

## 新型光谱测量技术发展综述

柏连发, 王旭, 韩静, 赵壮

(南京理工大学 电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094)

**摘要:** 光谱测量技术在无损检测、地质勘探、农业普查等诸多方面均有广泛应用,且随着技术的发展,相关工艺器件近几年得到了长足的进步。在结合实际应用需求的前提下,比较全面地介绍了光谱测量技术的发展历史,以及近年来相关技术的研究现状和发展动态。并且从传统型、计算型、多路复用型三个角度较详细地总结了目前光谱测量的主要形式。着重介绍了包括计算层析、压缩感知、傅里叶变换、哈达玛变换等多种光谱测量技术的原理及实现方法,并分别总结了优缺点。对目前光谱测量技术中亟待解决的问题进行了分析总结,对未来光谱测量手段的发展进行了展望。

**关键词:** 光谱测量; 压缩感知; 哈达玛变换; 傅里叶变换

**中图分类号:** O433.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0603001

## Development review of new spectral measurement technology

Bai Lianfa, Wang Xu, Han Jing, Zhao Zhuang

(School of Electronic Engineering and Photoelectric Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** Spectral measurement technology has been widely used in non-destructive test, geological prospecting, agriculture and many other fields, and the related technology and devices have achieved great progress in recent years. So spectral measurement technology has developed rapidly in recent years. Based on practical application requirements, the development history of spectral measurement technology was introduced comprehensively and the main spectral measurements including traditional, computational and multiplexing were summarized. The theory and implementation of computational tomography, compressive sensing, Fourier transform, Hadamard transform were introduced in detail and corresponding advantages and disadvantages were pointed out. At last, the problems that need to be solved urgently in spectral measurement technology were analyzed and summarized, and the future development of spectral measurement methods was prospected.

**Key words:** spectral measurement; compressive sensing; Hadamard transform; Fourier transform

收稿日期: 2019-01-15; 修订日期: 2019-02-23

基金项目: 国家重大科研仪器研制项目(61727802)

作者简介: 柏连发(1965-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事光电成像探测与数字图像处理方面的研究。Email: blf@njust.edu.cn

通讯作者: 赵壮(1990-), 男, 博士后, 主要从事光谱探测与数据处理方面的研究。Email: zhaozhuang3126@gmail.com

## 0 引言

光谱分析技术作为一种成熟的检测、分析手段,通过对物质光谱的探测、研究完成对物质化学组成及其含量的分析。光谱分析技术具有测量范围大、速度快及分析精度高等优势。通过观察、测量物质产生的光谱,并分析物质光谱频率与强度的变化情况,就可以获得物质的组成、结构、含量、运动状态等信息,这一技术目前已经广泛应用于农业普查、矿物资源勘探、生物医学、航空遥感、军事目标探测、焊接诊断等领域中<sup>[1-3]</sup>。

虽然科学技术的不断发展为光谱分析仪器带来了性能的提高与应用范围的拓展,但在另一方面,不断提高的科学研究水平也对光谱仪器的性能提出了更加苛刻要求。例如拉曼光谱技术<sup>[4-5]</sup>的发现拓展了光谱仪器在材料化学、生物光子学、医疗诊断、非破坏性物质分析等领域的应用,但同时它也对光谱仪器的分辨率、信噪比等指标提出了更为苛刻的要求。在  $C_{60}$  的低温相变研究中,在 50~200 K 的温度范围内,有的谱线位移只有  $0.3\text{ cm}^{-1}$ 。因此,在对物质结构的精细研究中,需要光谱分析仪器具有极高的分辨率,同时,由于拉曼散射中,入射光与样品之间的相互作用很弱,相对于瑞利散射,拉曼散射强度极其微弱,仅有激发光功率的百万分之一,甚至更小。因此,拉曼光谱探测要求光谱仪器同时具有高分辨率及高信噪比(Signal to Noise Ratio, SNR)。

在传统狭缝光谱仪中,采用狭缝对入射光信号进行调制,导致系统分辨率与信噪比之间存在不可调和的矛盾:狭缝越窄,系统的分辨率就高,但进入系统的光信号就越弱,信噪比就越低,反之亦然。在传统光栅光谱仪中,平衡分辨率与信噪比矛盾的主要方法是通过增加探测器的积分时间来增强对信号的读取,但是采集积分时间加大会增大背景噪声和探测器暗电流噪声等固有噪声,同时严重降低采集速度,不适用于荧光分析等对探测时间有严格要求的情况。受分辨率与信噪比之间矛盾的影响,传统光谱仪在拉曼光谱等微弱光谱探测领域的应用受到了严重制约。因此,为了扩大光谱的应用领域,需要稳定、可靠、快速的光谱降噪技术,在兼顾光谱分辨率与测量时间的情况下,提升有效光谱的信噪比,同

时,新型光谱降噪理论与技术,也是光谱测量一直在探索和研究的方

对于给定光谱信号的信噪比定义为:

$$SNR = I_{\text{signal}} / I_{\text{noise}} \quad (1)$$

式中:  $I_{\text{signal}}$  为信号的强度;  $I_{\text{noise}}$  为噪声的强度。对于狭缝光谱仪而言,由于狭缝限制其通光量,因此其信噪比相对较低。

由公式(1)可知,为了提升测量信号的信噪比,要么降低噪声的强度  $I_{\text{noise}}$ , 要么提升信号强度  $I_{\text{signal}}$ 。对于第一种途径,直接提升探测器的性能,即提升探测器的灵敏度同时降低探测器采集过程中的噪声,其效果显而易见。对于第二种途径,在实际场景中,目标的辐射(或反射)光谱不会发生,因此,无法直接通过提升信号强度来增强信噪比。如果将多个信号组合叠加后再进行测量,则测量得到的信号强度较直接测量会明显提升,从而显著提升信号的信噪比。将这种每次测量多个组合信号的技术称之为多通道(Multiple)测量技术。在弱信号探测领域,多通道技术是提升其信噪比的有效手段。在光谱探测领域中常用的多通道测量手段有:傅里叶变换光谱测量技术与哈达玛变换光谱测量技术。

现有主流的高信噪比光谱测量方法的特点如图1所示。

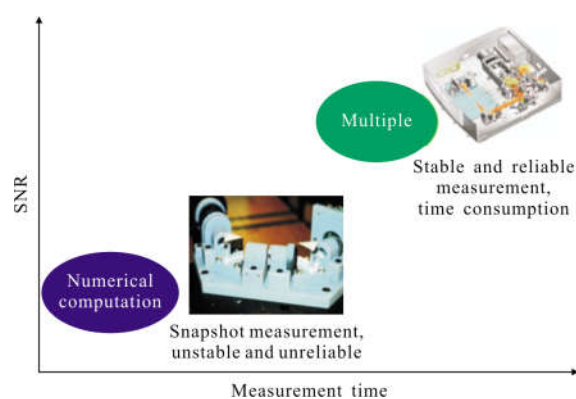


图 1 典型光谱测量方法

Fig.1 Typical spectral measurement methods

如图 1 左下方蓝色区域所示,以压缩感知、逆卷积、计算狭缝等为代表的数值计算型光谱仪能够实现瞬态光谱测量,但是测量结果受到光谱结构、噪声分布的影响,往往不够可靠。如图 1 右上方绿色区域所示,以哈达玛变换光谱仪 (Hadamard Transform

Spectrometer, HTS) 和傅里叶变换光谱仪 (Fourier Transform Spectrometer, FTS) 为代表的多路复用型光谱仪能够得到稳定可靠的光谱测量结果,但是需要多次扫描,时间效率低,不适用于需要瞬态光谱的场景。

## 1 国内外研究现状与发展动态分析

随着科学技术的发展,光谱仪作为一种基础性的测量仪器,已经应用于越来越多的领域中。图 2 显示了不同光谱测量方法的发展历程。在光谱测量中,光谱仪的响应时间和测量得到的光谱数据的抗干扰能力/信噪比是一对互相矛盾的要求。在一些瞬态场景中,由于瞬态场景的限制,光谱仪的采样时间过短会导致测量到的光谱数据的信噪比低下,因此,有必要研制能够瞬态测量且具有高抗干扰能力的光谱仪,以拓展光谱仪的应用领域。

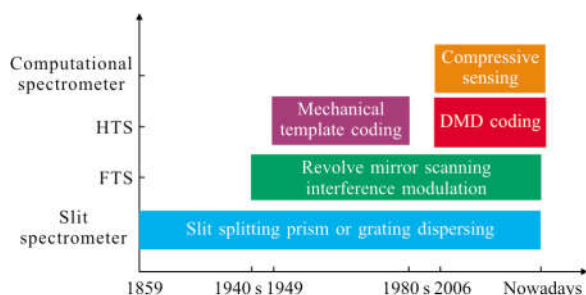


图 2 光谱测量方法发展历程

Fig.2 Development of spectral measurement method

狭缝光谱仪是历史最为悠久也是目前应用最为广泛的光谱仪,但是狭缝限制了通光量,导致狭缝光谱仪面临信噪比低、抗干扰能力差的问题。为了平衡传统单狭缝光谱仪中分辨率与信噪比之间的矛盾,统计学中的组合测量原理被引入光谱测量领域。组合测量的基本原理为对一组物理量按照一定规律分组,进行一系列组合测量后所得到的测量结果比单独测量所得的结果要准确。在光谱测量中组合测量又被称为多路复用,将色散元件分光后的光有选择地叠加于同一探测器上,在探测器噪声水平一定的情况下将极大增加测量信号的强度,从而可以在不改变系统分辨率的情况下获得系统信噪比增益。目前基于多路复用原理的光谱探测技术主要有傅里叶变换光谱仪与哈达玛变换光谱仪。19 世纪 80 年代,Michelson 设计了 Michelson 干涉仪,以此为基

础,在 20 世纪 40 年代发展出傅里叶变换光谱仪,相比于传统狭缝光谱仪,傅里叶变换光谱仪具有光通量大、稳定性好、光谱分辨率高等优势,但是在傅里叶变换光谱仪中存在扫描动镜,光谱测量对扰动和机械扫描精度都很敏感,仪器的可靠性受到限制,对仪器的使用环境有严格的要求,难以应用于实际的工业测量领域中。而且傅里叶变换光谱仪的分辨率与动镜所能实现的最大光程差成正比,因此,实现高分辨率则意味着要求动镜移动量大,系统难以集成。1949 年,Golay 提出多路复用的概念并设计了使用机械模板编码的哈达玛变换光谱仪<sup>[6]</sup>,由于其降噪性能强,到了 20 世纪 80 年代,哈达玛变换光谱仪在天文学、医学、化学光谱学领域得到了广泛应用,但是机械模板存在加工精度低、扫描速度慢等缺陷,制约了其进一步发展。此后一段时间哈达玛变换光谱仪的发展非常缓慢。进入新世纪以来,随着微机械加工能力的进步,出现了以数字微镜器件(Digital Micromirror Device, DMD) 为代表的新型光编码器器件,为哈达玛变换光谱仪带来新的生机。与此同时,随着压缩感知<sup>[7]</sup>等数学理论的发展,出现以压缩感知理论为基础设计的新型瞬态光谱仪。

### 1.1 传统光谱仪发展历程

1983 年,美国喷气推进实验室 (Jet Propulsion Laboratory, JPL) 完成了世界上第一台高光谱成像光谱仪“航空成像光谱仪”(Airborne Imaging Spectrometer, AIS-1)<sup>[8]</sup>,该光谱仪拥有 128 个成像波段,光谱分辨率为 9.3 nm。该光谱仪在地址勘探、植被等领域取得了巨大的成功,其他国家也纷纷跟进。1987 年 JPL 又推出“航空可见光/近红外成像光谱仪”(Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer, AVIRIS)<sup>[9]</sup>,覆盖了从 0.4~2.5 μm 的 244 个波段,光谱分辨率为 10 nm。1988 年,加拿大研制了小型的机载成像光谱仪 (Compact Airborne Spectrographic Imager, CASI)<sup>[10]</sup>;1992 年,芬兰研制了机载多用途成像光谱仪 (Airborne Imaging Spectrometer for different Applications, AISA)<sup>[11]</sup>;1994 年,美国海军研究所研制了高光谱数字图像试验仪 (Hyperspectral Digital Imagery Collection Experiment, HYDICE)<sup>[12]</sup>;1996 年,日本研制了基于迈克尔逊干涉仪的干涉式成像光谱仪<sup>[13]</sup>;1998 年,澳大利亚 Integrated Spectronics 公司研制的高光谱制图仪(Hyperspectral Mapper, HyMap)<sup>[14]</sup>,

成为了新一代成像光谱仪的代表。进入 21 世纪,不断涌现出新型成像光谱仪,比较有代表性的有美国 GER 公司研制的用于石油行业的 TEEMS (Texaco Energy and Environmental Multispectral Spectrometer) 系统<sup>[15]</sup>;欧洲空间局研制的紧凑型高分辨率成像光谱仪(Compact High-Resolution Imaging Spectrometer, CHRIS)<sup>[16]</sup>。

国内在 20 世纪 80 年代开始也大力发展国产的成像光谱仪。中国科学院上海技术物理研究所研制了基于推扫型的成像光谱仪(Push broom Hyperspectral Imaging, PHI)<sup>[17]</sup>和实用型模块化机载成像光谱仪(Operational Modular Imaging Spectrometer, OMIS)<sup>[18]</sup>。2002 年 3 月发射的神舟三号飞船搭载了中分辨率成像光谱仪<sup>[19]</sup>;2007 年 10 月发射的“嫦娥一号”搭载了有中国科学院西安光学精密机械研究所研制的傅里叶变换光谱仪用于探测月球表面的物质成份<sup>[20]</sup>。2011 年 10 月发射的“天宫一号”目标飞行器也搭载了高分辨成像光谱仪;2016 年 9 月发射的“天宫二号”也搭载了宽波段高光谱成像光谱仪。此外,在我国发射的环境减灾与气象卫星也搭载了各种高光谱成像光谱仪。经过几十年的发展,国内高光谱领域取得了长足的进展,并在遥感勘探、气象预测、环境减灾等领域得到了广泛的应用。

目前传统的成像光谱仪已经非常成熟,但是这些成像光谱仪在获取整个场景的光谱图像时需要在时间或者是波长上进行推扫,无法用于动态场景的成像。

### 1.2 计算型光谱仪发展历程

为了解决对于动态场景的光谱成像问题,计算型光谱成像技术应运而生。目前有两种不同的计算型光谱成像技术:层析型和压缩型。

20 世纪 90 年代,出现了计算层析成像光谱技术 (Computer Tomography Imaging Spectrometer, CTIS)<sup>[21-23]</sup>。层析型光谱成像技术借用了医学领域中的计算机断层扫描(Computer Tomography, CT)的原理,结合光谱成像技术,通过一次曝光,获取目标在不同方向的投影图像,从而重构出目标光谱数据。图 3 展示了光谱数据立方的投影过程。层析型光谱成像技术具有探测速度快、无需扫描、光通量大和性能稳定的特点。

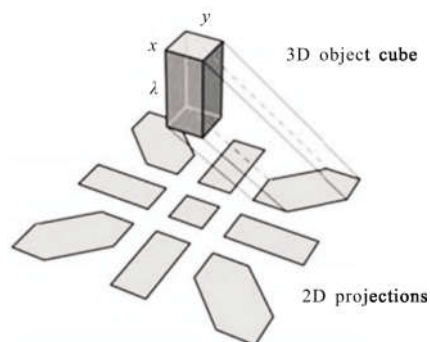


图 3 数据立方投影过程

Fig.3 Process of data cube projection

层析型光谱成像技术有三种技术类型,分别为画幅型、旋转棱镜型以及柱透镜型。T. Okamoto 首先提出画幅型层析成像光谱仪<sup>[24]</sup>,通过二维正交光栅来获取目标数据立方在多个方向的投影。系统原理如图 4 所示。

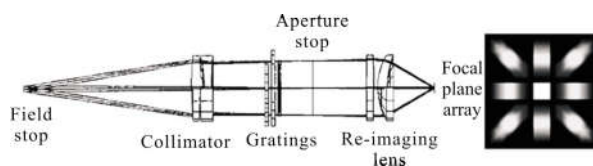


图 4 画幅型计算层析成像光谱仪原理图

Fig.4 Schematic diagram of frame-type computer tomographic imaging spectrometer

J. M. Mooney 等提出了棱镜型层析成像光谱仪<sup>[25]</sup>,通过绕光轴旋转直视棱镜来获取多个方向的目标数据立方投影,然后再进行层析处理。系统结构如图 5 所示。

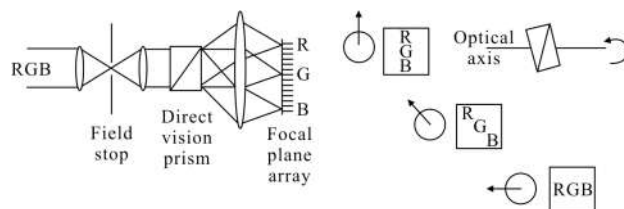


图 5 旋转棱镜型计算层析成像光谱仪原理图

Fig.5 Schematic diagram of rotating-prism-type computer tomographic imaging spectrometer

Fang Junyong 等提出了柱透镜型层析成像光谱仪<sup>[26]</sup>,利用两个互相垂直的柱透镜实现特定方向的投影,从而提高投影时的能量利用率。系统结构如图 6 所示。

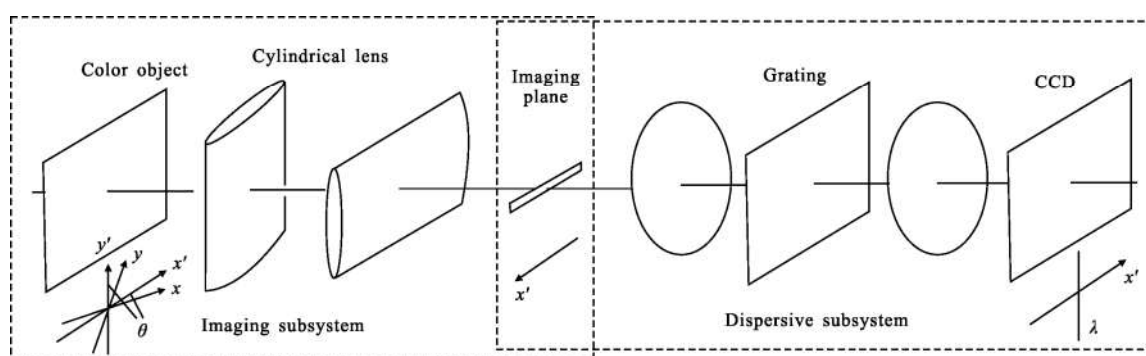


图 6 柱透镜型计算层析成像光谱仪原理图

Fig.6 Schematic diagram of cylindrical-lens-type computer tomographic imaging spectrometer

然而,在层析型成像光谱仪的数据投影过程中,投影图像中有很多空白,而且需要大面积的成像传感器来接收各个方向的投影,因而会降低空间和光谱分辨率,产生所谓的信息丢失锥体问题<sup>[27]</sup>。

压缩型光谱成像技术是在近年来提出的压缩感知理论的基础上发展而来的一个新型光谱成像技术。2006年,Candes,Donoho,Tao等提出了压缩感知理论(Compressive Sensing,CS)<sup>[28-29]</sup>。压缩感知理论指出,只要信号是稀疏的或者是可压缩的就可以远小于奈奎斯特频率的采样率进行采样,然后通过压缩感知算法重构出原始数据。其核心思想是,对于 $N$ 维原始信号 $f \in R^{N \times 1}$ ,总能找到某组正交基 $\Psi \in R^{N \times N}$ ,使 $f$ 在 $\Psi$ 中的表示 $x = \Psi^{-1}f$ 是稀疏的。那么,可以将信号 $f$ 投影到一个按照特定要求设计的测量矩阵 $\Phi \in R^{M \times N}$ ( $M \ll N$ ),即低维空间 $\Phi$ 上得到一组压缩采样数据,即观测向量 $y$ :

$$y = \Phi f = \Phi \Psi x = Ax \quad (2)$$

而观测向量 $y$ 中包含了原始信号 $f$ 足够多的信息,因此,可以利用 $l_1$ 范数最小化问题对观测向量 $y$ 进行求解,得到对应于信号 $f$ 的稀疏信号 $x$ ,最后通过逆变换 $f = \Psi x$ 恢复原始信号 $f$ 。在CS理论中, $\Phi$ 称为测量矩阵,而 $\Psi$ 称为稀疏变换矩阵, $A = \Phi \Psi$ 则称为感知矩阵(Sensing Matrix)。

在压缩感知理论的基础上,2006年,美国杜克大学Brady等人提出了一种新型的编码孔径快照光谱成像(Coded Aperture Snapshot Spectral Imager,CASSI)<sup>[30]</sup>,并在CASSI基础上开发了多种快照成像光谱仪。CASSI利用编码孔径和棱镜的色散,将目标调整为一个多通道混合的编码投影图像。CASSI采用压缩

感知原理,只需要单次测量然后通过计算得到三维光谱数据立方,属于快照式光谱成像仪。该技术一经提出,立刻得到了广泛的关注,成为一种新的光谱成像研究热点。

2007年,M. E. Gehm等搭建了计算型成像光谱仪原型机(Dual-Dispenser CASSI,DD-CASSI)<sup>[31]</sup>,系统如图7所示。该系统采用一个编码模板和两个色散棱镜调制入射光,使用探测器采集经过编码和色散后的多通道投影数据,并成功重建出目标的光谱。

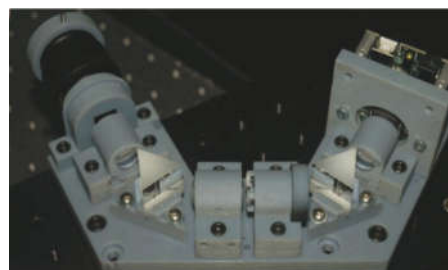


图 7 DD-CASSI 实物图

Fig.7 Physical photo of DD-CASSI

A. Wagadarikar等搭建了基于单色散元件的编码孔径成像光谱仪(Single Dispenser CASSI)<sup>[32]</sup>,系统如图8所示。与DD-CASSI相比,SD-CASSI只用单个色散元件,但是同样能够获得较高的光谱分辨率。

Laura Galvis等人针对CASSI系统中编码器件和探测器像元之间不同方向上存在的配准误差问题,开展了基于压缩感知的超分辨编码算法的研究<sup>[33-34]</sup>。中国科学院光电研究院的马原针对光学系统放大倍率误差造成的DMD和探测器像元在大小上不匹配的问题,分析了光学系统放大率对图像复

原质量的影响<sup>[35]</sup>。军事交通学院娄静涛等设计了一种基于编码孔径的折反射全向压缩成像系统,提高了折反射全向成像的分辨率<sup>[36]</sup>。除了压缩感知理论,计算狭缝<sup>[37-38]</sup>和逆卷积<sup>[39]</sup>技术也广泛应用于计算型光谱仪中。

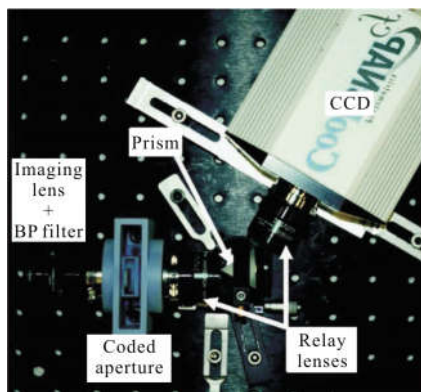
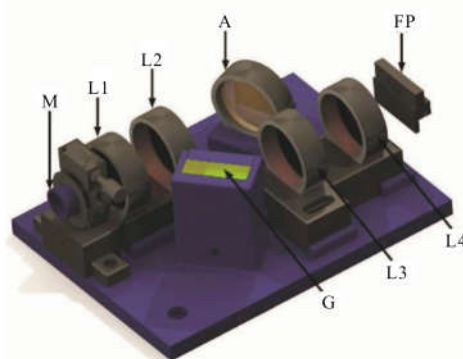


图 8 SD-CASSI 实物图

Fig.8 Physical photo of SD-CASSI

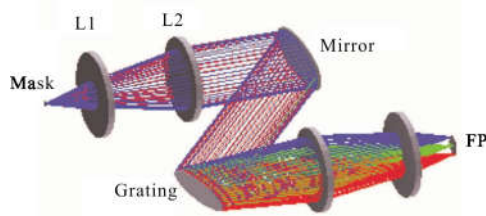
在成像光谱仪的基础上,Brady 等也开发了具有高光通量的瞬态光谱仪用于测量整个场景的瞬态光谱。2006 年 Brady 等人提出了基于多路复用的瞬态光谱仪(Static Multimodal Multiplex Spectrometer, MMS)<sup>[40]</sup> 并在此基础上设计了多种多路复用瞬态光谱仪。图 9 显示了在此框架设计的长波红外瞬态光谱仪(Static aperture-coded dispersive longwave infrared spectrometer, LWIR)<sup>[41]</sup>的基本结构。在 LWIR 中,使用哈达玛矩阵同时编码所有入射光,经过准直后入射到反射式光栅,使用探测器测量色散叠加后的光谱,然后基于非负最小二乘法(Non-Negative Least-Squares, NNLS)<sup>[42]</sup>,重建得到待测光谱。同时 Brady 等人也测量不同编码模板在 MMS 上的降噪性能<sup>[43]</sup>,并指出:在测试用的 10 种编码模板中,哈达玛循环 S 矩阵具有最优的降噪能力。在 MMS 中直接使用编码矩阵表示光强分布存在误差且 NNLS 属于所谓的病态逆问题,对于使用 NNLS 重建后的光谱,无法确定其准确度,限制了其在光谱测量中的应用。

这些以数值方法为基础的光谱仪虽然能实现瞬态光谱测量,但是其抗干扰能力受到噪声分布的影响且无法获取稳定可靠的结果,无法应用于对光谱数据有很高要求的场景。因此有必要研究有可靠信噪比提升的光谱仪即基于多路复用光谱仪。



(a) LWIR 三维图

(a) Three dimensional LWIR



(b) LWIR 光学结构图

(b) Optical structure of LWIR

图 9 LWIR 基本结构图

Fig.9 Basic structure LWIR

### 1.3 多路复用型光谱仪

#### 1.3.1 傅里叶变换光谱仪

经典的傅里叶变换光谱仪(Fourier Transform Spectrometer, FTS)大多数都是基于迈克尔逊干涉仪,系统结构如图 10 所示,主要由准直系统,干涉系统以及探测系统组成<sup>[44-46]</sup>。傅里叶变换光谱仪通过将目标的辐射(或反射)光谱经过干涉系统进行频率域的调制,产生干涉图,从而将光谱的测量转换为对干涉图像强度的测量。相比于传统狭缝光谱仪,傅里叶变换光谱仪具有高光通量的优势。但是傅里叶变换光谱仪需要使用高精度的动镜系统连续扫描一个周期的光程差来实现输入信号的测量。因此,无法应用于对瞬态目标的测量。

如图 10 所示,目标 T 经过准直镜 L1 平行入射到半反半透镜 S 上,一束平行光透过半反半透镜 S 后经过固定反射镜 M2 反射后再次进入到半反半透镜 S 上,另外一束由半反半透镜反射后经过动镜 M1 再次反射后也进入到半反半透镜 S。由于两束平行光来自于同一目标,因此两束光为相干光,并在半反

半透镜上发生干涉。干涉图案由聚焦镜 L2 汇聚成像在探测器 R 上。

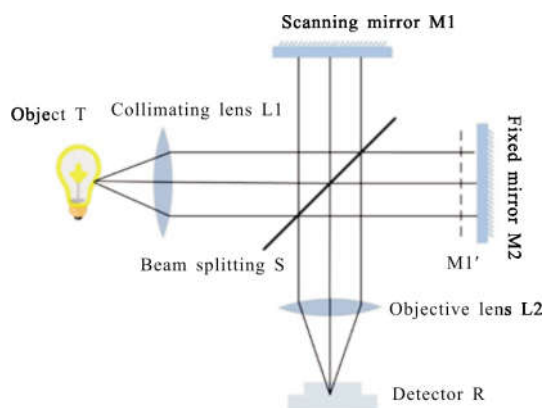


图 10 傅里叶变换光谱仪示意图

Fig.10 Schematic diagram of Fourier transform spectrometer

假设所有元器件都是理想光学器件，入射光为单色光，两束相干光之间的光程差为  $\delta$ ，光强  $I$  为随光程差变化的函数。动镜 M1 按照恒定的速度  $v_0$  扫描就会得到光强随时间变化的关系。探测器上探测到的干涉图为：

$$I(\delta) = B \cos(2\pi\nu\delta) \quad (3)$$

式中： $B$  为对应的单色光的强度； $\nu = 1/\lambda$  为其对应的波数。

在实际应用中，目标并不是单色光，为各种频率的光的组合，此时光强可以写为  $B(\nu)$ 。此时对应的干涉图为：

$$I(\delta) = \int_{-\infty}^{\infty} B(\nu) \cos(2\pi\nu\delta) d\nu \quad (4)$$

由公式(4)可知，干涉图像为各个波段的叠加，因此，傅里叶变换光谱仪是一种多路复用光谱仪。经过傅里叶逆变换，可得到不同频率上的光强分布，即目标的光谱：

$$B(\nu) = \int_{-\infty}^{\infty} I(\delta) \cos(2\pi\nu\delta) d\delta \quad (5)$$

在实际情况下积分不可能从负无穷到正无穷，因此限制了傅里叶变换光谱仪的分辨率。

总体来说，与传统的狭缝光谱仪相比，傅里叶变换光谱仪具有高光通量的优势，但是，其需要一套用于扫描的高精度动镜系统，因此，抗震性较差且不能用于测量快速运动的目标。

为了拓宽傅里叶变换光谱仪的应用范围，发展出静态傅里叶光谱仪。1996 年，Courtial J 提出了一

种基于双 Wollaston 棱镜的新型静态傅里叶变换光谱仪。通过双棱镜之间正负折射材料特性及具有消色差的 45°半波片的相互增强作用，提升了系统的视场<sup>[47]</sup>。日本 G. Zhan 研制了一种有双反射镜、Segnac 分束器以及面阵探测器组成的静态反射式傅里叶变换光谱仪(the Static Reflection Fourier-Transform Spectrometer, SRFTS)，该光谱仪无运动部件，结构紧凑，光谱测量范围为 0.38~1.1  $\mu\text{m}$ ，光谱分辨率为 3 219  $\text{cm}^{-1}$ <sup>[48]</sup>。C.Y. Huang 等提出了一种基于双折射棱镜和双偏振片的傅里叶变换光谱仪，入射光经偏振片入射到棱镜，另一路偏振片对出射光进行重组，在线阵探测器阵列上发生干涉。中国科学院长春光学精密机械与物理研究所王洪亮等提出了一种基于微光学元件的空间调制傅里叶变换光谱仪，使用微结构衍射光学元件、多级微反射镜和微透镜阵列，实现了误差为 2.89% 的光谱测量<sup>[49]</sup>。中国科学院长春光学精密机械与物理研究所李晚侠等设计了一种基于双直角分束器的静态傅里叶变换光谱仪，通过使用双直角分束器，有效折叠光路，从而降低系统体积，为小型化、便携式傅里叶光谱仪的设计提供了支持<sup>[50]</sup>。中国科学院电子学研究所李金洋等针对静态傅里叶变换光谱仪分辨率低的问题提出了采用端面反射铌酸锂波导结构提升其分辨率，实验结果显示：通过端面反射结构能够提升 2 倍的光谱分辨率<sup>[51]</sup>。

虽然静态傅里叶变换光谱仪省去了扫描部件，但是整体结构依旧比较复杂，限制了其进一步的发展。

### 1.3.2 哈达玛变换光谱仪

哈达玛变换光谱仪 (Hadamard Transform Spectrometer, HTS) 的理论基础为统计学中的称重理论。称重理论是指如何精确测量多个物体的质量，多路复用称重理论是在光学系统中的一种推广。假定需要测量质量为  $f_1, f_2, \dots, f_7$  的 7 个物体的质量，传统的测量手段为单独测量每个物体的质量。然而，如果所用的测量仪器的最低测量接近甚至低于被测量物体的最低值，则整个测量的误差会非常大。如果将被测物体按照一定的方式进行组合，每次测量多个物体的质量，则能够大大提升测量的精度，使用公式进行描述为：

$$\eta_1 = f_1 + f_2 + f_3 + f_5 + e_1$$

$$\eta_2 = f_1 + f_2 + f_4 + f_7 + e_2$$

$$\eta_3 = f_1 + f_3 + f_6 + f_7 + e_3$$

$$\begin{aligned} \eta_4 &= f_2 + f_5 + f_6 + f_7 + e_4 \\ \eta_5 &= f_1 + f_4 + f_5 + f_6 + e_5 \\ \eta_6 &= f_3 + f_4 + f_5 + f_7 + e_6 \\ \eta_7 &= f_2 + f_3 + f_4 + f_6 + e_7 \end{aligned} \quad (6)$$

式中:  $f_1, f_2, \dots, f_7$  为待测量;  $e_1, e_2, \dots, e_7$  为每次测量的噪声或误差;  $f_1, f_2, \dots, f_7$  为每次的测量结果。由公式(6)可知, 对于 7 个物体的组合测量一共会进行 7 次, 每次测量中选择 4 个而不是 1 个进行组合测量, 从而降低测量误差。使用矩阵测形式可以表示:

$$\boldsymbol{\eta} = \mathbf{S}\mathbf{f} + \mathbf{e}\boldsymbol{\eta} \quad (7)$$

式中:  $\boldsymbol{\eta}$  为每次组合测量值组成的向量;  $\mathbf{S}$  为编码矩阵;  $\mathbf{f}$  为待测信号组成的向量;  $\mathbf{e}$  为每次测量中的噪声组成的向量。通过求解公式(7), 可以重建得到待测信号:

$$\hat{\mathbf{f}} = \mathbf{S}^{-1}\boldsymbol{\eta} = \mathbf{f} + \mathbf{S}^{-1}\mathbf{e} \quad (8)$$

显然对于单次测量, 待测信号可以表示为:

$$\hat{f}_i = f_i + e_i \quad (9)$$

在两次测量中, 使用的是同种测量仪器, 且认为测量仪器的测量误差保持不变。HTS 中使用的哈达玛循环  $\mathbf{S}$  矩阵作为编码矩阵, 由循环  $\mathbf{S}$  矩阵的性质可知, 从统计的角度上来说有  $(\mathbf{S}^{-1}\mathbf{e})_i < e_i$ 。因此通过组合测量可以显著提升测量精度。

由上述的表述可知, 哈达玛变换光谱仪具有高光通量的优势。近年来, 数字微镜器件(Digital Micromirror Device, DMD) 的出现给传统的 HTS 带来了新生机。在 HTS 中, 使用 DMD 代替传统色散型光谱仪中的狭缝, 对入射光进行组合测量从而提升光通量, 特别适用于微弱信号的测量。典型的反射式 HTS 的结构如图 11 所示。

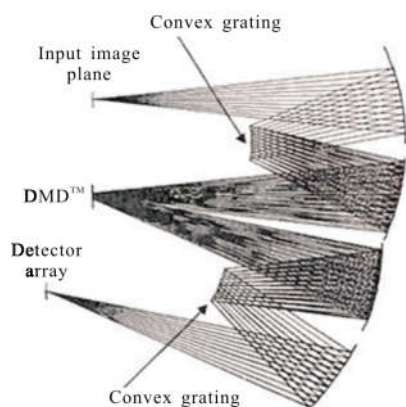


图 11 反射式 HTS

Fig.11 Schematic diagram of reflecting HTS

DMD 的出现为传统哈达玛变换光谱仪带来新的生机。2006 年, 美国 R. M. Hammaker 等首先使用 DMD 作为哈达玛编码的模板, 对入射光进行光谱调制, 从而得到了比传统光谱仪信噪比更高的结果<sup>[52]</sup>。丹麦 B. Rose 制作了基于 DMD 的近红外光谱仪样机并与线阵探测器型的光谱仪进行比较, 指出 DMD 光谱仪的价格和光谱响应可编程的优势<sup>[53]</sup>。华东交通大学徐君研究了哈达玛变换光谱仪中哈达玛像素和交错编码像素的处理方法并以 7 阶哈达玛矩阵为例详细介绍了对应处理过程<sup>[54]</sup>。中国科学院上海技术物理研究所张昊研究了哈达玛变换光谱仪中哈达玛变换的光谱复原技术以及在嵌入式系统上实现的方法<sup>[55]</sup>。中国科学院长春光学精密机械与物理研究所张锐研究了一种基于 DMD 的且具有新型光路结构的中阶梯光栅哈达玛变换光谱仪, 该光谱仪采用新型谱图信息接收方式降低使用成本和数据处理过程的复杂程度<sup>[56]</sup>。中国科学院西安光学精密机械研究所提出了一种基于 DMD 与反射式闪耀光栅自适应光谱分辨率的 HTS, 根据待测目标和观测需求灵活调整光谱分辨率, 从而平衡光谱准确度和测量时间<sup>[57]</sup>。美国洛斯阿拉莫斯国家重点实验室组建了一种基于 DMD 的多通道 HTS, 利用 DMD 对入射光进行编码, 从而采集到 100 个波段的图像<sup>[58]</sup>。中国科学院长春光学精密机械与物理研究所吴一辉等研究了使用二维狭缝阵列的哈达玛变换光谱仪, 并分析了光学结构对信噪比的影响<sup>[59]</sup>。南京理工大学王昭昕等提出当待测光谱为稀疏光谱时, 哈达玛矩阵虽然能够提供可靠的信噪比, 但是重建结果并非最优, 使用 L2 约束可以得到更好的信噪比提升<sup>[60]</sup>。南京理工大学岳江等从理论上详细分析了使用不同编码矩阵(哈达玛  $\mathbf{H}$  矩阵和哈达玛循环  $\mathbf{S}$  矩阵)HTS 的信噪比提升, 并得到了广泛的认可<sup>[61-62]</sup>, 所用系统的原理如图 12 所示。

然而 HTS 需要多次测量才能重建出最终的结果。对于 HTS, 需要  $n$  次扫描才能获得最终的结果( $n$  为 Hadamard 矩阵的阶数), 随着  $n$  的增大, 所需的时间也是线性增加。这就限制了以 HTS 为代表的多路复用光谱仪的用途, 因此, 有必要研究能适用于瞬态测量的 HTS。



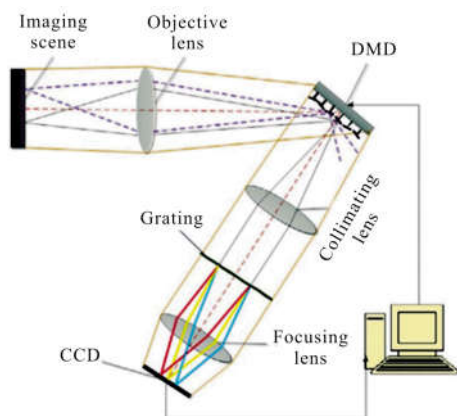


图 12 南京理工大学设计的 HTS

Fig.12 Schematic diagram of HTS designed by NJUST

## 2 结论

综上所述, 基于数值方法的光谱仪虽然可以实现瞬态光谱测量, 但是存在抗干扰能力以及数据可靠性的问题; 基于多路复用编码的光谱仪虽然抗扰能力强、结果可靠但是无法用于瞬态场景的测量, 现有这两种类型的光谱仪均兼顾瞬态测量和稳定、可靠降噪。需要研究如何在光强分布不均匀时实现稳定、可靠的瞬态光谱测量, 进而提升光谱测量的应用范围。

## 参考文献:

[1] Zhao Z, Deng L, Bai L, et al. Optimal imaging band selection mechanism of weld pool vision based on spectrum analysis [J]. *Optics & Laser Technology*, 2019, 110: 145–151.

[2] Sperling Brent A, John Hoang, William A Kimes, et al. Time-resolved surface infrared spectroscopy during atomic layer deposition [J]. *Applied Spectroscopy*, 2013, 67 (9): 1003–1012.

[3] Yoshida Y, Oguma H, Morino I, et al. Mountaintop observation of CO<sub>2</sub> absorption spectra using a short wavelength infrared Fourier transform spectrometer [J]. *Applied Optics*, 2010, 49(1): 71–79.

[4] O’brien C M, Vargis E, Rudin A, et al. In vivo Raman spectroscopy for biochemical monitoring of the human cervix throughout pregnancy [J]. *American Journal of Obstetrics and Gynecology*, 2018, 218(5): 528.e.

[5] Ai Y, Liang P, Wu Y, et al. Rapid qualitative and

quantitative determination of food colorants by both Raman spectra and Surface-enhanced Raman Scattering (SERS)[J]. *Food Chemistry*, 2018, 241: 427–433.

[6] Golay M J E. Multi-slit spectrometry [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1949, 39(6): 437–444.

[7] Donoho D L. Compressed sensing[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2006, 52(4): 1289–1306.

[8] Labaw C. Airborne imaging spectrometer: an advanced concept instrument[C]//Proceedings of SPIE, 1984, 430: 68–75.

[9] Green R O, Chrien T G, Nielsen P J, et al. Airborne visible/infrared imaging spectrometer (AVIRIS): recent improvements to the sensor and data facility[C]//Proceedings of SPIE, 1993, 1937: 180–190.

[10] Babey S K, Anger C D. Compact airborne spectrographic imager (CASI): a progress review[C]//Proceedings of SPIE, 1993, 1937: 152–164.

[11] Braam B M, Okkonen J T, Aikio M, et al. Design and first test results of the Finnish airborne imaging spectrometer for different applications (AISA)[C]//Proceedings of SPIE, 1993, 1937: 142–152.

[12] Rickard L J, Basedow R W, Zalewski E F, et al. HYDICE: An airborne system for hyperspectral imaging [C]//Proceedings of SPIE, 1993, 1937: 173–180.

[13] Shimota A, Kobayashi H, Kadokura S. Radiometric calibration for the airborne interferometric monitor for greenhouse gases simulator [J]. *Applied Optics*, 1999, 38(3): 571–576.

[14] Cocks T, Jenssen R, Stewart A, et al. The HyMap™ airborne hyperspectral sensor: the system, calibration and performance [C]//Proc of the 1st EarseL workshop on Imaging Spectroscopy, 1998, 5: 37–42.

[15] Agar B, Coulter D. Remote sensing for mineral exploration- A decade perspective 1997 –2007 [C]//Proceedings of Exploration, 2007, 7: 109–136.

[16] Barnsley M J, Settle J J, Cutter M A, et al. The PROBA/CHRIS mission: A low-cost smallsat for hyperspectral multiangle observations of the earth surface and atmosphere [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, 42(7): 1512–1520.

[17] Tong Qingxi, Zhang Bing, Zheng Lan. Hyperspectral Remote Sensing [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006. (in Chinese)

[18] Gao Hengzhen. Research on classification technique for Hyperspectral remote sensing imagery [D]. Changsha:

- National University of Defense Technology, 2011. (in Chinese)
- [19] Han Z, Jin Y, Yun C. Spatial and temporal distributions of suspended sediment contents in the Yangtze River Estuary using the CMODIS image data from China's SZ-3 Spacecraft [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2006, 10(3): 381–386. (in Chinese)
- [20] Zhao B, Yang J, Chang L, 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. (in Chinese)
- [21] Descour M, Dereniak E. Computed-tomography imaging spectrometer: experimental calibration and reconstruction results[J]. *Applied Optics*, 1995, 34(22): 4817–4826.
- [22] Cimino P, Neese F, Barone V. Computational spectroscopy: methods, experiments and applications [J]. *Materialstoday*, 2010, 13(2): 55.
- [23] Wei R, Zhou J, Jing J, et al. Developments and trends of the computed tomography imaging spectrometers [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, 30(10): 2866–2873. (in Chinese)
- [24] Okamoto T, Yamaguchi I. Simultaneous acquisition of spectral image information [J]. *Optics Letters*, 1991, 16(16): 1277–1279.
- [25] Mooney J M, Vickers V E, An M, et al. High-throughput hyperspectral infrared camera [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1997, 14(11): 2951–2961.
- [26] Fang J, Zhao D, Jiang Y. A new method in imaging spectrometry[C]//Proceedings of SPIE, 2002, 4922: 56–62.
- [27] Hagen N, Dereniak E L. Analysis of computed tomographic imaging spectrometers. I. Spatial and spectral resolution[J]. *Applied Optics*, 2008, 47(28): F85–F95.
- [28] Candes E J, Tao T. Decoding by linear programming [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2005, 51(12): 4203–4215.
- [29] Candès E J, Romberg J, Tao T. Robust uncertainty principles: Exact signal reconstruction from highly incomplete frequency information[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2006, 52(2): 489–509.
- [30] Brady D J, Gehm M E. Compressive imaging spectrometers using coded apertures [C]//Visual Information Processing, 2006, 6246: 62460A.
- [31] Gehm M E, John R, Brady D J, et al. Single-shot compressive spectral imaging with a dual-disperser architecture[J]. *Optics Express*, 2007, 15(21): 14013–14027.
- [32] Wagadarikar A, John R, Willett R, et al. Single disperser design for coded aperture snapshot spectral imaging [J]. *Applied Optics*, 2008, 47(10): B44–B51.
- [33] Galvis L, Arguello H, Arce G R. Coded aperture design in mismatched compressive spectral imaging [J]. *Applied Optics*, 2015, 52(10): 2153–2162.
- [34] Parada A, Arce G R. Spectral Super-resolution in colored coded aperture spectral imaging [J]. *Imaging and Applied Optics*, 2015, 2(4): 440–455.
- [35] Ma Y, Lv Q, Liu Y, et al. Effect evaluation of optical magnification errors for coded aperture spectrometer [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2014, 34(11): 3157–3161. (in Chinese)
- [36] Lou J, Li Y, Xiong L. Catadioptric omnidirectional compressive imaging based on coded aperture [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(4): 0411004. (in Chinese)
- [37] Kazemzadeh F, Wong A. Resolution-and throughput-enhanced spectroscopy using a high-throughput computational slit [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(18): 4352–4355.
- [38] Ma X, Wang H, Wang Y, et al. Improving the resolution and the throughput of spectrometers by a digital projection slit[J]. *Optics Express*, 2017, 25(19): 23045–23050.
- [39] Yue J, Han J, Zhang Y, et al. High-throughput deconvolution-resolved computational spectrometer [J]. *Chinese Optics Letters*, 2014, 12(4): 043001.
- [40] Gehm M E, McCain S T, Pitsianis N P, et al. Static two-dimensional aperture coding for multimodal, multiplex spectroscopy[J]. *Applied Optics*, 2006, 45(13): 2965–2974.
- [41] Fernandez C A, Guenther B D, Gehm M E, et al. Longwave infrared (LWIR) coded aperture dispersive spectrometer[J]. *Optics Express*, 2007, 15(9):5742–5753.
- [42] Zhou Y, Rushforth C K. Least-squares reconstruction of spatially limited objects using smoothness and non-negativity constraints[J]. *Applied Optics*, 1982, 21(7): 1249–1252.
- [43] Wagadarikar A A, Gehm M E, Brady D J. Performance comparison of aperture codes for multimodal, multiplex spectroscopy[J]. *Applied Optics*, 2007, 46(22): 4932–4942.
- [44] Kong Y, Liang J, Wang B, et al. The investigation and simulation of a novel spatially modulated micro-fourier transform spectrometer [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2009, 29(4): 1142–1146.
- [45] Lv J, Liang J, Liang Z. Theoretical analysis on stationary Gaussian random noise in narrowband Fourier transform

- spectrometer[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(7): 89–96. (in Chinese)
- [46] Jin W, Liang J, Liang Z, et al. Development of micro fourier transform spectrometer[J]. *Microprocessors*, 2017, 38(3): 52–59. (in Chinese)
- [47] Courtial J, Patterson B A, Harvey A R, et al. Design of a static Fourier-transform spectrometer with increased field of view[J]. *Applied Optics*, 1996, 35(34): 6698–6702.
- [48] Zhan G. Static Fourier-transform spectrometer with spherical reflectors[J]. *Applied Optics*, 2002, 41(3): 560–563.
- [49] Wang H, Lv J, Liang J, et al. Design and analysis of medium wave infrared miniature atatic Fourier transform spectrometer[J]. *Acta Physica Sinica*, 2018, 67(6): 060702. (in Chinese)
- [50] Li W, Lu Q, Song Y, et al. Reflective static fourier spectrometer optical system based on double right-angle beam splitter [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(8): 0812004. (in Chinese)
- [51] Li J, Lu D, Qi Z. End-face reflected LiNbO<sub>3</sub> waveguide based stationary miniature Fourier transform spectrometer with two-fold enhanced spectral resolution [J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 64(11): 114207. (in Chinese)
- [52] Hammaker R M, DeVerse R A, Asunskis D J, et al. Handbook of Vibrational Spectroscopy[M]. New Jersey: John Wiley & Sons, Ltd, 2006.
- [53] Rose B, Rasmussen M, Herholdt-Rasmussen N, et al. Programmable spectroscopy enabled by DLP[C]//Proceedings of SPIE, 2015, 9376: 93760I.
- [54] Xu J, Zhu Z, Liu C, et al. The processing method of spectral data in Hadamard transforms spectral imager based on DMD[J]. *Optics Communications*, 2014, 325: 122–128.
- [55] Zhang H. Research on key technologies for coded aperture imaging spectrometer based on DMD[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Science, 2016. (in Chinese)
- [56] Zhang R, Pan M, Yang J, et al. Optical system of echelle spectrometer based on DMD [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(12): 2994–3000. (in Chinese)
- [57] Xu J, Liu Z, Jiang N, et al. Hadamard transform spectral imager of adaptive spectral resolution based on DMD [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2013, 33(7): 2006–2009. (in Chinese)
- [58] Love S P, Graff D L. Full-frame programmable spectral filters based on micromirror arrays [J]. *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, 2014, 13(1): 011108.
- [59] Chi M, Wu Y, Qian F, et al. Signal-to-noise ratio enhancement of a Hadamard transform spectrometer using a two-dimensional slit-array[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(25): 7188–7193.
- [60] Wang Z, Yue J, Han J, et al. High-SNR spectrum measurement based on Hadamard encoding and sparse reconstruction[J]. *Applied Physics B*, 2017, 123(12): 277–284.
- [61] Yue J, Han J, Zhang Y, et al. Denoising analysis of Hadamard transform spectrometry [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(13): 3744–3747.
- [62] Yue J, Han J, Li L, et al. Denoising analysis of spatial pixel multiplex coded spectrometer with Hadamard H-matrix [J]. *Optics Communications*, 2018, 407: 355–360.