

“西光所建所六十周年暨《光子学报》创刊五十周年”专辑

引用格式: HU Bingliang. Review of the Development of Interferometric Spectral Imaging Technology (Invited) [J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(7):0751401

胡炳樑. 干涉光谱成像技术发展的回顾(特邀)[J]. 光子学报, 2022, 51(7):0751401

干涉光谱成像技术发展的回顾(特邀)

胡炳樑

(中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710119)

摘 要:干涉光谱成像仪是基于现代光学技术、光谱技术、电子技术及计算机技术发展起来的一种用于精密光学测量的强有力工具。与色散型、滤光片型光谱成像技术相比较,干涉光谱成像技术因其具有高分辨本领、高灵敏度以及高波数准确度等优势,被广泛应用于农林水体监测、大气污染监控、国土资源勘查以及天文目标观测等领域。本文按照光程获取方式的类型,从时间调制、空间调制以及时空联合调制三个方面综述了国内外干涉光谱成像技术的研究现状,并对每种类型的代表性研究成果进行了介绍和回顾。最后,对干涉光谱成像技术的未来研究趋势进行了展望。

关键词:干涉光谱成像;时间调制;空间调制;时空联合调制

中图分类号:TH744

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20225107.0751401

0 引言

光谱成像技术能够得到被测目标在两个维度上的空间信息和一个维度上光谱信息,根据其分光技术原理的不同,可以分为色散型、滤光片型以及干涉型等。棱镜和光栅都是典型的色散型元器件,可以对宽光谱进行窄带选择,牛顿通过棱镜把太阳光分成由红色到紫色依次排列体现的是最简单的色散原理;带通滤光片阵列、线性渐变滤光片、液晶可调谐滤光器以及声光可调谐滤波器等都属于滤光片型光谱成像技术范畴,其实质也是对宽光谱进行窄带选择;干涉型光谱成像技术是一种间接获取目标光谱信息的方法,是光谱成像技术的一个重要分支,其基本原理是利用干涉图与光谱图之间的对应关系,通过对探测器上得到的离散干涉图样实施傅里叶积分数学运算、反演得到光谱图,进而得到被测目标的光谱信息^[1]。与传统色散型光谱成像技术相比较,干涉型光谱成像技术具有波数精度高、杂散光影响较低、光谱测量范围宽以及结构紧凑等诸多优点,引起科学界的广泛关注。

干涉光谱成像技术从分光原理可以分为多光束干涉和双光束干涉。大部分多光束干涉系统都基于 Fabry-Perot 干涉仪,这种类型的光谱仪可以实现较高的光谱分辨率,但是系统的视场角不大,而且系统装调难度也较高^[2];双光束干涉是目标辐射光谱分布的傅里叶变换,两束相干光之间的光程差不断变化时,探测器记录干涉条纹光强的变化情况,即干涉图,然后对干涉图进行傅里叶变换得到光谱图,由于双光束干涉的光谱仪具有诸多显而易见的优点,所以其具有良好的发展基础和应用前景^[3]。1880年,美国物理学家 MICHELSON A A 首次发明了以自己名字命名的干涉仪——迈克尔逊干涉仪(Michelson 干涉仪)^[4],设计初衷是用于精确测定光速。20世纪50年代后,英国的 FELLGETT P 第一次将干涉图进行傅里叶积分变换、数学计算获得了的光谱图^[5-7]。其实干涉光谱成像技术真正意义上得到大力发展始于1957年的国际干涉分会。随着计算机数据处理技术以及阵列探测器技术的不断提高,直到大面阵探测器出现以后,干涉光谱成像技术才得以迅速推进并在很多应用场景中得到广泛应用^[8-10]。

干涉光谱仪在原理上具有多通道、高通量以及高波数精度等基本优点^[11]。1948年,法国科学家 JACQUINOT P 首先指出迈克尔逊干涉仪具有高通量优点,即亚基诺优点(Jacquinot 优点)^[12]。传统带有狭

基金项目:国家自然科学基金(No. 61905275)

第一作者:胡炳樑(1973—),男,研究员,博士,主要研究方向为光谱成像和信号处理技术。Email: hbl@opt.ac.cn

收稿日期:2022-04-27;录用日期:2022-05-25

<http://www.photon.ac.cn>

缝的色散型光谱成像仪利用棱镜、光栅等色散光学元器件把入射的复色光色散形成离散准单色谱线。然而,传统带有狭缝的色散型光谱成像仪都有限制入射光的狭缝,狭缝的宽度影响光谱仪的分辨率和光通量,狭缝宽度越小,进入仪器的光通量就越少,而干涉型光谱仪同时测量所有入射光的干涉强度,所以其具有高通量的优点。1951年,FLLGETT P指出双光束干涉仪存在多重传输的优点,即费尔格优点(Fllgett优点),干涉光谱仪与传统的色散型光谱仪相比较,从光谱信息获取方式上来看具有多通道优点。假设仪器的最小光谱分辨率为 $\delta\nu$,在某一个时间段 t 内测定一个谱段宽度为 $\Delta\nu=\nu_2-\nu_1$ 的光谱间隔,则整个谱段宽度被分为 $M=\Delta\nu/\delta\nu$ 个光谱元。如果采用传统带有狭缝的色散型光谱仪器,被测光谱单元只能依次通过狭缝,即在每一个时刻只能测定一个特定的光谱单元,而目标辐射的其它能量不能在这一时刻通过狭缝。相反,在干涉光谱仪中,目标辐射的所有能量同时通过仪器在探测器上形成干涉图。每一个光谱元都受到全部时间的测定,即每一个光谱单元被测量的时间比色散型仪器多 M 倍,由噪声理论可知,仪器信噪比与谱元被测的时间平方根成正比,这正是多通道带来的优点。同样,以法国物理学家 Connes 名字命名了波数高精度优点,当干涉仪动镜定位不精确时,经过傅里叶变换复原的光谱中会出现鬼线,为了消除这些鬼线,使用激光作为参考光源,根据激光干涉条纹标定干涉仪动镜的位移量,进而使干涉光谱仪得到更为准确的光谱波数。干涉光谱仪还有诸如杂散光影响小、分辨本领高、自由光谱区宽等一系列优点。正是因其具有色散型光谱技术无法比拟的优点,干涉光谱技术才能够高速发展,尤其在可见、红外波段的遥感领域,已经逐渐成为高分辨探测的强有力工具。多年来,国内诸多研究单位,例如中国空间技术研究院、中国科学院安徽光学精密机械研究所、中国科学院长春光学精密机械与物理研究所、中国科学院西安光学精密机械所、中国科学院上海技术物理研究所、浙江大学、武汉大学、中北大学、西安交通大学、南京理工大学等,紧跟国际步伐,一直从事干涉光谱成像技术方面的研究工作,已从理论计算、仿真模拟、实验验证、工程样机过渡到了航天型号载荷,在该领域积攒了宝贵的研究经验。由于产品应用领域不同,导致研究的侧重点也不同,例如中国科学院安徽光学精密机械研究所立足于遥感科技前沿,侧重于大气光学、环境光学等领域;中国科学院上海技术物理研究所对干涉仪系统有详细研究,近年来成果累累,很多载荷产品都为国家社会做出了卓越贡献;中国科学院西安光学精密机械所是我国在干涉光谱成像技术方面最早的研究单位之一,先后研制了基于四连杆一精密凸轮角镜的干涉光谱成像仪、基于变形 Sagnac 干涉仪的空间调制型干涉光谱成像仪、大孔径静态干涉光谱成像仪、宽谱段多普勒差分干涉光谱仪、反射转镜式红外干涉光谱仪、楔形棱镜扫描时间调制型干涉光谱仪以及基于 Savart 板的偏振干涉光谱成像仪等多种调制类型的干涉仪,多年来,在此领域作了许多开创性的研究工作,一些研究成果已达到国际先进水平,并成功应用于环境与地质灾害监测、大气污染和海洋遥感、空间与天文等领域。

干涉光谱成像技术按照光程获取方式的类型可以分为时间调制、空间调制以及时空联合调制三种类型。时间调制型干涉光谱成像技术是通过连续改变相干光的光程差,进而对出射光束进行调制,使不同波长的光分解成不同谱元;空间调制型干涉光谱成像技术是将不同波长的光分布在空间的不同方向或位置上;时空联合调制型干涉光谱成像技术前置光学系统中不存在狭缝,探测器上获得受到干涉调制的目标图像,然后通过机载或星载方式推扫系统,得到被测目标的完整干涉信息。三种调制方式的干涉光谱成像技术尽管来自同源,但由于目标经过干涉仪后获取干涉信息的光学原理过程不同,因此在光能量传递和信噪比上存在一定程度的区别。本文按照光程获取方式,主要综述三种不同调制类型的光谱成像技术在国内外的发展情况。

1 时间调制型干涉光谱成像仪

时间调制型干涉光谱成像仪通过干涉仪中动镜移动引起双光束之间产生连续变化的光程差,探测器记录所有连续变化光程差的时间序列,除了具有多通道、杂散光低等优点外,时间调制型干涉光谱成像技术还具有高探测灵敏度、高光谱分辨率、高波数准确度等色散型光谱仪无可比拟的突出优点。因而经常被用来探测微弱信号,在天文星系探测、大气环境污染监测、天气预报以及精密化学组分分析等领域具有广泛的用途和深远的影响。基于 Michelson 干涉仪的时间调制型干涉光谱成像技术于 20 世纪 80 年代逐渐开始发展,法国太空空间与战略系统分部和美国劳伦斯利弗莫尔国家实验室先后于 1991 年、1995 年分别研制出了时间

调制型干涉光谱成像仪原理样机^[13-14]。由于这种类型的干涉仪需要高稳定可靠的动镜扫描机构,在应用上受到很大限制,为此很多学者进行了大量研究,并提出了一系列改进型扫描机构^[15-20]。按照干涉仪动镜运动方式和光程差产生的方式,时间调制型干涉光谱成像技术的扫描机构又分为直线运动形式、摆动运动形式以及旋转运动形式三种具有代表性的扫描机构。

1.1 直线运动形式

通过往复移动动镜产生等厚干涉或等倾干涉的迈克尔逊干涉仪是典型的直线运动式干涉光谱仪,其光学原理示意如图1所示。这种经典的干涉光谱仪光路中无狭缝,与传统的色散型光谱成像仪相比较,其光能利用效率至少高两个数量级^[21, 22]。系统中的分束器是干涉仪的核心部件,主要作用是将带有目标信息的入射光分成反射光与透射光,分别经过动镜与静镜反射后再次经过分束器被后置成像镜组聚焦在探测器上产生干涉,动镜的主要作用是使这两束光之间产生光程差,通过对探测器接收到的干涉图进行解析得到被测目标的光谱信息。这种双平面镜直线型干涉光谱仪的性能主要取决于干涉系统中动镜和定镜的准直精度,当系统在采集数据时,作往复直线运动的动镜必须与定镜的平面保持严格正交,如果动镜相对于定镜产生倾斜,即动镜和定镜对分束器的镜像不再保持平行,会导致干涉系统调制度降低,进而引起相位误差。一般采用自适应动态准直系统控制动镜与静镜的相对倾斜角度在一个合理范围内。干涉仪的驱动电机一般采用音圈直线电机,具有结构简单、驱动速度快以及定位精度高优点。采集信号时需要直线电机匀速运动,所以通常在干涉仪光路中引入速度反馈,例如利用相干光源(激光)的干涉信号作为标定动镜速度的参考,通过检测激光干涉信号的正弦波,滤波后经过过零检测得到与之同相位逻辑方波信号,该逻辑方波信号可作为直线电机的速度反馈。

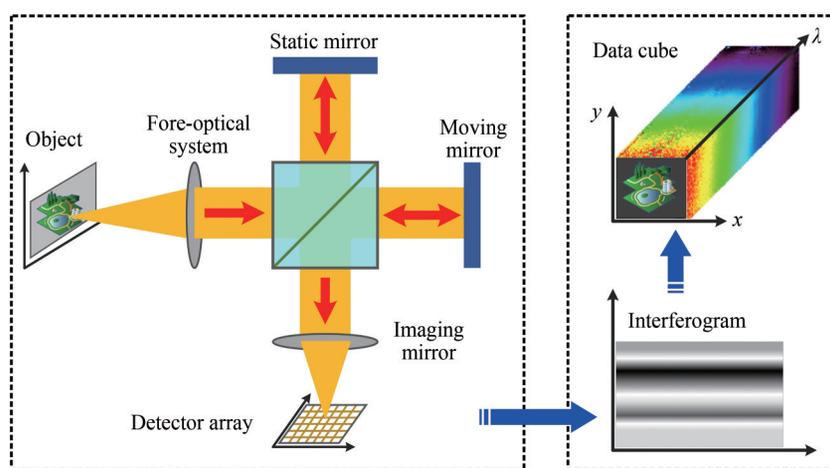


图1 经典的迈克尔逊干涉仪光学原理示意图

Fig.1 The schematic diagram of optical principle of classical Michelson interferometer

随着科技进步,经典的Michelson干涉仪已出现很多变体,但是在技术原理上都需要一套直线精度很高的动镜控制单元,使得干涉仪的稳定性降低,而且工艺变得更加复杂,进而给系统研制带来了诸多技术难题,最重要的是不能从根本上有效解决平面动镜在移动过程中引起的倾斜和剪切问题,最终导致干涉图产生相位误差以及干涉调制严重退化。尤其是探测速度慢,想要得到一幅干涉图,干涉仪的动镜需要运动一个完整的周期,如果用于高速光谱测量,那么对探测帧频要求也很高。过去几十年,国内外很多科研学者对时间调制的Michelson干涉光谱技术进行了大量研究。1948年,PECK E R基于传统Michelson干涉仪,提出一种变形结构,将干涉仪中的定镜和动镜都用角反射镜替代,由于角反射镜的固有特性,其三个面互相垂直,与入射光严格成 180° 平行方向出射,目标辐射依次经过前置光学系统和分束器后被分为透射光束和反射光束,然后分别经过角反射镜后原路返回在探测器上产生干涉,虽然角反射镜的偏转和倾斜不会引起光束偏折,但是角反射镜的顶点会发生横移,使得轴外光线产生附加光程差,从而导致干涉图产生相位误差,干涉仪光学原理示意如图2所示^[23]。1960年,MURTY M提出一种新的干涉技术方案,其光学原理如图3所示,为了降低传统Michelson干涉仪动镜引入的误差,在传统Michelson干涉仪中的动平面镜一端增加一个

角反射镜,使平面反射镜静止,通过移动角反射镜产生4倍的折叠光路,研究发现,该系统可以有效降低动镜驱动引入的误差和系统的研制难度^[24]。

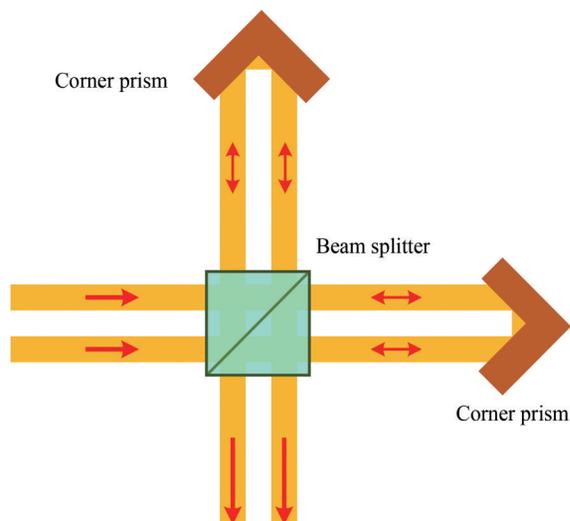


图2 基于双角反射镜的迈克尔逊干涉仪光学原理示意图
Fig.2 Diagrammatic sketch of Michelson interferometer based on two corner cubes

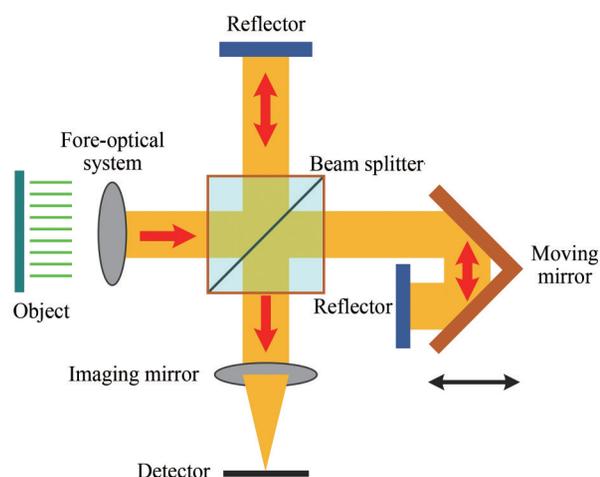


图3 基于角反射镜和平面反射镜的迈克尔逊干涉仪原理示意图
Fig.3 Diagrammatic sketch of Michelson interferometer based on corner cube and mirror

法国国家科学研究院和以色列特拉维夫大学于2009年合作开发了用角反射镜代替 Michelson 干涉仪平面镜的时间调制型傅里叶变换光谱仪,通过动镜直线扫描,在 $5\sim 7\ \mu\text{m}$ 的光谱范围内取得了 $10\ \text{cm}^{-1}$ 的光谱分辨率^[25]。2013年 美国空间动力实验室和美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)兰勒研究中心联合开发了基于 Michelson 干涉仪的用于在大气对流层测地球热辐射光谱的长波红外傅里叶变换光谱仪^[26-27],在 $100\sim 1\ 000\ \text{cm}^{-1}$ 的光谱范围内拥有高达 $0.65\ \text{cm}^{-1}$ 的光谱分辨率。国外很多公司研制的干涉仪光谱仪,其商业化产品已经拥有很高的光谱分辨率,像德国 Bruker 公司生产的商业光谱仪的光谱分辨率已达到 $0.000\ 9\ \text{cm}^{-1}$ 。国内很多科学学者对基于时间调制的直线型干涉光谱成像技术做了详细深入的研究。我国主要是从 20 世纪 70 年代后期开始引进干涉式光谱仪,受限于该类型仪器的技术难度,多年来一直依靠进口,商用化程度很低。直到 2016 年,我国发射了“风云四号”,其上搭载了一台中国科学院上海技术物理研究所研制的时间调制型干涉式大气垂直探测仪(Geosynchronous Interferometric Infrared Sounder, GIIRS),技术方案及实物结构如图 4 所示,这是国际上首台工作于地球静止轨道上的干涉式红外高光谱大气探测仪,GIIRS 的主要任务是对地球温度和湿度进行三维立体垂直探测,其基本原理是基于 Michelson 干涉仪的工作方式,通过前置扫描反射镜将地球的目标辐射反射到前置望远镜系统实现干涉成像。系统分束器采用硒化锌分光,主要探测波段为 $8.85\sim 14.3\ \mu\text{m}$ 、 $4.44\sim 6.06\ \mu\text{m}$,双通道探

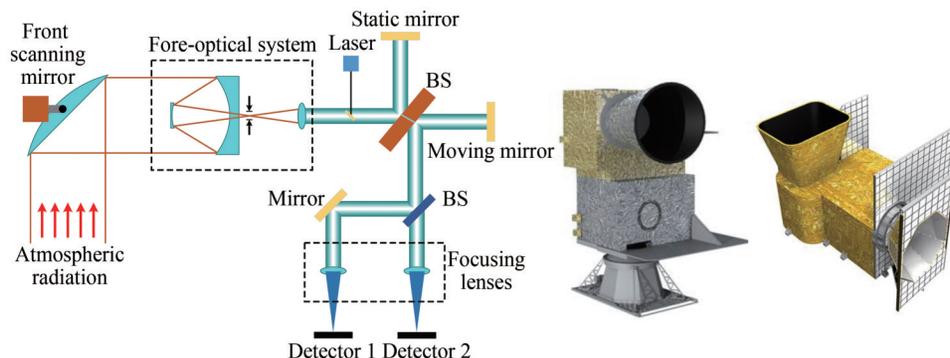


图4 “风云四号”上的时间调制型干涉式大气垂直探测仪原理示意图
Fig.4 Schematic diagram of technical principle and structure of GIIRS

测器都为4列32元,利用激光进行精确定标系统光程差,且和红外波段共光路,干涉仪动镜系统采用挠性无磨损结构,该干涉仪的光谱分辨率达到了 0.625 cm^{-1} ,可以进行全员盘、区域、太阳回避、定标以及指向等多种模式的探测,在气象、航天等领域中具有重要的实用意义^[28-31]。

中国科学院西安光学精密机械研究所杨庆华2008年以来系统地研究了时间调制型干涉光谱成像仪的诸多技术难点,详细分析了针对干涉光谱仪的动镜发生倾斜、横移、匀速性误差以及探测器发生非线性响应等引起的干涉图产生畸变等关键技术问题,首次提出了双平面动镜、双面反射动镜、新型双猫眼动镜以及新型双角锥棱镜等四种新型干涉仪结构,取得了一系列创新性成果^[32-36]。西安交通大学和中国科学院西安光学精密机械研究所于2009年联合提出了一种基于Michelson干涉仪原理的楔形棱镜扫描时间调制型干涉光谱仪,该技术基于Michelson干涉仪结构,在每一个干涉臂中都插入一块楔形棱镜,通过移动楔形棱镜完成位相扫描^[37]。

1.2 摆动运动形式

摆动运动式干涉光谱仪采用动镜摆动的方式代替直线运动形式,是Michelson干涉仪的一种变体结构。1997年加拿大瓦尔卡梯尔国防研究机构报道了一款基于角锥棱镜摆动双光束干涉光谱仪,紧凑型大气探测干涉仪(Compact Atmospheric Sounding Interferometer, CATSI),CATSI的角锥棱镜摆动机构将两个角反射镜固连在一起同时摆动,消除了由运动引入的误差,该系统在 $3\sim 18\text{ }\mu\text{m}$ 的光谱范围内拥有不小于 1 cm^{-1} 的光谱分辨率,其光学原理结构如图5所示,该装置的主要缺点是摆镜在往复摆动过程中需要驱动器对其不断地进行加速和减速,这种类型的干涉仪结构难以实现高速测量^[38]。日本于2009年在种子岛宇宙中心用H-IIA运载火箭发射了世界上首颗用于监测全球温室气体分布的卫星GOSAT(Greenhouse gases Observing SATellite),其上搭载了一台摆镜式干涉光谱仪Thermal And Near infrared Sensor for carbon Observation-Fourier Transform Spectrometer(TANSO-FTS),主要用来监测三个窄带

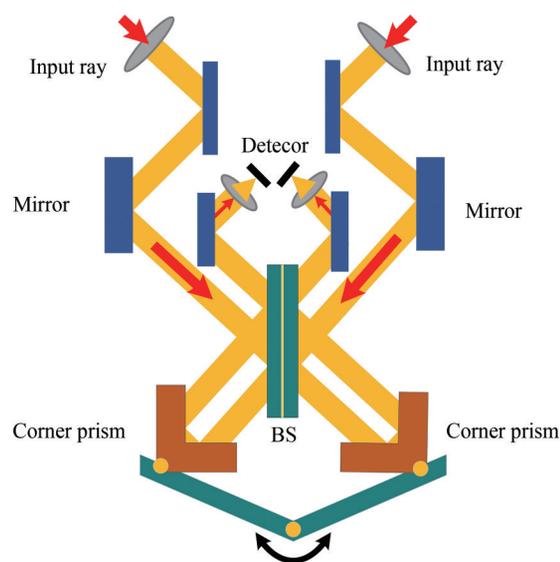


图5 双光束干涉光谱仪CATSI光学原理示意图
Fig.5 Diagrammatic sketch of double ray interference spectrometer CATSI

($0.76\text{ }\mu\text{m}$ 、 $1.6\text{ }\mu\text{m}$ 、 $2.0\text{ }\mu\text{m}$)以及 $5.5\sim 14.3\text{ }\mu\text{m}$ 范围内的温室气体吸收光谱,且拥有 0.2 cm^{-1} 的光谱分辨率^[39]。作为干涉光谱技术的代表,加拿大ABB Bomem公司和德国Bruker公司都有一系列摆动式干涉光谱仪,该类型的光谱仪受到航天航空、石化、制药、环境大气监测等领域的广泛赞誉^[40]。这种通过摆动方式形成连续变化光程差的干涉光谱仪虽然具有结构紧凑、重复性好、稳定性强的优点。但是,系统的机械扫描速度相对较低,而且通过摆动形成的非线性光程差需要后期复杂的理论计算修正,或者在光路中增加激光辅助光路进行非线性校正;同时,摆动结构的幅度有限,而且角锥棱镜的顶点要对齐,否则干涉信号的调制度就会快速下降,甚至干涉信号完全消失,所以该类型系统形成的光程差也十分有限,以至于这种摆动式干涉光谱仪的最高光谱分辨率也不会太高。我国于2018年5月9日发射的“高分五号”卫星上搭载了一台大气环境红外甚高光谱分辨率探测仪(Atmospheric Infrared Ultra-spectral Sounder, AIUS),该探测器具有光谱分辨率高、太阳跟踪精度高、光谱定标精度高的技术特点,其光谱范围为 $2.4\sim 13.3\text{ }\mu\text{m}$,光谱分辨率为 0.03 cm^{-1} ,可以探测超过11万个谱段的信息,目前该技术指标处于国内最高、国际先进水平。为了提高光谱分辨率,AIUS探测仪采用干涉光谱技术,利用双角镜联动结构与一块平面镜使系统的光程放大8倍。高稳定性摆臂运动控制机构使摆臂速度的不稳定性优于 0.3% ,进而大幅降低了微振动对干涉仪机构运动均匀性的影响^[41-42]。

1.3 转动运动形式

时间调制型旋转运动式干涉光谱仪包括透射式和反射式两种类型。系统中没有直线运动或摆动运动

中动镜启停加速与减速环节,大幅提高了动镜干涉仪的时间分辨率,可以进行高速采样。1997年,美国D&P公司报道了一款用于化学分析的高分辨高速透射式转动干涉光谱仪(Rotary Turbo Fourier Transform Spectrometer, RTFTS)^[43],在2~14 μm 的光谱范围内可以最大达到 2 cm^{-1} 的光谱分辨率,系统分束单元采用硒化锌晶体,光学示意如图6所示,当经过分束的入射光和透射光分别经过旋转的转镜时,由于两束光入射到转镜上的角度不同,进而使两束光之间形成了连续变化的光程差,随着转镜的转动,系统产生的光程差也在发生连续变化。RTFTS中唯一的运动部件就是由高速转动的驱动轴带动的转镜,转镜在每个周期中有四个零光程差点,即系统在一个转动周期可以实施四次采样。该仪器的探测速度快、实时性好、稳定性高,但是由于转镜材料会对不同波长的光引起不同的光程差,对转镜材料的选择提出了更高的要求,而且转镜的转角越大,非线性也越大,需要在后期数据处理中进行补偿。

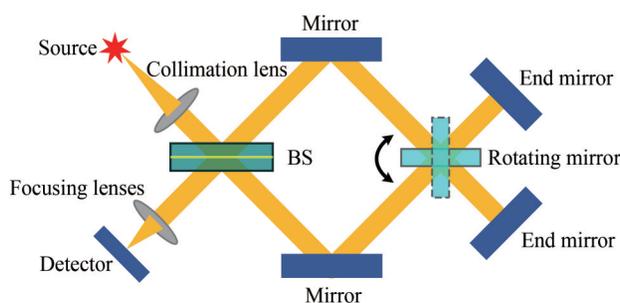


图6 转镜式干涉光谱仪光学原理示意图

Fig.6 Optical principle of rotating mirror interference spectrometer

国内很多科研工作者对透射式和反射式的转镜干涉系统都做过详细的研究。2004年,中国科学院西安光学精密机械研究所杨晓许等基于WADSWORTH W的研究模型,对转镜式干涉光谱仪的光程差非线性问题进行了详细研究^[44],提出对转镜式干涉光谱仪进行非线性补偿,可以在一定程度上拓展所需转镜材料的折射率、工作入射角等关键参量的选择余地,在干涉仪研制过程中具有重要的参考意义。1999年,GRIFFITHS P提出了一种高速转镜式时间调制干涉成像光谱仪^[45],该方案采用了稳定的转镜系统,其光学结构原理如图7所示,但是该方案适合于点目标光谱测量,如果成像就必须进行推扫,扫描效率较低。张文喜等在2006年基于Griffiths干涉仪原理提出了一种高速转镜干涉光谱成像仪设计方案^[46],其原理如图8所示,利用角锥棱镜代替平面反射镜,利用高速电机带动一个梯形平面反射镜高速转动,使双光束产生稳定周期性的光程差,而且该方案的视场角较大,能够同时获得一个面的干涉图,从而大大提高了光谱仪的扫描效率,适用于机载和星载成像光谱仪。

2011年,中国科学院西安光学精密机械研究所魏儒义基于马吕斯定律的光线追迹法以及镜面成像原理的像点法,详细研究了反射式转镜干涉光谱仪的光程差,并给出了任意测量时刻双光束的光程差表达式,也

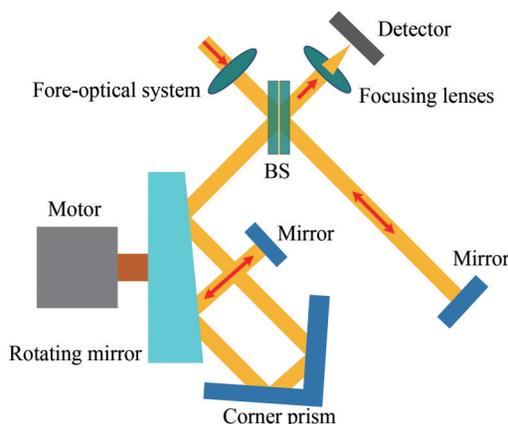


图7 超速扫描干涉仪二维示意图

Fig.7 Schematic diagram of overspeed scanning interferometer

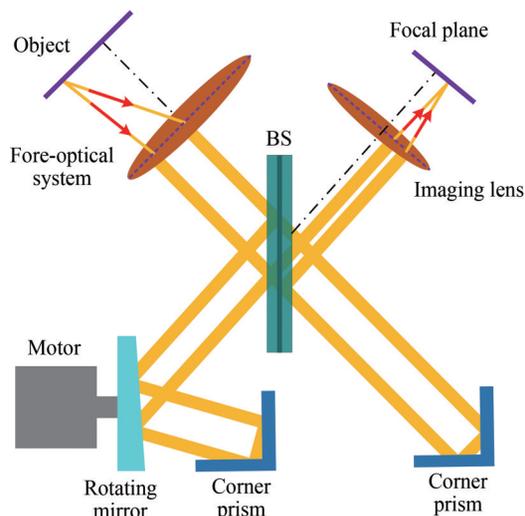


图8 高速转镜干涉光谱成像仪光学原理
Fig.8 Ultra-rapid-scanning imaging interferometer

指出了影响系统光程差的外部条件^[47]。2014年,魏儒义又利用一台自研的反射转镜式红外干涉光谱仪对一定时段内地表大气中CO₂的含量进行了观测和浓度反演,该反射转镜式干涉光谱仪在3.17~4.76 μm的光谱范围内实现2 cm⁻¹光谱分辨率,探测频率为0.5~4 s⁻¹,测量结果表明测量大气成分的精度可以达到10⁻⁶级^[48]。2018年,中国电子科技集团41所胡德信等,报道一种基于转镜的Michelson干涉光谱仪,系统结构如图9所示,通过旋转透射式转镜使系统光程差发生变化,并提出光程差的非线性数学计算模型,建立了转镜光程差方程^[49]。

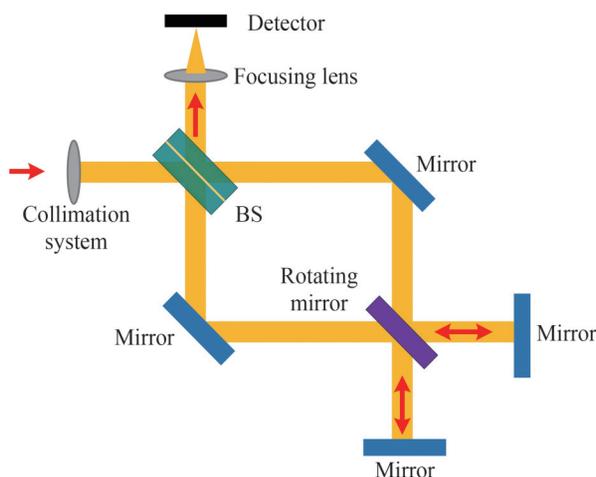


图9 基于转镜的Michelson干涉仪光学原理示意图
Fig.9 Optical principle of Michelson interferometer based on rotating mirror

以上分析也可以看出,无论是直线式、摆动式还是旋转形式的时间调制型干涉光谱仪,都有其明显的优点,但也有不可避免的劣势。首先,时间调制型干涉光谱仪需要一套机械结构精度相当高的动镜控制驱动系统。经分束器的反射光和透射光在探测器上发生干涉时,非常容易受到系统机械振动和环境温度起伏引起的影 响,导致干涉图不稳定,进而调制度下降。所以,该类型的干涉技术对系统的机械性能要求非常严格,进而为系统的结构装调带来很大的难度。其次,时间调制型干涉光谱仪想要得到一幅完整的干涉图,就需要探测器记录扫描动镜在每一个时间序列的干涉图样,所以不能满足实时光谱测量的要求。另外,直线式和摆动式干涉光谱仪的扫描动镜在往复扫描过程中,机械结构在扫描结束时必须减速转向,待速度稳定后再采集数据,一般情况下系统中都要需要引入参考激光提供相干采样图谱,如果动镜的扫描频率很高,那么动镜往返转折占用的时间会急剧增加。最后,从技术原理上来看,改进型的摆动或旋转式干涉光谱仪,其

主要思路还是通过改变动镜的机械结构驱动方式,使扫描动镜通过往复摆动或旋转运动代替传统的直线运动,这种改进类型干涉仪的动镜转动速度和旋转角度容易得到控制,进而可以得到高稳定性的干涉光谱,因而干涉系统也具有相对较强的抗干扰能力,在采集数据时系统也比较稳定。但是,一般来说,摆动式干涉仪的动镜产生的光程差为与波长相关的非线性函数,而且动镜摆动幅度很有限,所以系统的光谱分辨率也受限;旋转式干涉仪双光束产生空间三维的光线,光程差越大所需光程越长,光学设计难以实现,因而双光束产生的光程差也不会很大。

目前,时间调制型干涉光谱仪已经越来越成熟,市场上商业化应用的厂家也很多,而且随着精密机械、气浮导轨、音圈电机、压电陶瓷堆等技术的发展,扫描反射动镜可以实现高精度长距离移动,进而使这种类型仪器有着很高的光谱分辨率。一般来说,大气组分的精细结构探测要求仪器的光谱分辨率不小于 0.05 cm^{-1} ,时间调制型干涉光谱技术可以满足该要求,所以该类型仪器至今在天气预报、大气组分监测等高光谱分辨率领域中占有极为重要的地位。目前,美国、加拿大、法国、德国、日本、中国等国家都发射过多颗该类型的大气探测仪,例如美国的 Atmospheric Trace Molecule Spectroscopy (ATMOS)、Tropospheric Emission Spectrometer (TES)、Geosynchronous Imaging Fourier Transform Spectrometer (GIFTS),日本的 Thermal And Near infrared Sensor for carbon Observation (TANSO-FTS),加拿大的 Atmospheric Chemistry Experiment Fourier Transform Spectrometer (ACE-FTS)等。

2 空间调制型干涉光谱成像仪

为了回避时间调制型干涉光谱成像仪中精密动镜系统不稳定性引入的技术难题,随着大面阵探测器技术高速发展,20世纪80年代研究者提出了空间调制干涉光谱成像技术^[50],这种类型的干涉光谱成像仪通过一次曝光就可以在探测器阵列的不同位置上得到目标辐射各个光谱干涉图样的线性叠加,视场内不同被测目标引起的光程差干涉信息记录在探测器靶面上不同的像元位置上,面阵探测器获得被测目标的一维空间信息和一维光谱信息,再利用时间扫描获得另一维的空间信息。三维数据立方体的每一帧图像都包含有被测目标的二维空间信息和一行光谱信息,将三维数据立方体内相同干涉级次的干涉图像进行拼接得到目标物体的全景图像。这种空间信息获取方式大幅提升了系统探测目标的实时性,也被称为静态干涉光谱成像系统。到20世纪90年代初,空间调制型干涉光谱成像技术得到了高速发展,最初主要形成了两类具有代表性的技术方案:

一类是以变形的 Sagnac 原理半五角棱镜横向剪切分束器为分光元件^[51],其原理是在一个宽谱段光学系统中插入横向剪切干涉仪,具有成像和干涉双重功能,系统主要由前置物镜、插入的横向剪切干涉仪、后置的傅里叶变换物镜、柱面镜以及面阵探测器组成。被测目标的辐射光经过前置光学系统被聚焦,焦面上置狭缝,目标辐射经过焦面狭缝后进入横向剪切干涉仪,在垂直于光轴的方向上,狭缝被横向剪切成两个虚像,从干涉仪出射带有横向剪切量的两束光被后置成像镜组准直后进入探测器。成像镜组中傅立叶成像镜不仅要满足空间分辨率,在光谱方向上还要满足正弦条件,因此,傅立叶成像镜必须要对两对物像的共轭位置进行像差控制。为了获取目标在空间方向的信息,目标辐射经过傅立叶成像镜准直后,还需要经过柱面镜聚焦。柱面镜是一个非回转对称的光学系统,在装调过程中,柱面镜绕光轴的转动误差会最终降低探测器上的干涉图调制度,所以柱面镜对系统的空间分辨率和干涉图调制度有重要的制约作用,其光学原理如图10所示。系统在一次像面处设置狭缝,但是该狭缝的宽度只与系统的一维空间分辨率有关,因此降低了设计难度。如果狭缝中每一物点发出的光都沿着相同方向入射到横向剪切分束器上,那么出射光之间的光程差为零,光束的干涉位置在探测器的同一位置上,这种情况下,狭缝的宽度和形状不会影响干涉图的调制度发生变化。然而,假设狭缝中每一物点发出的光束都以不同角度入射到横向剪切分束器上,那么被横向剪切的两光束出射光之间存在一定的光程差,最终带有光程差的干涉图形成在探测器的不同位置上。与时间调制型干涉光谱成像技术的原理类似,以变形 Sagnac 原理为分光元件的空间调制型干涉光谱成像技术也具有多通道、高通量和高信噪比的优点,而且这种共光路、无精密扫描动镜型干涉光谱成像仪的稳定性、抗干扰能力更强,且具有实时性,可以测量动目标物体的光谱。然而,系统中存在的狭缝在很大程度上限制了光通量,且光谱分辨率与空间分辨率之间存在制约关系。

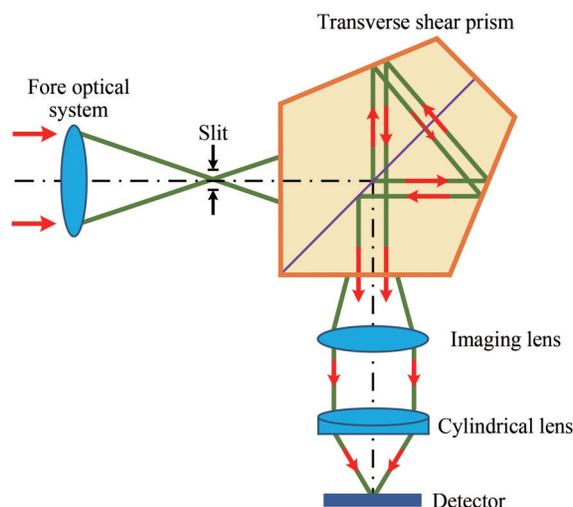


图10 基于Sagnac横向剪切分束器的空间调制干涉光谱成像仪光学原理示意图

Fig.10 Spatial modulation interference spectral imager based on Sagnac transverse shear beam splitter

另一类空间调制型干涉光谱成像技术是以双折射晶体 Wollaston 棱镜为分束元件,即双折射偏振干涉光谱成像技术,SMITH W 等在 1996 年提出的数字阵列扫描干涉光谱成像仪(Digital Array Scanned Interferometer, DASI),就是典型的基于 Wollaston 偏振棱镜空间调制型干涉光谱成像仪^[52],其光学原理如图 11 所示,被测目标辐射经过前置光学系统后成像于狭缝处,然后依次经过准直镜、起偏器后入射到 Wollaston 偏振棱镜上,从 Wollaston 偏振棱镜出射的寻常光(Ordinary ray)和非寻常光(Extraordinary ray)具有相同的光强度,接着这两束光经过检偏器后调制为偏振方向相同、相位差固定的相干光束,依次通过成像物镜和柱面镜,最后在阵列探测器上得到带有目标干涉信息光谱图,再经过傅里叶变换得到干涉图。

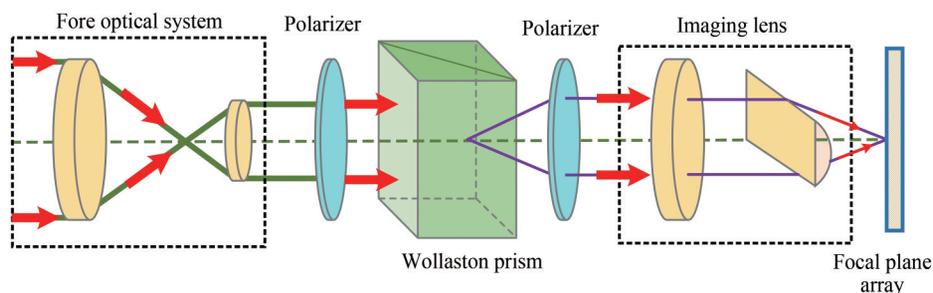


图 11 DASI 光学原理示意图

Fig.11 Optical principle of the DASI

1993 年,美国夏威夷大学与佛罗里达工学院联合报道了一款基于 Sagnac 横向剪切原理的傅里叶变换干涉光谱成像仪,系统没有移动部件、拥有较大的视场角,在 $1\sim 5\ \mu\text{m}$ 的光谱范围内拥有 $100\sim 1\ 000\ \text{cm}^{-1}$ 的光谱分辨率^[53]。1995 年 Kestrel 公司与佛罗里达工学院有联合研制了一款机载空间调制的干涉光谱成像仪,采用 Sagnac 分光原理,在 $440\sim 1150\ \text{nm}$ 的光谱范围内具有 256 个光谱通道,在 $450\ \text{nm}$ 处拥有 $5\ \text{nm}$ 的光谱分辨率,视场角为 15° ,帧频 30 fps,该系统被搭载在赛纳斯 206 小型飞机上应用于环境测绘、应急响应以及军事行动中。美国于 2000 年 7 月发射了一颗强力小卫星(Mightysat-II),搭载了一台基于 Sagnac 横向剪切原理的空间调制干涉成像光谱仪,属于技术试验卫星,寿命为 1 年^[54]。我国紧跟国外研究步伐,开展了一系列空间调制型干涉光谱成像方面的研究工作。中国科学院西安光学精密机械研究所是国内最早对空间调制型干涉光谱成像技术进行研究的单位之一,在此领域作了许多开创性的工作,一些研究成果已达到国际先进水平。我国首颗月球探测卫星“嫦娥一号”搭载的干涉光谱成像仪是一个 Sagnac 型横向剪切共光路实体干涉仪,这是国际上首次利用干涉光谱成像技术对月球进行可见光/近红外连续宽谱段光谱探测^[55]。干涉仪为二次成像光学系统,狭缝位于一次像面上,同时也位于傅里叶变换成像物镜的前焦面上,前置物镜为像方远

心,傅里叶变换成像物镜为物方远心,柱面镜将平行光压缩与面阵探测器的一列对应,光学原理与图10类似。获得的中高纬度清晰多光谱图像表明,“嫦娥一号”搭载的干涉光谱成像仪具有很强的力学与温度环境适应能力,在国际上第一次获取到 $0.48\sim 0.96\ \mu\text{m}$ 范围内32个谱段的连续光谱图像,为研究月表物质成份提供了具有自主知识产权的原生信息源,打破了光谱数据源被国外控制的局面。“嫦娥一号”搭载的干涉光谱成像仪结构实物以及获取的月面区域光谱图像分别如图12、图13所示。



图12 “嫦娥一号”搭载的干涉光谱成像仪结构实物
Fig.12 Structure diagram of interference spectral imager carried on Chang'e-1

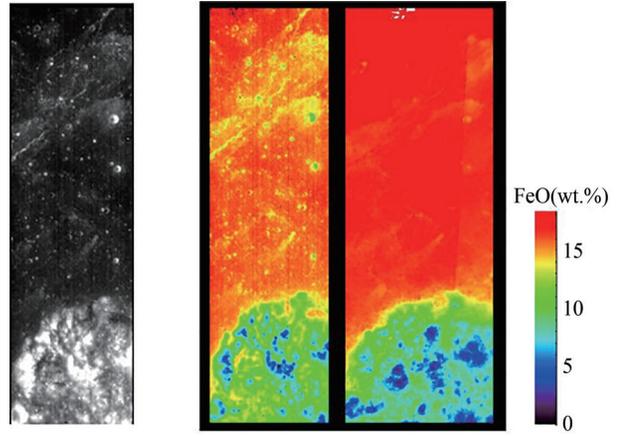


图13 “嫦娥一号”搭载的干涉光谱成像仪获取的月面区域光谱图像
Fig.13 Spectral image of an area on the lunar surface obtained by interference spectral imager carried on Chang'e-1

2008年9月6日,在太原卫星发射中心通过一箭双星方式将首颗环境减灾A、B星送入太空,中国科学院西安光学精密机械研究所研制的空间调制干涉光谱成像仪(Environment & Disaster Monitoring Imaging Spectrometer, EDMIS)搭载其上^[56-58],EDMIS是国内首次采用了静态干涉光谱成像技术原理的卫星,也是继美国强力小卫星之后,国际上第二台该技术原理的相机,系统采用了实体Sagnac横向剪切干涉技术,具有稳定高的优点。在干涉仪中使用了傅里叶变换成像物镜和柱面镜的组合,经过傅里叶变换成像物镜准直的光束再经过柱面镜聚焦后,光路转折 90° ,最后探测器获得被测目标的空间干涉信息。EDMIS在轨的主要技术指标见表1,EDMIS的结构实物以及获取的不同波段下地物目标三维数据立方体如图14、15所示。

干涉光谱成像技术的干涉图采样点应满足采样定理,如果要得到很高的光谱分辨率,就需要大量的干

表1 EDMIS的主要技术指标

Table 1 Main technical specification of interferometer

Parameter	Value
Orbit altitude/km	650
Width/km	50
Spectral range/ μm	0.45~0.95
Number of channels	115
Average spectral resolution/nm	4.57
Spatial resolution/m	100
Field of view/ $^\circ$	$-30\sim +30$
Semaphore/bit	12
Spectral signal to noise ratio	>50
MTF	0.24
Radiometric calibration accuracy	Relative value 2.4%, Absolute value 8.2%
Raw data rate/Mbps	107.8
Compressed data rate/bps	65.7
Mass/kg	50.78
Power/W	Short-term 54.6, long-term 15
Service life/year	3

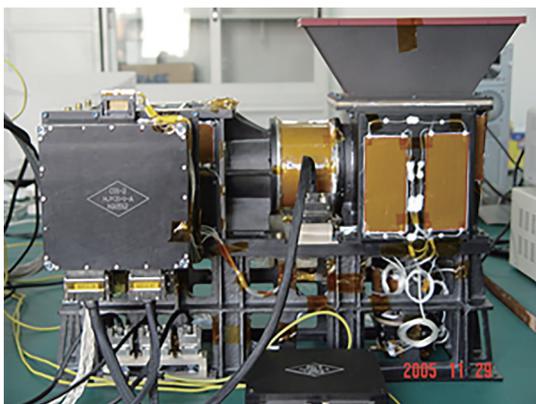


图 14 EDMIS 的结构实物图
Fig.14 Structure diagram of EDMIS

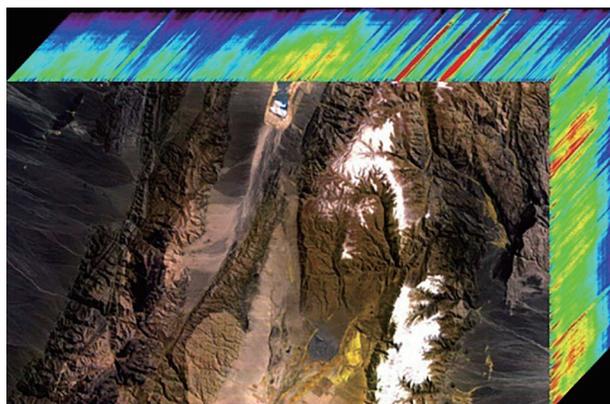


图 15 EDIS 获取的地物目标三维数据立方体
Fig.15 Three dimensional data cube of ground object obtained by EDIS

涉图采样点,进而导致探测器阵列尺寸和系统体积增大。为了改进这种技术,20世纪70年代,一种新型的干涉技术——空间外差光谱技术应用而生。空间外差光谱仪基于闪耀光栅在 Littrow 波数产生零频干涉,在相同的探测器采样数目下,具有更高的分辨率。该技术因其高通量、无运动部件、高光谱分辨率、无谱段限制等优点,主要被应用于高光谱分辨率的微弱辐射探测,在大气、空间、天文领域有广阔前景。空间外差光谱技术的基本光学原理如图 16 所示。1971年,大阪大学率先提出了空间外差光谱技术概念^[59],随着光学、电子学、精密机械、计算机信息技术的大力发展,不同结构类型的空间外差光谱仪相继问世,并于20世纪90年代得到高速发展,国外研究空间外差光谱技术的单位主要有美国的威斯康星大学^[60]、NASA 和海军研究实验室(Naval Research Laboratory, NRL)^[61-64]、美国洛斯阿拉莫斯国家实验室^[65-66]、加拿大航天局^[67-68]以及日本等国的一些研究单位。目前,该技术已经被应用于化学气体监测、星际物质辐射遥感探测、中层大气自由基探测、微波临边探测、高空水汽监测以及地球热层风场监测等领域中。国内,苏州大学沈为民于2000年进行了空间外差光谱技术理论研究^[69]。中国科学院安徽光学精密机械研究所叶松等在2006年研制完成了空间外差光谱技术原理实验装置^[70-71],2008年研制完成一体化空间外差干涉仪,并于2012年进行样机试飞,取得了理想实验结果^[72-74]。中国科学院西安光学精密机械研究所冯玉涛团队多年来一直从事空间外差光谱仪相关研究工作,近年来,在宽谱段空间外差光谱技术和多普勒非对称空间外差光谱技术领域取得了诸多研究成果,如静态谱段拓展、基于数值归纳的视场展宽设计、多普勒差分干涉相位准确表达以及反演相位不确定度与干涉图数据质量相关性等理论成果^[75-81],并突破了实体差分干涉仪设计及研制工艺,研制了可见光、近红外、长波红外等多台空间外差光谱仪,研制的实体差分干涉仪及不同波段的多普勒差分光谱仪如图 17 所示。

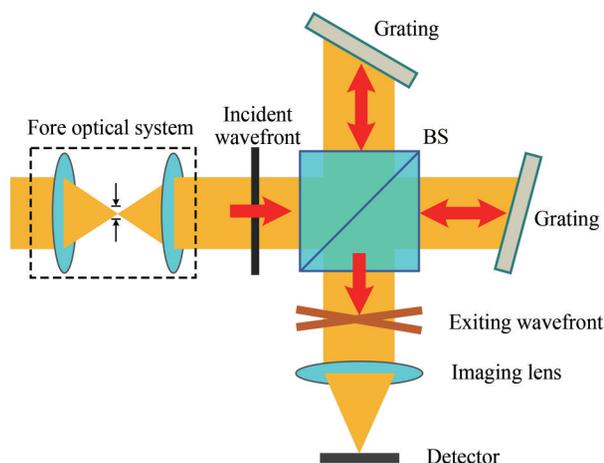


图 16 空间外差光谱成像技术基本光学原理示意图
Fig.16 Schematic diagram of basic optical principle of spatial heterodyne spectral imaging technology

中国科学院长春光学精密机械与物理研究所梁静秋课题组近年来针对环境、医疗、空间、气象及安全等领域对干涉光谱仪微小化、轻量化及固态化的迫切应用需求,研制了多种类型的多级阶梯微反射镜空间调制型傅里叶变换光谱成像仪原理样机,其光学原理如图 18 所示,该技术基于 Michelson 干涉仪,利用一个低阶梯多级微反射镜和一个高阶梯多级微反射镜正交放置,分别代替 Michelson 干涉系统中的定镜和扫描动镜,通过空间调制的方式获得矩阵分布的光程差阵列,空间上不同位置得到不同级次的干涉光信息,并按照一定的规律排列,空间上的干涉光实现不同级次的分割,从而在二维空域获得干涉图样的采样阵列。多

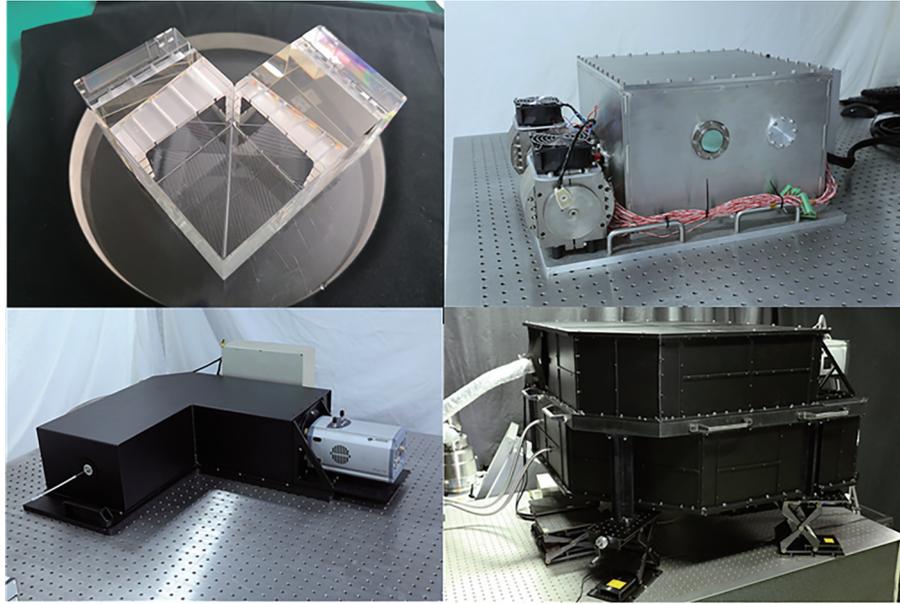


图17 实体差分干涉仪以及不同波段的多普勒差分干涉仪

Fig.17 Differential interferometer and Doppler differential interferometer with different spectral bands

级微反射镜的台阶数决定光束在空间上的分布,台阶的高度调节光束的相位,实现系统光程差的控制。系统光谱分辨率由多级微反射镜的台阶数决定,该类系统可以实现较大的光程差,因而具有较高的光谱分辨率,且具备结构紧凑小型化、稳定性好、分析精度高、实时性高等优点^[82-84]。

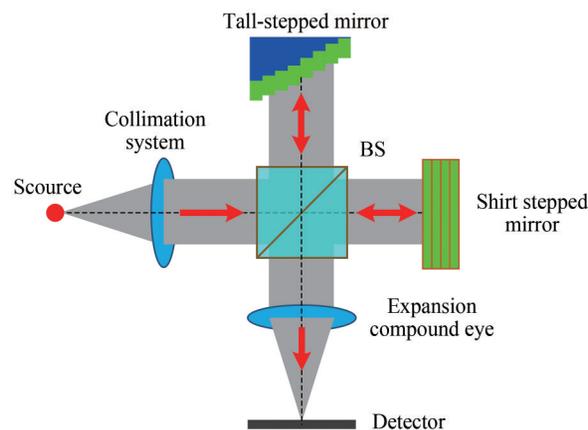


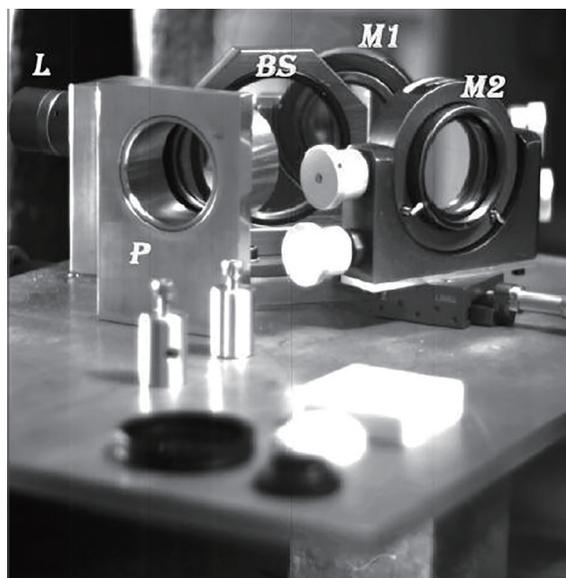
图18 基于多级阶梯微反射镜的干涉光谱仪原理示意图

Fig.18 Sketch map of working principle of multistage micro-step mirror interference spectrometer

3 时空联合调制型干涉光谱成像技术

时空联合调制型干涉光谱成像技术始于20世纪90年代后期,该技术具有高光通量、高探测灵敏度和高稳定性的优点。其光谱分光原理虽然也是基于横向剪切干涉仪,通过推扫完成干涉序列采集得到目标的完整干涉信息,但是时空联合调制型干涉光谱成像仪前置光学系统中没有狭缝,所以才具有高通量优点,也因此自诞生之时就受到科研工作者的广泛关注。1991年,德国锡根大学LINKEMANN J等将Michelson干涉仪的动镜倾斜放置,形成等厚干涉,在空间上形成光程差的调制,这是国际上首次基于时空联合调制干涉光谱成像技术获得的静态干涉图,由于其探测器靶面尺寸受限,所以光谱分辨率极其有限,随后,新泽西理工学院MÖLLER K D利用阶梯多级反射镜代替平面镜,有效解决了该问题^[85-86]。2004年意大利BARDUCCI A等基于Sagnac原理成功研制出一台对地观测静态成像干涉光谱仪(Aerospace Leap-frog Imaging Static interferometer for Earth Observation, ALISEO),探测器像元个数为 $1\,024 \times 1\,024$,像元尺寸为 $14\ \mu\text{m} \times$

14 μm ,最大帧频为 60 帧/s,视场角为 4° ,系统在 430~1 000 nm 的光谱范围内拥有 175 cm^{-1} 的光谱分辨率^[87],其结构如图 19 所示。



L: front lens; BS: beam splitter; M1, M2: mirror

图 19 ALISEO 结构示意图

Fig.19 The structure diagram of ALISEO

巴黎大学查尔斯·法布里(Charles Fabry)实验室 MATA LLAH N 等研制了一款静态干涉光谱成像仪,在 3~5 μm 的光谱范围内取得了 25 cm^{-1} 的光谱分辨率,并利用聚乙烯薄膜检验了该仪器的性能,系统结构如图 20 所示^[88]。

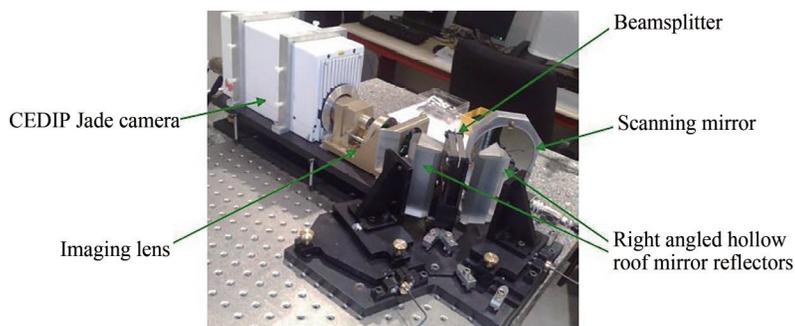


图 20 静态干涉光谱成像仪结构

Fig.20 Structure diagram of static interference imager

夏威夷地球物理和行星学研究所 LUCEY P G 等基于 Sagnac 原理研制了一台工作于长波区域的时空联合调制型高光谱成像仪(Long Wave Infrared Hyperspectral Imager, LWIR HSI),如图 21,在 7.5~11 μm 的光谱测量范围内拥有 20 cm^{-1} 的光谱分辨率,在 1 500 英尺(457.2 m)高度的地元空间分辨率为 27 cm、幅宽为 80 m,使用像元数为 256×320 的制冷碲镉汞探测器进行了对地观测,并取得了满意的测量结果^[89]。

国内具有代表性的是 1995 年中国科学院西安光学精密机械研究所相里斌研究员提出一种大孔径静态干涉光谱成像技术(Large Aperture Static Imaging Spectrometry, LASIS)^[90],LASIS 的系统结构与空间调制型干涉光谱成像仪类似,但是,其光学原理有着本质上的区别。LASIS 既有时间调制型干涉光谱成像仪高灵敏度的优点,又有空间调制型干涉光谱成像仪稳定性优点,最重要的是该系统没有狭缝和柱面镜,采用面阵探测依靠系统或在轨自身运动获取两维空间信息和另一维的光谱信息,面阵探测器靶面上得到的不仅有目标图像,还叠加了飞行方向上目标单元不同光程差的干涉条纹。LASIS 的能量利用率可以比拟普通照相系统,最大光谱分辨率主要与探测器像元数有关。2008 年以后,LASIS 原理进入了发展和提升阶段,欧美相



图 21 LWIR HSI 结构

Fig.21 Structure diagram of LWIR HSI

继出现相关报道,西安光机所成功研制了我国第一台高分辨率对地光谱成像仪,也是世界上首次采用 LASIS 原理的星载高光谱成像仪,并于 2012 成功发射并投入使用。2020 年 9 月 27 日环境减灾二号 A、B 卫星成功发射,用于接替已经在轨运行 12 年之久的环境减灾一号 A、B 星,其上搭载了中国科学院西安光学精密机械研究所研制的可见/近红外、短波红外两台高光谱成像仪,采用了时空联合调制干涉光谱成像技术,由前置望远镜光学系统、半五角棱镜胶合的横向剪切干涉仪、傅里叶成像物镜及面阵探测器四大部分组成,其中前置望远镜光学系统的主要作用是压缩来自目标光束的孔径尺寸匹配横向剪切干涉仪,进而可以缩小干涉仪的体积,其光学原理如图 22 所示。可见/近红外、短波红外两台高光谱成像仪的视场中心侧摆范围为 $\pm 30^\circ$,空间分辨率分别为 48 m、96 m,在可见/近红外区域($0.45\sim 0.92\ \mu\text{m}$)具有 100 个光谱通道,短波红外区域($0.9\sim 2.5\ \mu\text{m}$)具有 115 个光谱通道。环境减灾二号 A、B 星相比于环境减灾一号 A、B 星的技术性能有大幅提升,像元空间分辨率提高 1~2 倍,高光谱视场、光谱通道数都增加了 1 倍。环境减灾二号 A、B 星目前已经组网运行,这种基于 Sagnac 实体横向剪切干涉仪的时空联合调制型干涉光谱成像技术具有稳定性好、体积小、光谱范围宽以及光谱线性度高等特点,同时也验证了该技术可被应用于航空航天领域执行日常监测或者应急监测等任务。环境减灾二号 A、B 星结构示意图如图 23 所示,可见/近红外、短波红外对某地推扫的伪彩色三维数据立方体分别如图 24、25 所示。

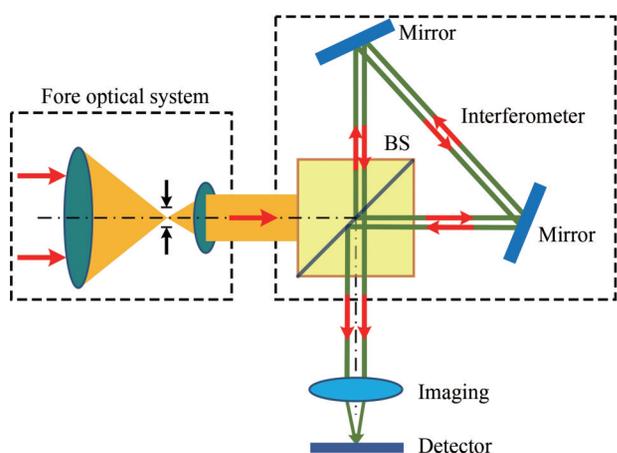


图 22 基于时空联合调制型干涉光谱成像技术的 LASIS 光学原理示意图

Fig.22 Schematic diagram of LASIS based on spatiotemporal joint modulation interferometric spectral imaging technology



图 23 环境减灾二号 A、B 星可见-近红外、短波红外高光谱成像仪结构

Fig.23 Structure diagram of visible near infrared and shortwave infrared hyperspectral imager of the HJ-2A/B satellites

基于双折射晶体的干涉光谱成像仪也是一种具有代表性的时空联合调制干涉光谱成像仪。近年来西安交通大学张淳民教授团队研制了一系列静态偏振光谱成像仪^[91-93],包括国际上首台以 Savart 棱镜为分光

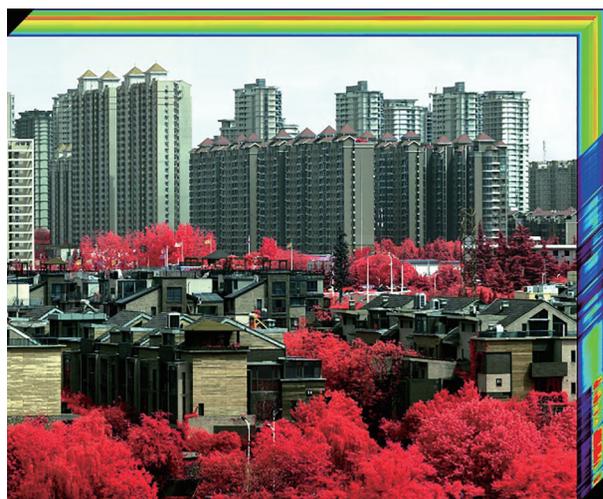


图 24 环境减灾二号可见/近红外地面推扫伪彩色三维数据立方体

Fig.24 Pseudo color three dimensional data cube obtained by HJ-2A/B within visible to near infrared spectral range



图 25 环境减灾二号短波红外地面推扫伪彩色三维数据立方体

Fig.25 Pseudo color three dimensional data cube obtained by HJ-2A/B within the short wave infrared spectral range

元件的偏振型干涉光谱成像装置(Static Polarization Interference Imaging Spectrometer, SPIIS),装置具有高通量、无狭缝、高稳态、无运动部件、小体积以及低功耗等优点;然后基于 SPIIS 原理,采用 Savart 偏振棱镜完成了超小型稳态偏振干涉成像光谱仪(Ultra-compact Static Polarization Interference Imaging Spectrometer, USPIIS),在实验室进行了在轨卫星推扫模拟实验,得到了干涉图;随后为了扩大视场,又提出了稳态大视场偏振干涉光谱成像仪(Static Larger field of view Polarization Interference Imaging Spectrometer, SLPIIS)研制方案,取得了一系列研究成果。静态偏振光谱成像仪 SPIIS、USPIIS 以及 SLPIIS 的光学原理如图 26~28 所示。

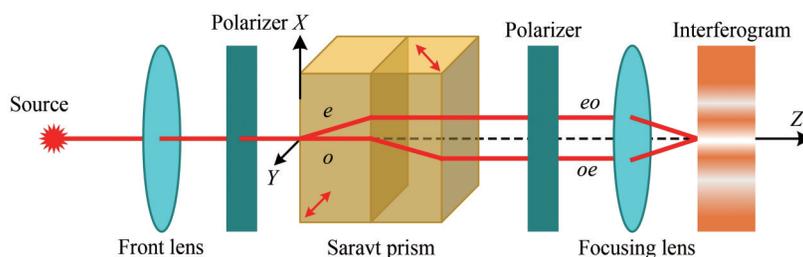


图 26 SPIIS 光学原理示意图

Fig.26 Schematic diagram of optical principle of SPIIS

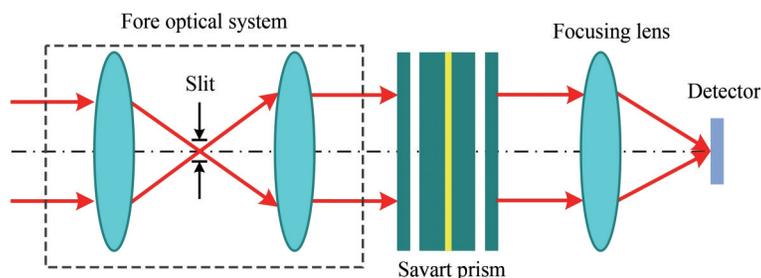


图 27 USPIIS 光学原理示意图

Fig.27 Schematic diagram of optical principle of USPIIS

将干涉光谱成像技术与偏振探测技术相结合得到干涉光谱偏振成像技术,其主要技术思路是在光路中加入偏振成像组件。南京理工大学多年来一直致力于该方面的相关研究^[94-98],研究了基于紧凑型双折射干

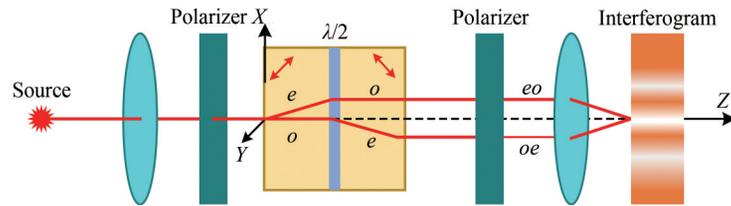


图 28 SLPIIS 光学原理示意图

Fig. 28 Schematic diagram of optical principle of SLPIIS

涉的干涉光谱成像仪。基于 Sagnac 干涉模型,利用微偏振阵列对四个通道上的线偏振光进行调制得到了四维干涉偏振光场,探测器靶面上相邻的四个像元采集不同线偏振态的干涉图像,同时得到干涉信息和偏振信息;基于 Wollaston 偏振棱镜,采用铁电液晶和波片,实现了斯托克斯参数快速获取。这种类型的偏振探测干涉技术也存在一定程度上的技术壁垒,例如时域调制的探测效率较低、频域调制光谱分辨率较低通道之间容易产生混叠、空域调制图像分辨率低。如何实现大视场、高通量、快速探测是该类型技术的重要研究方向。

4 总结与展望

干涉光谱成像技术经历了数十年的经验积累与技术发展,随着技术革命不断更新,应用需求相互促进、相互推动,其在光谱分辨率、空间分辨率、定标的可靠性和一致性等方面已能够满足部分实际环境的应用需求。目前,在深空天文系外星探索、大气污染及水体环境监测、地表地矿勘查、农业草地森林植被普查、化学结晶聚合及相位变化观测、连续流量分析、衰变研究、物质燃烧、分子间取向及作用力观测、转动光谱、碰撞诱导光谱、微量采样、痕迹量分析以及在侦察评估等领域都具有广泛且成熟的应用。

基于光程获取方式类型,文章对干涉光谱成像技术进行了总结,并对几种重要类型进行了原理介绍。时间调制型干涉光谱成像技术在探测器上采集到的干涉图可以被看作是一个时间序列,干涉图随着时间变化被采集,这种类型干涉技术具有很高的光谱分辨率和探测灵敏度,但是,在干涉系统中需要有连续运动的精密动镜控制部件,制作高精密切扫描部件是时间调制型干涉光谱成像仪的主要技术难点。空间调制型干涉光谱成像技术中探测器记录的干涉图是经过一次曝光而得到的,被测目标的干涉信息因光程差的不同被记录在探测器的不同像元位置处,通过一次曝光就可获得被测目标的完整干涉图,提高了光谱信息获取的实时性,该技术从根本上避免了时间调制型光谱成像技术中制作精密动镜控制系统的难题。但是,探测器像元个数决定了空间调制型干涉光谱成像仪的干涉图截断程度,相对来说,每条谱线被展宽的程度要大于时间调制型干涉光谱成像仪,而且其光谱分辨率也没有时间调制型干涉光谱成像仪高。时空联合调制型干涉光谱成像技术的本质是在摄像系统中插入一个横向剪切干涉仪,由于其前置光学系统没有狭缝,所以时空联合调制型干涉光谱成像仪不仅拥有高探测灵敏度、高稳定性和高信噪比的特点,还具有高光通量的优点。可以看出来,不同的调制方式采用不同的光路结构,每种分光原理在使用时各有利弊,进而适合不同的应用领域。例如,基于空间调制型和时空联合调制型干涉光谱仪的光程差受探测器靶面尺寸制约不可能很大,光谱分辨率也有限,所以只能应用于中低分辨率环境,而且焦平面阵列的功耗相对较高,低温制冷技术也将是一个极大挑战。所以,对于大气遥感探测或者需要高光谱分辨率的情况下,时间调制型干涉光谱仪是必然的选择。干涉光谱成像技术的研究一直备受关注,相关新技术的出现往往非常引人注目。近二十年来,干涉光谱成像光谱技术在对地遥感、大气监测等领域中都得到高速发展,正逐步成为高分辨探测的有效工具,随着探测器焦平面阵列、精密机械、精密光学、高速数据传输存储压缩、数据量化以及计算机图像处理等技术的快速发展,未来的光谱成像仪必将具有大视场、宽覆盖、高灵敏度、高光谱分辨率、高空间分辨率等性能,并趋向于新技术原理、集成化、自动化、无线化、智能化、简单化和小型化等方向发展。

参考文献

- [1] BENNETT C, CARTER R, FIELDS D, et al. Imaging Fourier transform spectrometer[C]. SPIE, 1993, 1937: 191-200.
- [2] INOUE T, ITOH K, ICHIOKA Y. Fourier transform spectral imaging near the image plane[J]. Optics Letters, 1991, 16(12): 934-936.

- [3] WOLFE L. Introduction to imaging spectrometers[M]. SPIE, 1997.
- [4] MIEHELSON A. On the application of interference methods to spectroscopic measurements[J]. Philosophical Magazine, 1892, 34(208): 280-299.
- [5] BELL R. Introductory Fourier transform spectroscopy[M]. New York and London: Academic Press, 1972.
- [6] LOEWENSTEIN E. The history and current status of Fourier transform spectroscopy[J]. Applied Optics, 1966, 5(5): 845-854.
- [7] 李全臣, 蒋月娟. 光谱仪器原理[M]. 北京:北京理工大学出版社, 1999.
- [8] VAUGHAN A. Imaging Michelson spectrometer for Hubble space telescope[C]. SPIE, 1988, 1036: 1-14.
- [9] POTTER J. Multispectral imaging system: US, 3702735[P]. 1972-11-14.
- [10] WELLS C, POTTER A, MORGAN T. Near-infrared spectral imaging Michelson interferometer for astronomical applications[C]. SPIE, 1980, 226: 61-64.
- [11] 吴瑾光. 近代傅里叶变换红外光谱技术及应用[M]. 北京:科学技术文献出版社, 1994.
- [12] LOEWENSTEIN E. The history and current status of fourier transform spectroscopy[J]. Applied Optics, 1966, 5(5): 845-854.
- [13] SIMEONI D. New concept for highly-compact imaging Fourier transform spectrometer (IFTS)[C]. International Society for Optics and Photonics, 1991: 127-138.
- [14] CARTER R. Livermore imaging Fourier transform infrared spectrometer (LIFTIRS) [C]. Office of Scientific & Technical Information Technical Reports, 1995, 2480: 380-386.
- [15] KAUPPINEN J, SALOMAA I, PARTANEN J. Carousel interferometer[J]. Applied Optics, 1995, 34(27): 6081-6085.
- [16] GRIFFITHS P, HIRSCH B, MANNING C. Ultra-rapid-scanning Fourier transform infrared spectrometry [J]. Vibrational Spectroscopy, 1999, 19(1): 165-176.
- [17] KAUPPINEN J, HEINONEN J, KAUPPINEN I. Interferometers based on the rotational motion [J]. Applied Spectroscopy Reviews, 2004, 39(1): 99-130.
- [18] YAZDI S, RASHIDIAN B. Two new swinging interferometers[J]. Journal of Optics A: Pure and Applied Optics, 2007, 9: 560-564.
- [19] CAI Qisheng. Research on large aperture spatial heterodyne imaging spectroscopy[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2016.
才啟胜. 大孔径空间外差干涉光谱成像技术研究[D]. 合肥:中国科学技术大学, 2016.
- [20] YANG Xiaoxu, ZHOU Sizhong, XIANGLI Bin, et al. Studies on nonlinearity of optical path difference of rotary Fourier transform spectrometer[J]. Acta Optica Sinica, 2004, 24(10): 1388-1392.
杨晓许, 周泗忠, 相里斌, 等. 转镜式傅里叶变换光谱仪光程差非线性的研究[J]. 光学学报, 2004, 24(10): 1388-1392.
- [21] INOUE T, ITOH K, ICHIOKA Y. Fourier-transform spectral imaging near the image plane[J]. Optics Letters, 1991, 16(12):934-936.
- [22] BELL R. Introductory Fourier transform spectroscopy[M]. New York: Academic Press, 1972.
- [23] EDSON P. A new principle in interferometer design[J]. Journal of OSA, 1948, 38(1): 66.
- [24] MURTY M. Modification of Michelson interferometer using only one cube-corner prism[J]. Journal of the Optical Society America, 1960, 50(1): 83-84.
- [25] WALLRABE U, SOLF C, MOHR J, et al. Miniaturized Fourier transform spectrometer for the near infrared wavelength regime incorporating an electromagnetic linear actuator[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2005, 123-124: 459-467.
- [26] LATVAKOSKI H, MLYNCZAK M, JOHNSON D, et al. Far-infrared spectroscopy of the troposphere: instrument description and calibration performance[J]. Applied Optics, 2013, 52(2): 264-273.
- [27] LATVAKOSKI H, MLYNCZAK M, CAGEAO R, et al. Far-infrared spectroscopy of the troposphere: calibration with a cold background[J]. Applied Optics, 2014, 53(24): 5425-5433.
- [28] SONG Ci, YIN Qiu, XIE Yanan. Development of channel selection methods for infrared atmospheric vertical sounding[J]. Infrared, 2019, 40(6): 18-26.
宋慈, 尹球, 谢亚楠. 红外大气垂直探测通道优选方法的发展[J]. 红外, 2019, 40(6): 18-26.
- [29] YANG Minzhu. Research on high compression ratio for the data from the on board fourier transform spectrometer[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technical Physics of the Chinese Academy of Sciences, 2019.
杨敏珠. 星上大气垂直探测仪高数字压缩比的研究[D]. 上海:中国科学院上海技术物理研究所, 2019.
- [30] CHEN Ren, GAO Cong, WU Xiaowei, et al. Application of FY-4 atmospheric vertical sounder in weather forecast[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2019, 38(3): 285-289.
- [31] LU Feng, ZHANG Xiaohu, CHEN Boyang, et al. FY-4 geostationary meteorological satellite imaging characteristics and its application prospects[J]. Journal of Marine Meteorology, 2017, 37(2): 1-12.

- 陆风, 张晓虎, 陈博洋, 等. 风云四号气象卫星成像特性及其应用前景[J]. 海洋气象学报, 2017, 37(2): 1-12.
- [32] YANG Qinghua, ZHOU Renkui, ZHAO Baochang. Principle of the moving-mirror-pair interferometer and the tilt tolerance of the double moving mirror[J]. Applied Optics, 2008, 47(13): 2486-2493.
- [33] YANG Qinghua, ZHOU Renkui, ZHAO Baochang. Principle and analysis of the moving-optical-wedge interferometer[J]. Applied Optics, 2008, 47(13), 2186-2191.
- [34] YANG Qinghua, ZHOU Renkui, ZHAO Baochang. Novel moving-corner-cube-pair interferometer[J]. Journal of Optics A: Pure and Applied Optics, 2009, 11(1): 015505.
- [35] YANG Qinghua, ZHOU Renkui, ZHAO Baochang. Tilt tolerance of the moving mirror in Michelson interferometric spectrometer [J]. Acta Photonica Sinica, 2009, 38(3): 677-680.
杨庆华, 周仁魁, 赵葆常. 迈克尔逊干涉光谱仪动镜倾斜误差容限分析[J]. 光子学报, 2009, 38(3): 677-680.
- [36] YANG Qinghua, ZHAO Baochang, ZHOU Renkui. Design of apochromatic telescope without anomalous dispersion glasses[J]. Chinese Optics Letters, 2008, 6(2): 146-148.
- [37] LINKEMANN J, ROMERO-BORJA F, TITTEL H. FT spectrometer with fixed mirrors using Fizeau fringes [C]. SPIE, 1992, 1575: 184-187.
- [38] THERIAULT J, BRADETTE C. Differential detection with a double-beam interferometer [C]. SPIE, 1997, 3082: 65-75.
- [39] YOSHIDA J, KAWASHIMA T. Pre-launch performance test results of TANSO-FTS and CAI on GOSAT [C]. SPIE, 2008, 7082: 1-9.
- [40] GRIFFITHS P. Fourier transform infrared spectrometry [M]. New York: Wiley-Interscience Publication, 2007.
- [41] FAN Bin, CHEN Xu, LI Bicen, et al. Technical innovation of optical remote sensing payloads onboard GF-5 satellite [J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(1): 0102002.
范斌, 陈旭, 李碧岑, 等. “高分五号”卫星光学遥感载荷的技术创新[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(1): 0102002.
- [42] DUAN Pengfei, LI Ming, XU Pengmei. Effect of tiny vibration on interferometer [J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2004, 34(6): 88-92.
段鹏飞, 李明, 徐彭梅. 微振动对干涉仪运动机构均匀性的影响分析[J]. 航天返回与遥感, 2013, 34(6): 88-92.
- [43] WADSWORTH W, DYBWAD J. Ultra high speed chemical imaging spectrometer [C]. SPIE, 1997, 3082: 148-194.
- [44] YANG Xiaoxu, ZHOU Sizhong, XIANGLI Bin. Compensating nonlinearity of optical path difference of rotary Fourier transform spectrometer with fitting interferogram [J]. Acta Photonica Sinica, 2005, 34(11): 1647-1650.
杨晓许, 周泗忠, 相里斌. 转镜式傅里叶变换光谱仪光程差非线性的拟合法补偿[J]. 光子学报, 2005, 34(11): 1647-1650.
- [45] GRIFFITHS P, HIRSCH B, MANNING C. Ultra-rapid-scanning Fourier transform infrared spectrometry [J]. Vibrational Spectroscopy, 1999, 19: 165-176.
- [46] 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.
- [47] WEI Ruyi, ZHANG Xuemin, ZHOU Jinsong, et al. Calculations on optical path difference of a high resolution reflecting scanning Fourier transform spectrometry [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(7): 073001.
魏儒义, 张学敏, 周锦松, 等. 反射式转镜干涉光谱仪光程差计算[J]. 光学学报, 2011, 31(7): 073001.
- [48] WEI Ruyi, ZHOU Jinsong, ZHANG Xuemin, et al. Measurements of the concentration of atmospheric CO₂ based on OP/FTIR method and infrared reflecting scanning Fourier transform spectrometry [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2014, 34(11): 2978-2983.
魏儒义, 周锦松, 张学敏, 等. 基于OP/FTIR和反射转镜式干涉光谱仪的大气CO₂浓度测量[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(11): 2978-2983.
- [49] HU Dexin, HAN Sunli, ZHANG Zhihui. Nonlinear analysis of optical path difference of rotary Fourier transform spectrometer [J]. Infrared, 2018, 39(8): 39-42.
胡德信, 韩顺利, 张志辉. 转镜透射式傅里叶光谱仪光程差的非线性分析[J]. 红外, 2018, 39(8): 39-42.
- [50] SELLAR R, RAFERT J. Effects of aberrations on spatially modulated Fourier transform spectrometer [J]. Optical Engineering, 1994, 33(9): 3087-3092.
- [51] RAFERT J, SELLAR R, BLATT J. Monolithic Fourier transform imaging spectrometer [J]. Applied Optics, 1995, 34(31): 7228-7230.
- [52] SMITH W, HAMMER P. Digital array scanned interferometer: sensors and results [J]. Applied Optics, 1996, 35(16): 2902-2909.
- [53] LUCEY P, HORTON K, WILLIAMS T, et al. SMIFTS: a cryogenically cooled spatially modulated imaging infrared interferometer spectrometer [C]. SPIE, 1993, 1937: 130-141.
- [54] YARBROUGH S, CAUDILL T, KOUBA M, et al. MightySat II.1 Hyperspectral imager: summary of on-orbit

- performance[C]. SPIE, 2002, 4480: 186-197.
- [55] ZHAO Baochang, YANG Jianfeng, CHANG Lingyin, et al. Optical design and on-orbit performance evaluation of the imaging spectrometer for chang'e-1 lunar satellite[J]. Acta Photonica Sinica, 2009, 38(3): 479-483.
赵葆常, 杨建峰, 常凌颖, 等. 嫦娥一号卫星成像光谱仪光学系统设计与在轨评估[J]. 光子学报, 2009, 38(3): 479-483.
- [56] XIANGLI Bin, WANG Zhonghou, LIU Xuebin, et al. Hyperspectral imager of the environment and disaster monitoring small satellite[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2009, 24(3): 257-262.
相里斌, 王忠厚, 刘学斌, 等. “环境与灾害监测预报小卫星”高光谱成像仪[J]. 遥感技术与应用, 2009, 24(3): 257-262.
- [57] XIANGLI Bin, WANG Zhonghou, LIU Xuebin, et al. Spatially modulated Fourier transform hyperspectral imager for HJ-1A satellite[J]. Spacecraft Engineering, 2009, 18(6): 43-49.
相里斌, 王忠厚, 刘学斌, 等. 环境减灾-1A 卫星空间调制型干涉光谱成像仪技术[J]. 航天器工程, 2009, 18(6): 43-49.
- [58] YUAN Yan, LI Liying, XIONG Wang, et al. Mechanical structure design for hyperspectral imager of HJ-1A satellite[J]. Spacecraft Engineering, 2009, 18(6): 97-105.
袁艳, 李立英, 熊望娥, 等. 环境减灾-1A 卫星超光谱成像仪结构设计[J]. 航天器工程, 2009, 18(6): 97-105.
- [59] DOHI T, SUZUKI T. Attainment of high resolution holographic Fourier transform spectroscopy [J]. Applied Optics, 1971, 10(5): 1137-1140.
- [60] ROESLER F, HARLANDER J. Spatial heterodyne spectroscopy: interferometric performance at any wavelength without scanning[C]. Spectroscopy, International Society for Optics and Photonics, 1991: 234-243.
- [61] HARLANDER J, REYNOLDS R, ROESLER F. Spatial heterodyne spectroscopy for the exploration of diffuse interstellar emission lines at far ultraviolet wavelengths[J]. Astrophysical Journal, 1992, 396(2): 730-740.
- [62] MIERKIEWICZ E, ROESLER F, HARLANDER J, et al. First light performance of a near-UV spatial heterodyne spectrometer for inter stellar emission line studies[C]. SPIE, 2004, 5492: 751-766.
- [63] HARLANDER J, ROESLER F, CARDON J, et al. SHIMMER: a spatial heterodyne spectrometer for remote sensing of Earth's middle atmosphere[J]. Applied Optics, 2002, 41(7): 1343-1352.
- [64] HARLANDER J, ROESLER F, ENGLERT C, et al. Robust monolithic ultraviolet interferometer for the SHIMMER instrument on STPSat-1[J]. Applied Optics, 2003, 42(15): 2829-2834.
- [65] SMITH B, LAUBSCHER B, COOKE B, et al. IRISHS: the infrared spatial heterodyne spectrometer: a new push broom Fourier transform ultraspectral imager with no moving parts[C]. SPIE, 1999, 3698: 501-509.
- [66] MILLIGAN S, HOWARD J, LAUBSCHER B, et al. Optical design of an imaging spatial heterodyne infrared spectrometer[C]. SPIE, 1999, 3698: 869-881.
- [67] LIN Y, SHEPHERD G, SOLHEIM B, et al. Introduction to spatial heterodyne observations of water (SHOW) project and its instrument development[C]. International TOVS Study Conference-XIV Proceedings, 2005: 836-843.
- [68] DUPONT F, GRANDMONT F, SOLHEIM B, et al. Spatial heterodyne spectrometer for observation of water for a balloon flight: Overview of the instrument & preliminary flight data results [C]. Optical Society of America, 2015: FW4A. 5.
- [69] SHEN Weimin, CHEN Linsen, GU Huajie, et al. Theory and performance analysis of a spatial heterodyne common path interferometer[J]. Laser Journal, 2000, 21(1): 21-25.
沈为民, 陈林森, 顾华俭, 等. 共光路空间外差干涉仪理论与性能分析[J]. 激光杂志, 2000, 21(1): 21-25.
- [70] YE Song, FANG Yonghua, HONG Jin, et al. System design of spatial heterodyne spectrometer[J]. Optics and Precision Engineering, 2006, 14(6): 959-964.
叶松, 方勇华, 洪津, 等. 空间外差光谱仪系统设计[J]. 光学精密工程, 2006, 14(6): 959-964.
- [71] YE Song, FANG Yonghua, HONG Jin, et al. Experimental study on spatial heterodyne spectroscopy [J]. Opto-Electronic Engineering, 2007, 34(5): 84-88.
叶松, 方勇华, 洪津, 等. 空间外差光谱技术实验研究[J]. 光电工程, 2007, 34(5): 84-88.
- [72] XIONG Wei, SHI Hailiang, WANG Yuanjun, et al. Study on near-infrared spatial heterodyne spectrometer and detection of water vapor[J]. Acta Optical Sinica, 2010(5): 1511-1515.
熊伟, 施海亮, 汪元钧, 等. 近红外空间外差光谱仪及水汽探测研究[J]. 光学学报, 2010(5): 1511-1515.
- [73] SHI Hailiang, FANG Yonghua, XIONG Wei, et al. Spatial heterodyne spectroscopy and application in atmospheric remote sensing[J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2010, 5(6): 463-468.
施海亮, 方勇华, 熊伟, 等. 空间外差光谱技术及其在大气遥感探测中的应用[J]. 大气与环境光学学报, 2010, 5(6): 463-468.
- [74] WU Jun, WANG Xianhua, FANG Yonghua, et al. Ability analysis of spatial heterodyne spectrometer in atmospheric CO₂ detection[J]. Acta Optical Sinica, 2011, 31(1): 9-15.
吴军, 王先华, 方勇华, 等. 空间外差光谱技术应用于大气二氧化碳探测的能力分析[J]. 光学学报, 2011, 31(1): 9-15.
- [75] YU Tingting, FENG Yutao, FU Di, et al. Analysis of influence of spike on phase retrieval accuracy of Doppler asymmetric spatial heterodyne spectrometer and correction method[J]. Acta Photonica Sinica, 2020, 49(12): 1230001.

- 于婷婷,冯玉涛,傅頔,等. 冲击噪声对多普勒差分干涉仪相位反演精度影响分析及校正方法[J]. 光子学报, 2020, 49(12): 1230001.
- [76] ZHANG Yafei, FENG Yutao, FU Di, et al. Dependence of interferogram phase on incident wavenumber and phase stability of Doppler asymmetric spatial heterodyne spectroscopy[J]. Chinese Physics B, 2020, 10: 326-332.
- [77] SUN Chen, FENG Yutao, FU Di, et al. A propagation of interferogram signal-to-noise (SNR) and phase uncertainty in Doppler asymmetric spatial heterodyne spectrometer[J]. Acta Physica Sinica, 2020, 69(1): 014202.
孙晨,冯玉涛,傅頔,等. 多普勒差分干涉仪干涉图信噪比对相位不确定度研究[J]. 物理学报, 2020, 69(1): 014202.
- [78] LI Zhantao, FENG Yutao, HAN Bin, et al. Design of optical system for muti-band all-sky airglow imager[J]. Acta Photonica Sinica, 2019, 48(5): 0522003.
李战涛,冯玉涛,韩斌,等. 多波段全天空气辉成像仪光学系统设计[J]. 光子学报, 2019, 48(5): 0522003.
- [79] YIN Shi, FENG Yutao, BAI Qinglan, et al. Design of compact spatial heterodyne imaging spectrometer[J]. Acta Photonica Sinica, 2018, 47(3): 0312002.
尹诗,冯玉涛,白清兰,等. 紧凑型空间外差成像光谱仪设计[J]. 光子学报, 2018, 47(3): 0312002.
- [80] FENG Yutao, SUN Jian, LI Yong, et al. Broad-band spatial heterodyne interferometric spectrometer[J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(1): 48-55.
冯玉涛,孙剑,李勇,等. 宽谱段空间外差干涉光谱仪[J]. 光学精密工程, 2015, 23(1): 48-55.
- [81] SHI Dalian, BAI Qinglan, FENG Yutao, et al. In-flight calibration of atmospheric wind and temperature measurement spectrometer[J]. Journal of Applied Optics, 2011, 32(5): 926-930.
石大莲,白清兰,冯玉涛,等. 大气风场和温度场星载探测光谱仪的星上定标技术[J]. 应用光学, 2011, 32(5): 926-930.
- [82] WANG Wencong, LIANG Jingqiu, LIANG Zhongzhu, et al. Design of spatio-temporally modulated static infrared imaging Fourier transform spectrometer[J]. Optics Letters, 2014, 39(16): 4911-4914.
- [83] GAO Jianhua, QIN Yuxin, WANG Weibiao, et al. Spectrum reconstruction of a spatially modulated Fourier transform spectrometer based on stepped mirrors[J]. Applied Spectroscopy, 2017, 71(6): 1348-1356.
- [84] ZHENG Ying, LIANG Jingqiu, LIANG Zhongzhu. Design and fabrication of step mirrors used in space-modulated Fourier transform infrared spectrometer[J]. Optics Express, 2013, 21(1): 884-892.
- [85] MOLLER K. Miniaturized wave front-dividing interferometers without moving parts for Held and space applications[C]. SPIE, 1993, 1992: 130-139.
- [86] MOLLER K. Wave-front-dividing array interferometers without moving parts for real-time spectroscopy from the 1R to the UV[C]. Applied Optics, 1995, 34(9): 1493-1501.
- [87] BARDUCCI A, COSMO V, MARCOIONNI P, et al. ALISEO: a new stationary imaging interferometer[C]. SPIE, 2004: 262-270.
- [88] MATALLAH N, SAUER H, GOUDAIL F, et al. Design and first results of a Fourier transform imaging spectrometer in the 3-5 μm range[C]. SPIE, 2011, 8167: 816715.
- [89] LUCEY P G, WOOD M, CRITES S T, et al. A LWIR hyperspectral imager using a Sagnac interferometer and cooled HgCdTe detector array[C]. SPIE, 2012, 8390: 83900Q.
- [90] 相里斌. 博士后研究工作总结报告[R]. 西北大学现代物理研究所, 1995: 34-39.
- [91] ZHANG Chunmin, XIANGLI Bin, ZHAO Baochang, et al. A static polarization imaging spectrometer based on a Savart polariscope[J]. Optics Communications, 2002, 203(1-2): 21-26.
- [92] ZHANG Chunmin, Zhao Baochang, XIANGLI Bin. Wide-field-of-view polarization interference imaging spectrometer[J]. Applied Optics, 2004, 43(33): 6090-6094.
- [93] ZHANG Chunmin, Yan Xinge, ZHAO Baochang. A novel model for obtaining interferogram and spectrum based on the temporarily and spatially mixed modulated polarization interference imaging spectrometer[J]. Optics Communications, 2008, 281(8): 2050-2056.
- [94] BAI Caixun, LI Jianxin, XU Yixuan, et al. Compact birefringent interferometer for Fourier transform hyperspectral imaging[J]. Optics Express, 2018, 26(2): 1703-1725.
- [95] XU Yixuan, LI Jianxin, BAI Caixun, et al. Ultra-compact Fourier transform imaging spectrometer using a focal plane birefringent interferometer[J]. Optics Letters, 2018, 43(7): 4081-4084.
- [96] BAI Caixun, LI Jianxin, XU Yixuan, et al. Compact birefringent interferometer for Fourier transform hyperspectral imaging[J]. Optics Express, 2018, 26(2): 1703-1725.
- [97] LIU Chengmiao, LI Jianxin, ZHU Rihong, et al. Large field-of-view Fourier transform imaging spectrometer using dual-channel stitching[J]. Optics Express, 2016, 24(25): 28473-28490.
- [98] BAI Caixun, LI Jianxin, ZHOU Jianqiang, et al. Interferometric hyperspectral polarization imaging method based on micro-polarization array[J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(1): 0138003.
柏财勋,李建欣,周建强,等. 基于微偏振阵列的干涉型高光谱偏振成像方法[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(1): 0138003.

Review of the Development of Interferometric Spectral Imaging Technology (Invited)

HU Bingliang

(Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS, Xi'an 710072, China)

Abstract: Interferometric spectroscopic imaging technology has undergone decades of experience accumulation and technological development. At present, it has extensive and mature applications in the fields of astronomical exploration, atmospheric pollution, water environment monitoring, surface geological mineral exploration, vegetation survey and other fields. Compared with dispersive and filter-type spectral imaging techniques, interferometric spectroscopic imaging technology has the advantages of high resolution, high sensitivity, and high wave number accuracy. According to the type of optical path acquisition method, this paper summarizes the research status of interferometric spectroscopic imaging technology at domestic and abroad from three aspects: time modulation, spatial modulation, and spatio-temporal joint modulation. Then introduces and reviews their representative research results. For time-modulated interferometric spectroscopy imaging, the interferogram acquired by the detector can be seen as a collection of time series. Interference maps are acquired one by one over time. The main advantages of this technique are the high spectral resolution and detection sensitivity. However, this type of optical system requires a continuously moving precision part to produce an optical path difference that changes over time. The main technical difficulty of time-modulated interferometer spectroscopy is how to develop a set of stable, reliable and long-working high-precision moving mirror scanning system. Spatial modulation interferometric spectroscopy records interference information at different cell positions of the detector for different optical path differences of the measured target. A complete interference map of the target can be obtained with a single exposure. This technology fundamentally overcomes the problem of precision moving mirror scanning system in time-modulated spectrometers, and also improves the real-time performance of obtaining spectral information. The essence of spatiotemporal combined modulation interferometer spectroscopy is to insert a transverse shear interferometer into the camera system. Since there is no slit in the front optical system, this type of instrument not only has the characteristics of high detection sensitivity, high stability and high signal-to-noise ratio, but also has the advantages of high throughput. It can be seen that different modulation methods use different optical path structures. Of course, each spectroscopic principle also has its advantages and disadvantages, which can be applied to different application areas. The research of interferometric spectroscopy imaging technology has always attracted much attention. There is no doubt that the emergence of relevant new technologies is often very eye-catching. Over the past three decades, interferometric imaging spectroscopy technology has been rapidly developed in the field of remote sensing, and has gradually become an effective tool for high-resolution remote sensing detection.

With the rapid development of detector focal plane array, precision machinery, high-speed data transmission and storage compression, data quantification and computer image processing, the future of spectral imagers will have a large field of view, wide spectral range, high sensitivity, high spectral resolution, high spatial resolution and other performance. Moreover, the technology gradually tends to develop in the direction of new principles, integration, automation, wireless, intelligence, single cylinder and miniaturization.

Key words: Interferometric spectroscopic imaging; Time modulation; Spatial modulation; Spatio-temporal joint modulation

OCIS Codes: 110.3175; 100.3175; 300.6300