (f/d) \cos \varphi} \right] + 1, \\ \Delta n &= \frac{f}{d} \left[\frac{n_0}{(m_0 - 1) \sin \varphi + (f/d) \cos \varphi} - \right. \\ & \left. \frac{n_0}{m_0 \sin \varphi + (f/d) \cos \varphi} \right], \end{aligned}$$

可见, 非正常像移量的大小与俯仰角大小和像元位置有关; 在 φ 取定时, Δn 绝对值与 n_0 成正比。表 1 给出了 $n_0 = 256$ 时相邻两帧非正常像移量在 512 幅像面干涉图中的最大值 (Δm_{\max} 、 Δn_{\max}) 和累积量 (Δm_{sum} 、 Δn_{sum}) 随 φ 变化的情况 (其中的正负号表示方向)。可见, 随着 φ 的增大, Δm_{\max} 、 Δn_{\max} 以及 Δm_{sum} 、 Δn_{sum} 都逐渐增大。相对于竖直摄影, 俯仰角由 0.1° 增大到 1° , 会导致提取出的干涉曲线两端点对应的地物面积匹配度由 98% 下降到 72%; 俯仰角为 10° 时, 虽然相邻两帧的非正常像移仍然很小, 但是提取出的干涉曲线两端点对应的地物早已完全不同。因此, 在俯仰角指向精度较低或者前后向倾斜摄影时, 必须采取有效的像面干涉图校正方法, 以保证反演地物光谱的真实性。

表 1 非正常像移量在 512 幅像面干涉图中的最大值和累积量

Table 1 Maximum and summation of the abnormal image motion in 512 frames of interference image

$\Phi / (^\circ)$	Δm_{\max}	Δn_{\max}	Δm_{sum}	Δn_{sum}
0.1	-6.01×10^{-5}	2.85×10^{-5}	-0.0016	0.0146
1	-8.75×10^{-4}	2.85×10^{-4}	-0.157	0.146
10	-3.71×10^{-2}	2.94×10^{-3}	-16.0	1.50

3.2 仅存在滚动角 ω , 即 $\varphi = \kappa = 0$ 时

$$\Delta m = 1 - \frac{f}{d} \frac{1}{n_0 \sin \omega + (f/d) \cos \omega}, \quad \Delta n = 0,$$

由上式可见, 滚动角在 n 方向不造成非正常像移, Δm 也只与像元纵坐标有关。经计算, 512 幅像面干涉图的非正常像移累积量的最大值在 $n_0 = -256$ 处取得, 并随着 ω 的增大而增大。滚动角为 1° 时, 提取出的干涉曲线两端点对应的地物面积匹配度仅能达到 77%。因此, 在滚动角指向精度较低或者侧向倾斜摄影时, 必须采取有效的像面干涉图校正方法, 以保证反演地物光谱的真实性。

3.3 仅存在偏航角 κ , 即 $\varphi = \omega = 0$ 时

探测器阵列与航线参考方向之间的夹角 κ 可以分解为两部分——探测器阵列与飞行方向之间的夹

角和飞行方向与航线参考方向之间的夹角。后者并不会在像面干涉图序列中引入非正常像移,前者引入的非正常像移量可由(2)式、(3)式推出

$$\Delta m = 1 - \cos \kappa, \quad \Delta n = \sin \kappa,$$

可见,偏航角(主要指探测器阵列安装方向误差角,在航空成像中还包括飞机偏流角)造成的非正常像移与像元位置无关。经计算,0.001°的偏航角即使提取出的干涉曲线两端点对应的地物面积匹配度下降到49%以下。因此,该类仪器对探测器阵列的安装方向精度要求较高;在航空成像且存在偏流角时,必须采取有效的像面干涉图校正方法,以保证反演地物光谱的真实性。

4 结 论

由于对物体干涉信息的分时获取,时-空联合调制型干涉成像光谱仪具有对平台姿态变化敏感的特点。竖直摄影时,像点在像面干涉图之间只存在等距离的平移;偏离竖直摄影时,平台姿态角会在像面干涉图之间引入非正常像移。仿真计算表明,俯仰角引起的非正常像移反映了像面干涉图在交轨和沿轨两个方向上的几何变形,滚动角引起的非正常像移反映了像面干涉图在沿轨方向上的几何变形,偏航角引起的非正常像移反映了像面干涉图之间的相对旋转。并且这些非正常像移会在像面干涉图序列中不断积累,导致从中提取的物点干涉曲线失真。总的来说,姿态倾斜通过改变像面干涉图的几何关系而最终影响到复原光谱的质量。

在实际应用中,三个姿态角对像面干涉图产生的影响往往同时存在,从而引入复杂的非正常像移。为保证真实地提取物体的干涉信息进而反演光谱,需首先对像面干涉图进行姿态影响校正。如何在校正像面干涉图几何变形的同时尽可能保护干涉信息不受影响,将作为下一步研究工作的内容。

参 考 文 献

- 1 Richard F. Horton. Optical design for a high Étendue imaging Fourier transform spectrometer[C]. *Proc. SPIE*, 1996, **2819**: 300~315
- 2 Xiangli Bin, Zhao Baochang, Xue Mingqiu. Light high-sensitivity imaging Fourier transform spectrometer[J]. *863 Astronautic technology newsletters*, 1999, **13**(10): 1~15
相里斌,赵葆常,薛鸣球. 轻型高灵敏度干涉成像光谱仪[J]. *863 航天技术通讯*, 1999, **13**(10): 1~15
- 3 Barham W. Smith, Bryan Laubscher, Bradly Cooke *et al.*. IRISHS, the infrared imaging spatial heterodyne spectrometer; a new pushbroom Fourier transform ultraspectral imager with no moving parts[C]. *Proc. SPIE*, 1999, **3698**: 501~509
- 4 Peter J. Minnett, R. Glenn Sellar. The high efficiency hyperspectral imager—a new instrument for measurements of the arctic surface[C]. *8th Conference on Polar Meteorology and Oceanography*, Boston: American Meteorological Society, 2005
- 5 W. H. Smith, P. D. Hammer. Digital array scanned interferometer: Sensors and results[J]. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(16): 2902~2909
- 6 Xiangli Bin, Zhao Baochang, Xue Mingqiu. Spatially modulated imaging interferometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, **18**(1): 16~22
相里斌,赵葆常,薛鸣球. 空间调制干涉成像光谱技术[J]. *光学学报*, 1998, **18**(1): 16~22
- 7 M. R. Carter, C. L. Bennett, D. J. Fields *et al.*. Livermore imaging Fourier transform infrared spectrometer (LIFTIRS)[C]. *Proc. SPIE*, 1995, **2480**: 380~386
- 8 Zhang Wenxi, Xiangli Bin, Yuan Yan *et al.*. Ultra-rapid-scanning imaging interferometer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(8): 1153~1155
张文喜,相里斌,袁 艳等. 高速转镜干涉成像光谱仪[J]. *光子学报*, 2006, **35**(8): 1153~1155
- 9 Jian Xiaohua, Zhang Chunmin, Sun Yao *et al.*. Novel polarization interference imaging spectrometer with adjustable lateral displacement Savart polariscope[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(4): 643~646
简小华,张淳民,孙 尧等. 一种可调横向剪切量的新型偏振干涉成像光谱仪[J]. *光学学报*, 2007, **27**(4): 643~646
- 10 Yu Chengwei, Chen Derong, Yang Jianfeng *et al.*. Influence of satellite attitude jitter on LASIS imaging quality [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2004, **31**(5): 4~6
余成伟,谌德荣,杨建峰等. 卫星姿态抖动对 LASIS 成像质量的影响[J]. *光电工程*, 2004, **31**(5): 4~6
- 11 Richard F. Horton, Tony Byers, Chris Conger *et al.*. HEIFTS phase II—laboratory and advanced simulation results [C]. *Proc. SPIE*, 2000, **4132**: 195~205
- 12 Sun Jiabing. *Principles and Applications of Remote Sensing* [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2003. 98~100, 107~108
孙家柄. *遥感原理与应用*[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2003. 98~100, 107~108