

文章编号: 1007-4619 (2002) 01-0075-06

成像光谱仪分光技术概览

郑玉权, 禹秉熙

(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: 论文介绍了多种成像光谱仪的分光技术。棱镜或光栅色散型成像光谱仪技术成熟, 应用广泛; 在发散光束中使用光栅的方法, 克服了准直光束用法中的一些缺陷; 傅里叶变换光谱仪是遥感探测可见和红外弱辐射的有力工具; 光楔成像光谱仪结构简单, 随着渐变滤光片工艺技术的成熟, 已走向实用化; 采用可调谐滤光片的成像光谱仪由于滤光片水平的限制, 投入应用还有待时日; 采用二元光学元件的成像光谱仪结构紧凑, 体积小, 扫描速度快, 已研制出地面实用型产品; 层析成像光谱仪原理新, 目前还处在实验阶段; 三维成像光谱仪可以同时获取二维影像和一维光谱信息, 可实现对渐变目标的观测。

关键词: 成像光谱仪; 分光技术; 傅里叶变换光谱仪; 可调谐滤光片; 二元光学元件; 层析; 三维成像光谱仪

中图分类号: TP702 **文献标识码:** A

1 引言

成像光谱仪(即超光谱成像仪)是20世纪80年代开始在多光谱遥感成像技术的基础上发展起来的新一代光学传感器, 它能够以高光谱分辨率获取景物和目标的超多谱段图像, 在大气、海洋和陆地观测中正在得到广泛的应用。

成像光谱仪是成像技术和光谱技术的有机结合, 它的光学系统一般由望远系统和光谱仪系统组成, 光谱仪系统采用的分光技术直接影响着整个成像光谱仪的性能、结构的复杂程度、重量和体积等。本文在介绍传统的棱镜、光栅色散型成像光谱仪的基础上, 概括了新发展起来的成像光谱仪分光技术, 主要包括傅里叶变换光谱仪、采用可调谐滤光片的

凝视型成像光谱仪、渐变滤光片(光楔)成像光谱仪、采用二元光学元件的成像光谱仪、层析成像光谱仪和完全无动件的三维成像光谱仪。

2 棱镜、光栅色散型成像光谱仪

2.1 在准直光束中使用棱镜或光栅的分光技术

棱镜和光栅色散型成像光谱仪出现较早、技术比较成熟, 绝大多数航空和航天成像光谱仪均采用了此类分光技术, 棱镜和光栅的典型应用方式如图1所示。入射狭缝位于准直系统的前焦面上, 入射的辐射经准直光学系统准直后, 经棱镜或光栅色散由成像系统将狭缝按波长成像在焦平面探测器上。文献[1]给出了棱镜和光栅元件的性能比较。

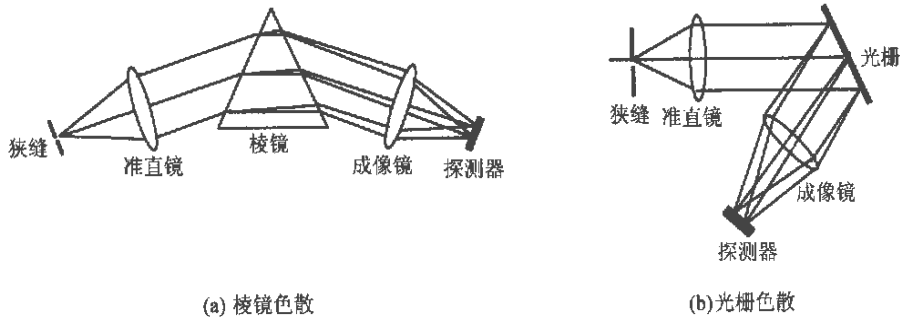


图1 棱镜和光栅的典型应用方法

Fig. 1 Typical application of prism and grating

收稿日期: 2000-10-12; 修订日期: 2001-01-10

作者简介: 郑玉权(1972—), 男, 1993年毕业于长春光机学院, 1996年获得理学硕士学位, 1999年6月于长春光机所获理学博士学位, 现从事博士后研究工作; 主要研究方向为辐射测量、成像光谱仪、CCD成像仪等遥感仪器的研制, 定标和数据解析等, 发表论文多篇。

2.2 在发散光束中使用光栅的分光技术

在发射光束中使用光栅的光谱仪已经获得美国国家专利(美国专利号 4895445),在这种使用方法中,从狭缝入射的光不需准直系统准直而直接入射到平面闪耀光栅上,经光栅衍射后可得到目标狭缝的光谱虚像,成像系统将狭缝按波长成像在面阵探测器的不同位置处。Peter A. Jones 将这种光谱技术应用到成像光谱仪中^[2],工作原理如图 2 所示,与传统的准直光束中使用光栅的方法相比,发散光束中使用光栅具有较多优点^[2]。因此, Peter A. Jones 将这种成像光谱技术应用到了 OrbView-4 卫星上的战术遥感器的概念设计中^[3]。

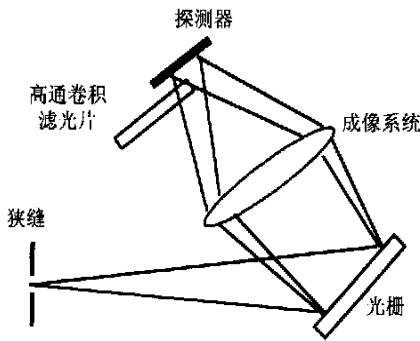


图 2 发散光束中使用光栅的分光技术
Fig. 2 Spectrometer using a grating in divergent light

3 傅里叶变换光谱仪

傅里叶变换光谱仪利用光谱像元干涉图与光谱图之间的傅里叶变换关系,通过测量干涉图和对干涉图进行傅里叶变换来获得物体的光谱信息。获取光谱像元干涉图的方法与技术,是傅里叶变换光谱学的核心问题之一,决定了由其所形成的傅里叶变换光谱仪的使用范围和能力。目前,遥感成像傅里叶变换光谱学中,用于获取物面光谱像元干涉图的方法主要有三种:迈克尔逊干涉法、三角共路干涉法和双折射干涉法,三者的工作原理见图 3。

迈克尔逊干涉法是建立在具有一个不动镜和一个动镜的迈克尔逊干涉仪基础上,它可实现相当高精度的光谱测量,但对扰动比较敏感,对机械扫描精度要求也高,因此仪器结构庞大、成本高。法国太空空间与战略系统分部^[4]和美国罗伦斯利物摩尔实验室^[5]分别于 1991 年和 1995 年研制出了迈克尔逊干涉型时间调制空间成像傅里叶变换光谱仪样机。三角共路干涉法通过空间调制产生物面采样线的像和组成像元的干涉图。1995 年美国茶隼公司和佛罗里达技术研究所共同研制了一台机载可见波段三角共路型成像傅里叶变换光谱仪^[6]。双折射干涉法利用双折射偏振干涉方法来获取干涉图。美国 NASA 利用该方法开发研制了数字阵列扫描干涉仪 DASI^[7]。

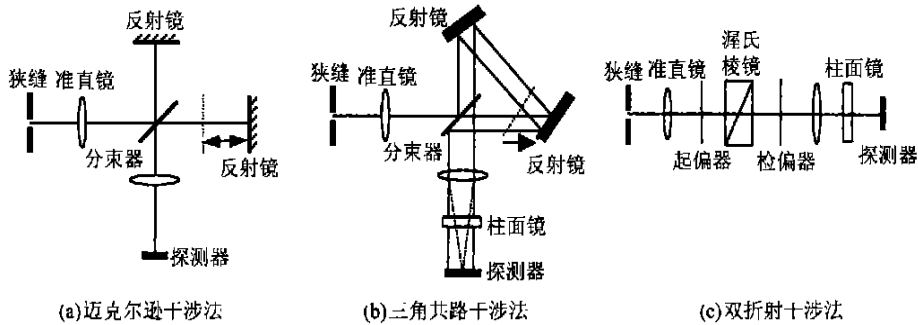


图 3 傅里叶变换光谱仪的三种干涉方法

Fig. 3 Three interference methods of Fourier Transform spectrometer

迈克尔逊型傅里叶变换成像光谱仪属于时间调制型,只适用于空间和光谱随时间变化较慢的目标光谱图像测量,三角共路型和双折射型属于空间调制型,结构紧凑,对外界扰动和震动有良好的稳定性,既可用于空间又可用于时间光谱分辨,适合对地遥感观测,是国外正大力发展的两种傅里叶变换成像光谱仪。

4 采用可调谐、光楔滤光片的成像光谱仪

4.1 采用可调谐滤光片的成像光谱仪

可调谐滤光片的种类较多:声光可调谐滤光片(AOTF)、电光可调谐滤光片、双折射滤光片、液晶可调谐滤光片、法-伯(Fabry-Perot)可调谐滤光片等,应用在成像光谱仪上的主要有声光可调谐滤光片

(AOTF) 和液晶可调谐滤光片。

声光可调谐滤光片 (AOTF) 利用声光衍射原理, 采用具有良好的光学性能、较高的声光品质因数和较低声、光衰减的光学材料所制作的器件。AOTF 在国内外发展都很快, 图 4 为非共线 TeO₂ 声光可调谐滤光片的结构^[8], 根据声光滤光器的原理, 非共线声光滤光器的调谐关系为

$$\lambda_0 = v_a \Delta n (\sin^2 2\theta_i + \sin^4 \theta_i)^{1/2} / f_a \quad (1)$$

式中 λ_0 —衍射光波长, v_a —超声声速, θ_i —入射光与晶体光轴的夹角, f_a —超声驱动频率, Δn —相互作用介质的双折射。调谐关系反映了声光可调谐滤光片驱动频率与衍射波长的一一对应关系。通过电子调节声波的频率就可完成一定光谱范围内的光谱扫描。

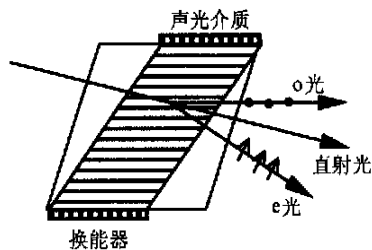


图 4 非共线 TeO₂AOTF 的结构

Fig. 4 Structure of non-collinear TeO₂ acousto-optic tunable filter

液晶可调谐滤光片利用向列液晶材料的双折射原理, 将液晶材料与 Lyot 和 Solc 型双折射滤光片结合在一起形成的可调谐滤光器^[9]。双折射滤光片的可调谐性是通过改变双折射波片的偏振偏移量来实现的, 选择向列液晶材料作为波片, 采用光电方法调节偏振偏移量, 可在相当短的时间尺度 (20 ms) 内实现光谱连续可调性。为了扩展可调谐波片的光谱范围, 提高光谱分辨率, 液晶可调谐滤光片可采用多级串联的工作方式。图 5 为 Meadowlark Optics 公司为 NASA/JPL 制造的三级液晶可调谐滤光片, 光谱范围覆盖 0.4—2.5 μm, 光谱分辨率为 10 nm, 滤光片口径约 40 mm。由于使用了偏振片, 液晶可调谐滤光透过率的理论最大值为 50%, 现在最高可达 40%。

采用可调谐滤光片的成像光谱仪结构非常简单, 简单到只需把可调谐滤光片放在光路中就可以实现, 文献[8]和[10]分别给出了采用声光和液晶可调谐滤光片的成像光谱仪研究情况。

4.2 光楔成像光谱仪

光楔成像光谱仪包括一个安装在靠近面阵探测

器的楔形多层膜介质干涉滤光片 (图 6), 探测器的每一行探测像元接收与滤光片透过滤长对应的光谱带的能量^[11]。所以用单个光楔光谱仪能够覆盖较宽的光谱范围。

当面阵探测器的各行与各光谱带对应时, 探测器的各列每次在不同的空间位置上采样, 所以该探测器阵列有一个空间光谱轮廓。这种几何关系可以在推扫遥感器设计或摆扫遥感器设计中使用, 不论在哪一种扫描方法中, 每一个地面像元的光谱都是由不同时刻不同探测器像元的输出信号组合得到的。

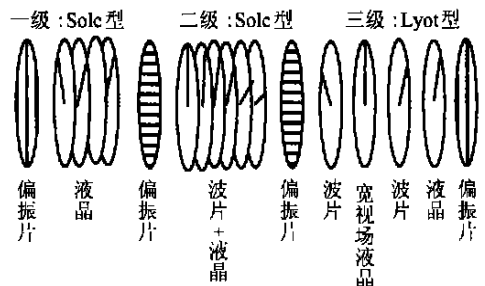


图 5 三级液晶可调谐滤光片

Fig. 5 Three-stage crystal tunable filter

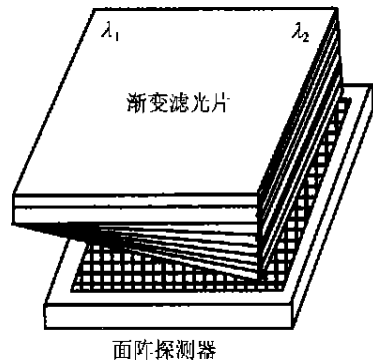


图 6 光楔成像光谱仪

Fig. 6 Wedge imaging spectrometer

光楔成像光谱仪随着光楔滤光片工艺水平的提高已开始走向实用化, 美国 Hughes Santa Barbara 研究中心研制的成像光谱仪 WIS-1 和 WIS-2 采用的分光元件就是光楔滤光片, 美国 NASA 第一个新千年地球轨道任务 EO-1 卫星上也搭载了光楔成像光谱仪^[12]。

5 层析成像光谱仪

层析成像光谱仪将成像光谱图像数据立方体视为三维物体, 利用特殊的成像光谱仪记录图像立方体的断层投影, 根据图像立方体与其断层投影间的关系, 利用计算技术对所得的断层投影进行数字解

析, 重构出物体的空间光谱图。断层光谱层析法通过绕光轴旋转全视场色散成像光谱仪, 产生图像立方体的断层投影^[13](图 7a), 棱镜光谱层析法基于全视场棱镜色散型成像光谱仪, 通过顺序更换棱镜, 产生图像立方体的断层投影序列^[14](图 7b), 光栅光谱层析法借助透射光栅的色散和衍射效应, 产生图像立方体的断层投影序列^[15](图 7c)。Descour 利用计算全息图构成的层析成像光谱仪与采用正弦相位光栅的层析成像光谱仪相比具有更均匀的衍射效率^[16]。

层析成像光谱技术当前还属于理论和方法研究

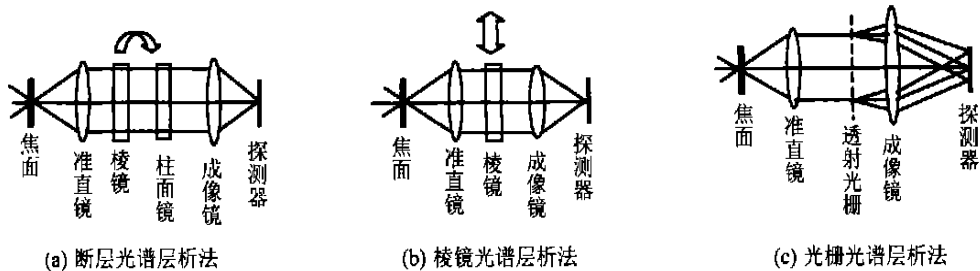


图 7 层析成像光谱仪

Fig. 7 Computed-Tomography Imaging spectrometer

6 采用二元光学元件的成像光谱仪

二元光学元件(即衍射光学元件)具有多种应用。美国光量子中心罗姆实验室的 Denise Igons 提出一种利用二元光学元件的成像光谱仪。二元光学元件既是成像元件又是色散元件, 利用单色面阵 CCD 探测器沿光轴方向对所需波段的成像范围进行扫描, 每一位置对应相应波长的成像区。由 CCD 接受的辐射是准确聚焦所成的像与其它波长在不同离焦位置所成像的重叠。利用计算层析技术对图像进行卷积处理就可获得物面的图像立方体。

二元光学元件同普通透镜一样会聚入射光线, 但它不是根据折射, 而是衍射原理。由于衍射产生色差的有效焦距与波长成反比^[17]:

$$f(\lambda) = \frac{f_0 \lambda_0}{\lambda} \quad (2)$$

式中 f_0 是设计波长 λ_0 的焦距。

因此, 与棱镜或光栅元件沿垂直于光轴方向色散的特性不同, 二元光学元件沿轴线性色散(图 8), 采用二元光学元件的成像光谱仪其光谱分辨率由探测器的尺寸决定。该成像光谱仪结构紧凑, 衍射效率高, 目前采用新型、低成本 R_0 激光直接写入技术制

阶段, 其显著的优点是它的全视场性, 不仅使光能得到充分的利用, 而且能以高光谱分辨率提供物面的图像立方体。断层光谱层析法和棱镜光谱层析法需旋转系统或更换棱镜, 获取图像立方体的工作时间长, 具有发展为凝视考察地面静态或缓变目标的高空间和光谱分辨率仪器的能力; 光栅光谱层析法结构固定, 可同时获取物体的影像和光谱信息, 因此可用于遥感获取光谱和空间强度迅变物体的光谱图, 但由于探测器格式及色散元件的衍射特性限制, 工作光谱范围较窄, 谱段数较少, 需进一步进行研究。

作的连续浮雕结构的二元光学元件的效率已经达到 99%。太平洋高技术公司 (Pacific Advanced Technology) 已经研制了多台该类成像光谱仪^[18], 可在 1 秒内获取高达 400 多个光普通道的超光谱图像, 光谱范围覆盖了 VNIR、SWIR、MWIR 和 TIR 波段。

7 三维成像光谱仪

顾名思义, 三维成像光谱仪就是在一个积分时间内同时获取二维影像和一维光谱信息数据立方体的仪器, 它是在光栅(棱镜)色散型成像光谱仪的基础上改进而来的。传统的色散型成像光谱仪中, 光谱仪系统的入射狭缝位于望远系统的焦面上, 而三维成像光谱仪在望远系统的焦面上放置的是一个像分割器(Image Slicer)^[19], 这也是三维成像光谱仪的核心, 它的作用就是将二维图像分割转换为长带状图像, 像分割器由两套平面反射镜组成, 第一套反射镜将望远系统所成的二维图像分割成多个条带, 并将各条带按不同方向发射成为一个阶梯形长条带(图 9), 第二组发射镜接收每个单独条带的出射光, 并将它们排成一个连续的长带, 以至于每个条带的光瞳看起来是相互一致的, 从几何光学的角度来看,

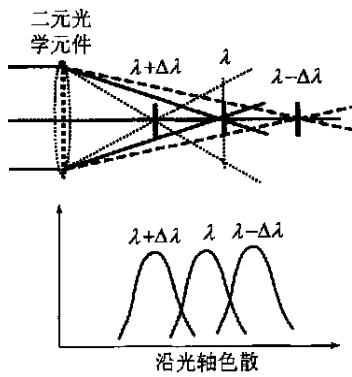


图8 二元光学元件的色散特性

Fig. 8 Dispersive characteristics of diffractive optics

重新组合的长带与一狭缝几乎没有任何区别。利用这个像分割器作为棱镜或光栅色散型光谱仪的入射狭缝就可以组成一台三维成像光谱仪,同时获取目标的二维影像加一维光谱信息,但这也是在损失仪器刈幅宽度的条件下得到的。

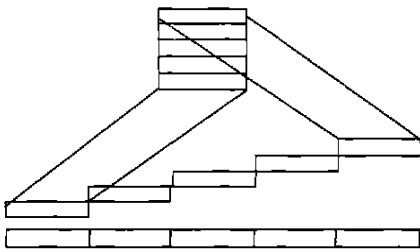


图9 像分割器的工作原理

Fig. 9 Principle of image slicer

8 结束语

成像光谱仪已成为二十一世纪遥感技术发展的重点,分光技术选择的成功与否关系着成像光谱仪研制的成败。从目前的技术发展来看,棱镜或光栅色散型光谱仪由于技术成熟度高仍占据着主导地位,傅里叶变换光谱仪光通量大、光谱分辨率高,在弱辐射探测方面优势明显,而采用可调谐滤光片或渐变滤光片的成像光谱仪结构简单具有较大的发展前途,在探测迅变物体方面,三维成像光谱仪将是最佳选择,光栅层析成像光谱仪出现较晚,还处于原理实验阶段,短时间内难于实现实用化。

参考文献 (References)

[1] Blechinger Fritz, Charlton D E, *et al.* High-resolution Imaging Spectrometer (HRIS) Optics, Focal plane, and Calibration [C]. SPIE, 1993, 1937: 207-224.

[2] Peter A Jones, Imaging spectrometry using a grating in divergent light [C]. SPIE, 1993, 1937: 234-243.

[3] Peter A Jones, Robert K Jungquist, Carl S King, A Speceborne tactical sensor concept [C]. SPIE, 1997, 3061: 37-46.

[4] D Simenoni, New concept for highly-compact imaging Fourier transform spectrometer (IFTS) [C]. SPIE, 1991, 1479: 127-138.

[5] Michael R Carter, Charles L Bennett, David J Fields, *et al.* Livemore imaging Fourier transform infrared spectrometer [C]. SPIE, 1995, 2480: 380-386.

[6] L John Otten III, Eugene W Bulter, The design of an airborne Fourier transform visible hyperspectral imaging system for light aircraft [C]. SPIE, 1995, 2480: 418-423.

[7] Philip D Hammer, Francisco P J. Valero, David L Peterson, An imaging interferometer for terrestrial remote sensing [C]. SPIE, 1993, 1937: 244-255.

[8] Zong Derong, Luo Bin, Li Junjie, Acousto-Optic Tunable Filter and Its Application in Spectral Analysis [J]. Opto-Electronic Engineering, 1998, 25(6): 102-105. [宗德蓉, 罗斌, 黎俊杰. 声光可调滤光片及其在光谱分析方面的应用[J]. 光电工程, 1998, 25(6): 102-105.]

[9] Greg Kopp, Michael Derks, Alan Graham, Liquid crystal tunable birefringent filters [C]. SPIE, 1996, 2830: 345-350.

[10] Thomas G Chrien, Christopher Chovit, Imaging spectrometer using a liquid crystal tuable filter [C]. SPIE, 1993, 1937: 256-261.

[11] Aram M Mika, Linear wedge imaging spectrometer [C]. SPIE, 1993, 1298: 127-131.

[12] Bernard D. Seery, D. Bryant Cramer, Christopher Stevens and Donald Lencioni, EO-1: NASA's first new millennium earth orbiting mission [C]. SPIE, 1996, 2810: 4-10.

[13] Y Betremieux, *et al.* SPINR: two-dimensional spectral imaging through tomographic reconstruction [J]. Opt. Eng., 1993, 31(12): 3133-3138.

[14] F V Bulygin, G N Vishnyakov, *et al.* Spectrotomography—a new method of obtaining spectrograms of 2-D objects [J]. Opt. Spectrosc., 1991, 71(6): 561-563.

[15] T Okamoto, I Yamaguchi, Simultaneous acquisition of spectral image information [J]. Opt. Lett., 1991, 71(16): 1277-1279.

[16] Michael R. Descour, Curtis E. Volin, *et al.* Demonstration of a computed tomography imaging spectrometer using a computer-generated hologram disperser [J]. Applied Optics, 1997, 36(26): 3694-3698.

[17] Denise Lyons, Image Spectrometry with a Diffractive Optic [C]. SPIE, 1995, 2480: 123-131.

[18] Michele Hinrichs, Mark Massie, New approach to imaging spectroscopy using diffractive optics [C]. SPIE, 1997, 3118: 194-205.

[19] A. Krabbe, N. Thatte, *et al.* 3D-A new generation imaging spectrometer [C]. SPIE, 1997, 2871: 1179-1186.

Overview of Spectrum-Dividing Technologies in Imaging Spectrometers

ZHENG Yu-quan, YU Bing-xi

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

Abstract: The paper describes several kinds of spectrum-dividing techniques used in imaging spectrometers (IS). Dispersion-type imaging spectrometers with a prism or grating have come to maturity, and used widely. The IS using a grating in divergent light is a new application method of the grating, which overcomes the defects of IS using a grating in collimated light. The imaging Fourier transform spectrometers (IFTS) have been a powerful tool to remotely detect visible and weak IR radiation. Wedge imaging spectrometer (WIS) has simple construction, and begins to be applied in practice with the further maturity of the process of variable filter. Owing to the limitation of the tunable filter manufacturing process, the imaging spectrometer using tunable filters will need long time to be used as payloads of satellites. The imaging spectrometer using diffractive optics has compact construction, small volume and rapid scanning speed, and its practical ground manufacture have been visible. The computed-tomography imaging spectrometer (CTIS) is in the experimental stage because of its new working principle. 3D imaging spectrometer can be used to measure the objects which often change rapidly, by use of its unique characteristics it can obtain two-dimension image and one-dimension spectral information.

Key words: imaging spectrometer; spectrum-dividing techniques; Imaging Fourier Transform Imaging Spectrometer (IFTS); tunable filter; diffractive optics; Computed-Tomography (CT); 3D Imaging Spectrometer