

文章编号: 1007-4619 (2004)01-0063-05

Sagnac 型干涉成像光谱仪外场干涉成像光谱实验

金锡哲¹, 禹秉熙²

(1. 大连大学 物理系, 辽宁 大连 116622; 2. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130022)

摘要: 空间调制干涉成像(傅里叶变换)光谱仪(SMIFTS)是一种有重要的研究和应用价值的空间传感器。该文介绍了研制的 Sagnac 型干涉成像(傅里叶变换)光谱仪原理样机及用该样机进行的外场干涉成像光谱实验。实验获取了可见光、近红外波段干涉成像图像。对其中各像元的干涉图进行数据处理和计算, 提取出了光谱特征明显突出的外场干涉成像光谱图像和与被测目标光谱特征相符的像元光谱。

关键词: 遥感; 可见近红外; Sagnac 型干涉成像光谱仪原理样机; 外场干涉成像光谱实验

中图分类号: TP732.2 **文献标识码:** A

1 引言

依据阵列探测器扫描的空间调制型干涉成像(傅里叶变换)光谱仪(SMIFTS)是在 20 世纪 80 年代末开始引起人们重视、具有重要的研究和应用价值的新一代空间光学遥感器。近年来, 干涉成像光谱方法和技术在遥感领域中得到迅速发展, 正逐步成

为以高分辨率遥感探测红外和可见弱辐射的强有力工具, 将在未来的机载和星载遥感探测任务中起重要作用。

2 基本原理^[1-6]

Sagnac 型干涉成像光谱仪的光学结构如图 1。由前置光学系统将被测物聚焦于入射狭缝处, 入射

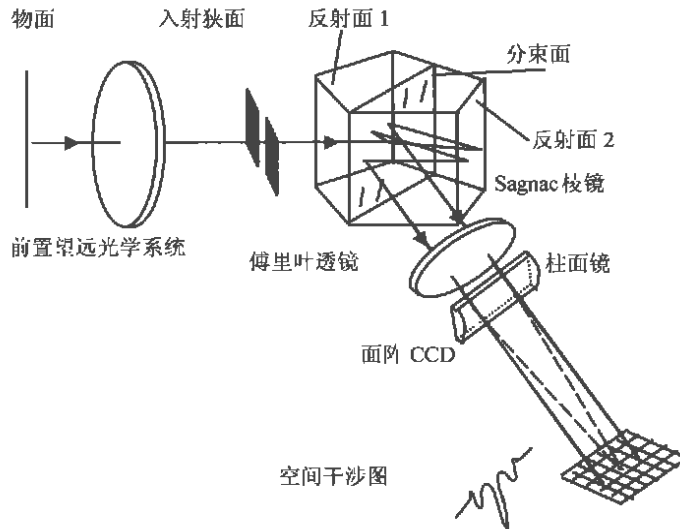


图 1 Sagnac 型成像干涉光谱仪原理图

Fig. 1 Schematic diagram of the Sagnac type IFTS

收稿日期: 2001-05-29; 修订日期: 2003-03-10

作者简介: 金锡哲(1964-), 男, 朝鲜族, 吉林省敦化市人, 博士, 现任大连大学物理系教授, 主要从事光学遥感技术及光电技术研究。
(C) 1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

狭缝出射的光经分束面分束成反射光和透射光,再经两个反射面反射及分束面反射或透射后入射到傅里叶透镜上。当两个反射面相对于分束面完全对称时,无程差存在,故亦无干涉效应,而当其不对称时,两束光产生光程差,经傅里叶透镜后形成干涉。由于光路设置使入射狭缝置于傅里叶透镜的前焦面处,故此时相对于光轴向两边分开的两束光,对傅里叶透镜而言相当于两个虚物点。由虚物点发出的光束经傅里叶透镜后变成平行光,在探测器处合束产生干涉,在距干涉图零光程差点 x 处,所得到的干涉图为:

$$I = I_0 + I_0 \cos[(2\pi/\lambda)lx/f'] \quad (1)$$

式中, l 为分束器两反射面之一相对于对称位置的偏移量, f' 为傅里叶变换透镜的焦距。

对上式进一步处理和傅里叶变换即得到光源上每一像元的光谱图。有关的原理内容在很多文献中已有详细的推导,这里不拟赘述。

3 信噪比方程^[7]

信噪比 SNR 是表征遥感器性能的重要指标。信噪比方程是根据应用任务要求来确定仪器性能指标、制定技术途径和方案的基本依据。

在地物反射太阳辐射的光谱范围(0.4—2.5 μm),地物本身的热辐射可以忽略。视地物为具有漫反射特性的 Lambert 体,并设其对 λ 波长辐射的反射率为 $\rho(\lambda)$ 。太阳辐射到地面的 λ 波长的辐照度为 $E(\lambda)$ (该辐照度由两部分构成:太阳直射光 $E_{\text{sol}}(\lambda)$ 和天空漫射光 $E_{\text{sky}}(\lambda)$),可由 LOWTRAN 7 或 6S 等大气辐射传输代码计算出来)。

以 Sagnac 型干涉成像光谱仪在机载平台对地观测的情况进行考虑。参照图 1 再设:光谱仪前置望远系统焦距为 f ,孔径为 D ,光谱透过率为 $\tau_0(\lambda)$;沿目标-遥感器路径的大气光谱透过率为 $\tau_a(\lambda)$ 。探测器的阵元宽度和高度分别为 d_1 和 d_2 ,阵元的光敏面积为 $A_D(A_D = d_1 d_2)$ 。分束面的反射率和透射率分别为 $R_s(\lambda)$ 和 $T_s(\lambda)$,两反射面的反射率为 $R_{M1}(\lambda)$ 和 $R_{M2}(\lambda)$ (可设 $R_{M1}(\lambda) = R_{M2}(\lambda) = R_M(\lambda)$),傅里叶透镜和成像柱面镜的透射率分别为 $T_f(\lambda)$ 和 $T_c(\lambda)$ 。单边干涉图采样点数为 N 。探测器的光谱比探测率为 $D^*(\lambda)$,信号过程因子 $\eta_e = 3/4$ ^[7]。 $\Delta\lambda$, λ_L 和 λ_H 分别为谱域带宽,波长下限和波长上限。则系统在谱域(0.4—1.0 μm)的理论平均信噪比可表示为:

$$\begin{aligned} \text{SNR} = & [\lambda_H^2 \eta_e \sqrt{2A_D \tau_d} / (\Delta\lambda \lambda_L f^2 \sqrt{N}) (D/2)^2 \\ & \times \int_{400}^{1000} R_M^2(\lambda) T_f(\lambda) T_c(\lambda) E(\lambda) \rho(\lambda) \\ & \times D^*(\lambda) \tau_0(\lambda) \tau_a(\lambda) [R_s(\lambda) \\ & + T_s(\lambda)]^2 d\lambda \end{aligned} \quad (2)$$

其中,探测器的积分时间为:

$$\tau_d = 1/\nu = \alpha H/V = S/V \quad (3)$$

式中, ν 为面阵探测器帧扫描频率, V/H 为速高比(H 为平台高度, V 为飞行速度), S 为地面像元分辨率。 $\alpha = S/H$ 为纵向瞬时视场角。更为完整的讨论请详见参考文献[7]。

4 原理样机研制^[8]

在对 Sagnac 型干涉成像光谱仪的应用任务要求及信噪比方程进行分析的基础上,研制了原理样机。旨在通过该样机的研制,为未来的实用系统的开发探索出技术路线。干涉成像光谱仪原理样机的设计研制包括:由前置光学系统、Sagnac 分束器、傅里叶透镜及成像柱面镜组成的光学系统的设计、焦平面阵列器件选配、实现一系列数据处理功能的系统专用软件编制等。所研制出的 Sagnac 型干涉成像光谱仪原理样机性能参数归纳如表 1。

表 1 系统性能参数

Table 1 System parameter characteristics	
光谱范围	400—1000nm
光谱分辨率	2.7nm(在 400nm 处)
瞬时视场 IFOV (空间分辨率)	0.1mrad (2000m 高空 0.2m)
总现场 TFOV	2.93°
信噪比(SNR)(平均)	55:1
光谱通道数	256
外形尺寸	195(L)×210(W)×100(H)mm ³
重量	1.5kg

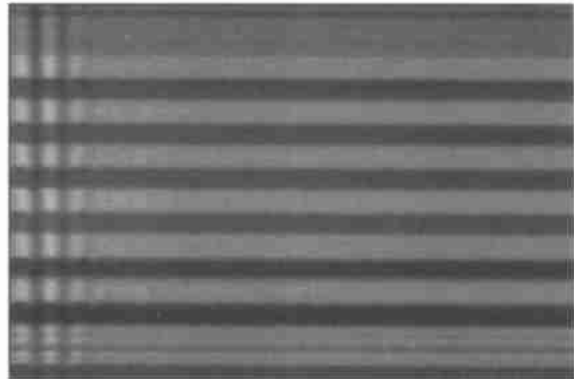
5 外场干涉成像光谱实验

在上述信噪比方程建立、原理样机研制、室内干涉成像光谱实验及实验图样光谱反射特性反演和比较^[8]等一系列理论分析和实验工作的基础上,用 Sagnac 型干涉成像光谱仪原理样机在外场进行了干涉成像光谱实验。样机随转台以瞬时视场角的取样

间隔转动,对百米左右远处景物进行扫描,获取可见近红外干涉成像图像数据,所得到的干涉成像图像如图2(a)。对应于各扫描位置,共采集得到400幅



(a)



(b)

图2 (a) 外场扫描干涉成像图像;(b) 图像中对应像元纵列干涉图

Fig.2 (a) Image scanned in field; (b) Interferogram of image scanned in field

一维狭缝空间像和对应像元纵列的干涉图,其中之一如图2(b)。

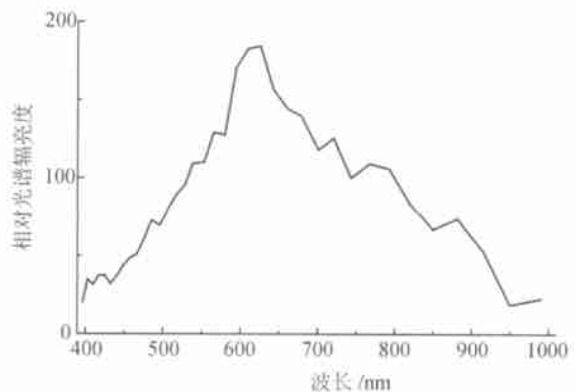
对目标干涉成像图像中各像元的干涉图进行

数据处理及傅里叶变换计算,提取得到了对应波长干涉光谱图像和对应像元光谱曲线,分别如图3至图6。其中,图3(a)中箭头标示处为标板底面(原为

红色),图4(a)中箭头标示处为标板上的字体(原为黄色),图5(a)中箭头标示处为建筑物附近的树木(原为绿色),图6(a)中标示处为建筑物墙面(原为白色)。



(a)



(b)

图3 (a) 626nm 成像光谱图像;(b) 像元光谱辐亮度曲线

Fig.3 (a) 626nm spectral image scanned in field; (b) Spectrum of pixel

对上述的干涉成像光谱实验结果进行分析:图2(a)中箭头所示虚线处所对应的干涉图如图2(b)所示,窗一墙间隔在干涉图中清晰可见;图3(a)中箭头所示处为标板底面(原为红色),而图3(b)所示的该处像元光谱辐亮度计算曲线峰值明显具有红光谱段的特征;同样,图4(b)所示的像元光谱辐亮度计算曲线峰值亦明显具有图4(a)中箭头所示的字体(原为黄色)的黄光谱段的特征;图5(b)所示的像元光谱辐亮度计算曲线峰值亦明显具有图5(a)中箭头所示建筑物附近树木(原为绿色)的光谱特征(长

春地区秋季时节树木已有些泛黄);此外,图6(b)所示的建筑物墙体处(原为白色)的像元光谱辐亮度计算曲线特征也复现了太阳光谱的基本特征^[9],大气的光谱吸收带等明显可辨,只是由于探测器本身的光谱响应特性导致光谱相对强度的畸变。

实验结果及分析说明样机的光学系统、数据采集系统、数据的处理方法及相应的数据处理程序等设计合理、工作可靠,能够在可见和近红外波段以给定的光谱分辨率满足探测要求。

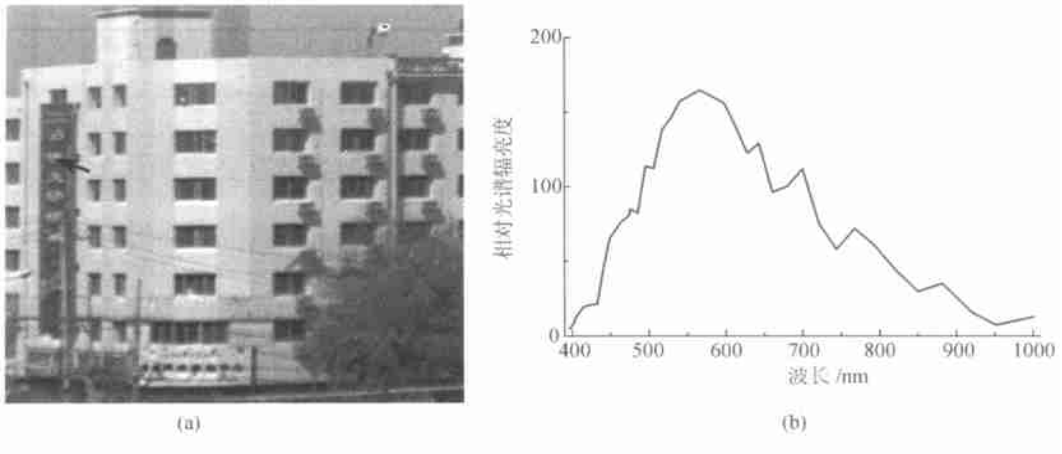


图 4 (a) 566nm 成像光谱图像; (b) 像元光谱辐亮度曲线

Fig.4 (a) 566nm spectral image scanned in field; (b) Spectrum pixel

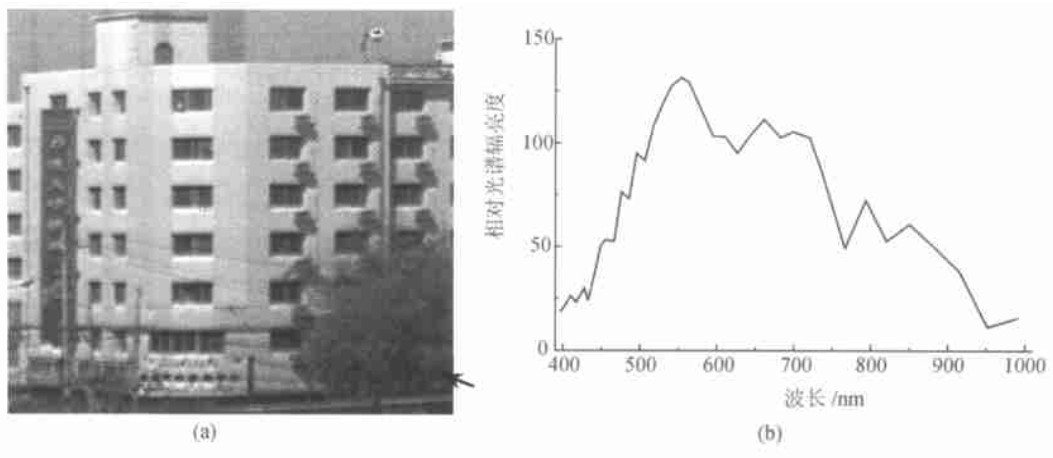


图 5 (a) 553nm 成像光谱图像; (b) 像元光谱辐亮度曲线

Fig.5 (a) 553nm spectral image scanned in field; (b) Spectrum of pixel

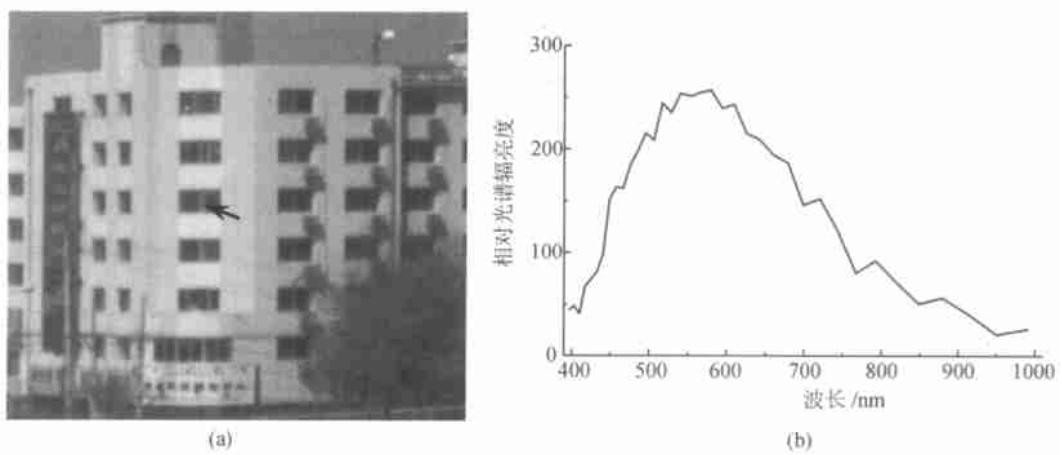


图 6 (a) 外场扫描干涉成像图像; (b) 像元光谱辐亮度曲线

Fig.6 (a) Image scanned in field; (b) Spectrum of pixel

6 结 论

利用空间调制的 Sagnac 型干涉成像光谱仪原理样机进行了外场干涉成像光谱实验研究,得到了满意的结果。实验获取了干涉成像光谱图像,计算提取出了光谱特征明显突出的对应波长干涉光谱图像以及与实验被测目标点光谱特征相符的对应像元光谱曲线,为未来的实用系统的工程研制提供了可靠的技术数据。

参 考 文 献 (References)

- [1] Wolfe W L. Introduction to Imaging Spectrometers[M]. SPIE OPTICAL ENGINEERING PRESS, Bellingham, Washington USA., 1997.
- [2] Okamoto T, Kawata S, Minami S. Fourier Transform Spectrometer with a Self-scanning Photodiode Array[J]. *Applied Optics*, 1984, **23**(2):269—273.
- [3] Barnes T H. Photodiode Array Fourier Transform Spectrometer with Improved Dynamic Range [J]. *Applied Optics*, 1985, **24**(22): 3702—3706.
- [4] Marja-Leena Junttila. Stationary Fourier-transform Spectrometer[J]. *Applied Optics*, 1992, **31**(21):4106—4112.
- [5] Rafert J B, Sellar R G, Eirik Holbert, et al. Hyperspectral Imaging Fourier Transform Spectrometers for Astronomical and Remote Sensing Observations[J]. *SPIE*, 1994, 2198:338—349.
- [6] Smith W H, Hammer P D. Digital Array Scanned Interferometer: Sensors and Results[J]. *Applied Optics*, 1996, **35**(16):2902—2909
- [7] Jin Xi-zhe, Xiang Yang, Yu Bing-xi. Analysis for Signal-to-noise Ratio of Imaging Fourier Transform Spectrometer[J]. *Journal of Remote Sensing*. 2000, **4**(3):194—196. [金锡哲, 向阳, 禹秉熙. 成像干涉光谱仪信噪比分析[J]. 遥感学报, 2000, **4**(3):194—196.]
- [8] Jin Xi-zhe, Xiang Yang, Yu Bing-xi. Development and Spectral Imaging Experiment of Sagnac Type Imaging Fourier Transform Spectrometer (IFTS) [J]. *Journal of Remote Sensing*. 2002, **6**(3):193—197. [金锡哲, 向阳, 禹秉熙. Sagnac 型干涉成像光谱仪研制及干涉成像光谱实验[J]. 遥感学报, 2002, **6**(3):193—197.]
- [9] Jin Xi-zhe, Xiang Yang, Yu Bing-xi. Simulating Calculation of Imaging Fourier Transform Spectrometer[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology*. 2000, **30**:153—156. [金锡哲, 向阳, 禹秉熙. 成像干涉光谱仪仿真模拟计算. 长春科技大学学报. 2002, **30**:“3S”技术与应用专辑, 153—156.]

Field Fourier Transform Spectral Imaging Experiment of Sagnac Type Imaging Fourier Transform Spectrometer (IFTS)

JIN Xi-zhe¹, YU Bing-xi²

(1. Department of Physics, Dalian University, Dalian 518004, China;

2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, 130022, China)

Abstract: Spatially Modulation Imaging Fourier Transform Spectrometer (SMIFTS) is an important space remote sensor for research and application. In this paper, a prototype of IFTS based on Sagnac interferometer is introduced. The field Fourier Transform spectral imaging experiment is carried out with the prototype and Fourier Transform image in visible and near-infrared (VNIR) region is obtained. By processing and Fourier Transforming interferogram of each pixel, spectral image and pixel spectra is extracted with distinct spectral character.

Key words: remote sensing; VNIR; prototype of Sagnac type IFTS; field Fourier Transform spectral imaging experiment