

文章编号: 1672-8785(2009)09-0020-06

傅里叶变换光谱仪动镜驱动控制技术

刘日龙 殷德奎

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

摘 要: 动镜驱动控制技术是傅里叶变换光谱仪的重要组成部分。本文从干涉成像光谱技术原理出发, 介绍了迈克尔逊型傅里叶变换光谱仪动镜驱动技术的进展及其应用情况。提出了新型摆扫式干涉机构动镜驱动系统的方案。基于模糊 PID 控制策略, 给出了此驱动系统的闭环控制实现方法。

关键词: 傅里叶变换; 干涉仪; 直线电机; 动镜; 模糊控制

中图分类号: TH744 **文献标识码:** A

Driving Control Technology for Moving Mirror of Fourier Transform Spectrometer

LIU Ri-long, YIN De-kui

(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: The driving control technique of a moving mirror is very important for a Fourier transform spectrometer. According to the principle of an interference imaging spectroscopy, the progress of the driving techniques of moving mirrors and their applications in Fourier transform spectrometers are presented. A new driving method of a moving mirror based on an oscillating interference framework is proposed. On the basis of the fuzzy PID control, the implementation of the closed loop control method of this driving system is given.

Key words: Fourier transform; interferometer; linear motor; moving mirror; fuzzy control

1 引言

基于傅里叶变换的干涉成像光谱仪是一种高分辨率光谱仪器, 它具有常规光谱仪器无法比拟的优点^[1]。干涉成像光谱技术是利用干涉图的傅里叶变换获取光谱的技术, 利用双光束干涉的有迈克尔逊型、Mach-Zender 型和 Sagnac 型, 其中又以迈克尔逊型傅里叶光谱仪最为常见。干涉式大气垂直探测仪是一种迈克尔逊型傅里叶变换光谱仪, 是气象卫星上搭载的主要红外遥感仪器之一, 它是利用大气和地球表面的红外辐射性质从空间遥感大气温度、湿度和大气成分的垂直分布的。

动镜驱动控制系统是星载傅里叶变换光谱仪的一个重要组成部分。为了驱动动镜使其完成扫描运动, 需要用设计合理的动镜驱动控制系统控制动镜作高精度的匀速运动, 并达到指标要求。动镜驱动系统包括控制器、驱动单元、运动执行机构及检测装置。检测装置用以将测量值反馈给控制器, 使其按照预先设定的控制策略驱动运动执行机构。

2 动镜驱动技术的进展

迈克尔逊型傅里叶变换光谱仪的工作原理是, 动镜和定镜反射的两路光形成变化相位差, 当动镜运动时, 调制干涉信号强度形成干涉图。

收稿日期: 2009-04-29

作者简介: 刘日龙(1979-), 男, 江西湖口人, 博士研究生, 主要研究方向为红外光电技术。E-mail: iiii@ustc.edu

动镜运动方式可以是旋转式、直线往复式和摆动式。旋转式虽然平稳,但时间利用率低。另外对于特定的通光孔径,结构很大,因此在星载仪器中极少使用此扫描结构。直线往复式运动质量较小,光路短,适合于星载大视场探测。美国的 CrIS 与 GIFTS、法国的 IASI、德国的 MIPAS 及日本的 IMG 等都采用了直线往复式结构。摆动式是利用角镜的自反射特性来实现原光路反射的,该方案结构紧凑,机械扫描速度相对较低,仪器对机械扫描过程中的倾斜、磨损等不敏感。日本的 SOFIS 和加拿大的 ACE-FTS 采用了摆动式扫描机构^[2,3]。

美国 NASA-Langley 研究中心研制了一种傅里叶变换光谱仪动镜直线运动驱动装置。它是由精密压电材料驱动器 RAINBOW 叠层而形成的,具有较大的行程和较高的运动精度。构成 RAINBOW 驱动器的压电材料有 PZT-5A 和 PZT-5H 两种,其中 PZT-5A 型 RAINBOW 的驱动能力更强,功耗更低,因此使用更广泛。单个 RAINBOW 依据驱动器的大小可以产生几百微米的位移,把多个 RAINBOW 叠加在一起便可产生更大的位移。压电材料的响应速度非常快,启动力矩较大,带宽宽且易于控制。但压电材料的行程非常小,需要使用位移放大器或双叠层结构,这些附加的机械元件会降低压电材料的响应速度并增加整个系统的复杂性。

NASA-Goddard 空间飞行中心的研究人员提出了由形状记忆合金构成的动镜直线驱动装置。形状记忆合金由特殊材料,如镍钛合金,经过特殊的加工工艺制成。当在室温下将这种合金预拉伸然后进行电加热时,合金就会收缩。在临界温度点,合金的内部结构会发生改变。这种合金的热膨胀效应不同于普通材料的热膨胀效应,它的伸缩量更大。其主要特点是质量轻,价格低,带宽窄,比较适合于中、低扫描机构的中、低分辨率光谱仪。该驱动装置曾应用于 1997 年 10 月发射的 CIRS 傅里叶光谱仪。

傅里叶变换光谱仪动镜驱动机构较多使用的是直线电机,其工作原理是通电线圈被放在磁场内时会产生力,而且力的大小与施加在线

圈上的电流成比例。基于此原理制造的直线电机运动形式可以为直线或圆弧。直线电机具有结构简单、体积小、高速及响应速度快等特点,它可密封成整体,能应用于零下几百度等特殊场合,可实现无机械接触运动,传动部件无磨损,机械损耗小。这些突出的优点使得绝大多数星载大气垂直探测仪都使用直线电机作为动镜驱动装置。如美国的 CrIS、GHIS,法国的 IASI,德国的 MIPAS,日本的 IMG 和 ATRAS 等仪器都是使用直线电机来驱动动镜运动的^[4,5]。

3 典型的傅里叶变换光谱仪动镜驱动技术

动镜驱动控制在干涉式大气垂直探测仪中应用得非常广泛,下面给出几种典型的基于极轨卫星平台的大气垂直探测仪动镜驱动技术实现方法。

3.1 IASI 动镜驱动机构

IASI 是欧洲气象卫星组织 (EUMETSAT) 与法国国家空间中心 (CNES) 合作由法国 Alcatel 公司研制的仪器,是欧洲空间局 (ESA) 开发的 METOP 极轨卫星的主要载荷。干涉仪的两臂都采用角镜,其中的一个角镜用直线电机驱动,角镜驱动单元由以下几个部分组成^[6]:

铝合金主结构,由三个挠性支架固定在光学平台单元上;两个挠性双补偿平行四边形结构,高强度的铜铍合金膜片确保导向机构精确定位;连接两个平行四边形结构上部的中间平台;支撑角镜和电机线圈的移动平台;安装在移动平台上角镜对边的平衡质量块;用于补偿残余导向误差的、约束平行四边形结构运动的驱动杆;磁扼固定的直线电机;用于控制动镜速度的、分辨率超过 $0.125\mu\text{m}$ 的光学线性编码器;基于形状记忆合金的锁定装置,用于在发射阶段保护驱动机构。

采用上述驱动单元能保证较高的导向性能,倾斜度小于 $200\mu\text{rad}$,而且施加给仪器和空间飞行器的力和力矩都较小。

3.2 CrIS 动镜驱动方式

CrIS 是美国 NASA、DOC、DOD 主持,ITT 公司研制的国家极轨业务环境卫星 NPOESS 的主要探测仪器之一。CrIS 利用了类似于

DAPS(Dynamically Aligned Porch Swing) 式的平面镜驱动装置^[1,7]。该装置的直线电机支撑采用挠性连接的弹簧平行四边形结构, 安装在驱动装置底座的调整机构可以实现光路的高精度对准, 目前可以提供的校准精度为 $5\mu\text{rad} \sim 10\mu\text{rad}$, 而在动态校正之前校准精度最多只有 $100\mu\text{rad}$ 。Porch Swing 结构还有一个被动式锁定机构, 它是用来防止发射对仪器的振动冲击的。在发射过程中, Porch Swing 结构可以自由移动, 但是在 3 轴方向它是通过安装软阻尼器来限定行程的, 因而可确保弹簧片不受过应力。

相对于 IASI 采用的角镜组干涉仪, CrIS 采用带动态校正的平面镜干涉仪, 能提供较好的辐射测量准确度, 造价更低。

3.3 MIPAS 动镜驱动方式

MIPAS 是欧洲空间局 (ESA) 开发的 Envisat-1 极轨卫星的主要载荷之一。干涉仪的两臂都采用了角镜。MIPAS 以干润滑直线滚珠轴承支撑的直线电机驱动方式驱动角镜^[8]。由驱动控制环路处理来自线性光编码器的输入量, 在每一个驱动臂上由线性光编码器形成预先控制, 和由光程差传感器提供的精确控制一起形成对直线电机的精准定位。速度均匀性在 1% 以内。

3.4 国内研究

国内空间干涉式大气垂直探测仪的研究起步较晚, 自 20 世纪 70 年代以来, 国内已有几家单位开展了与干涉仪相关的研究工作^[9]。西安光机所研制了环境卫星探测仪, 其光谱测量范围为 $0.45\mu\text{m} \sim 0.95\mu\text{m}$, 光谱分辨率为 $55.4\text{cm}^{-1} \sim 247\text{cm}^{-1}$ 。浙江大学进行了可见光干涉测量研究。上海技术物理研究所从 1980 年开始, 一直致力于我国气象卫星的大气垂直探测仪的相关研究, 且对直线电机驱动动镜的迈克尔逊型干涉仪进行了初步探索, 获取了 $7.5\mu\text{m} \sim 15\mu\text{m}$ 红外波段的干涉图样。

4 新型傅里叶光谱仪动镜驱动系统

新型星载傅里叶变换光谱仪两块对称布局的动镜通过摆扫平台支撑和定位后选择合适的直线电机, 推动 3kg 左右的反射镜负载作摆扫

运动。为了将电机的直线运动转换成动镜的摆动, 它是用力臂来连接电机和摆扫平台的。通过在摆扫平台侧边安置一个连接力臂的方式, 实现了与驱动机构的连接。直线电机的动轴作直线运动, 通过力臂转换成摆扫平台的摆动, 从而带动动镜进行摆动扫描^[10]。

光电探测器接收激光参考干涉光路输出的正弦信号, 测速电路将反馈信号送给 DSP 控制电路。在 DSP 内, 控制算法实现与期望信号的比较, 同时将控制量输出, 通过 DA 转换送入 PWM 驱动模块, 然后该驱动模块输出控制电压, 以控制电机匀速运行。基于 TMS320LF2407 DSP 芯片的直线电机驱动动镜运动伺服控制系统的实现方案如图 1 所示。

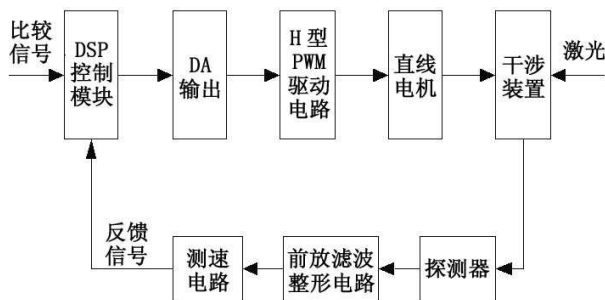


图 1 动镜驱动系统的框图

直线电机功率驱动采用开关型驱动方式, 功耗低, 响应快, 以脉宽调制 (PWM) 方法为最常见^[11]。PWM 控制是高精度伺服控制领域中应用得最广泛的驱动形式, 图 2 为 H 型双极性 PWM 驱动原理图, 它由控制电路和功率转换电路两部分组成。

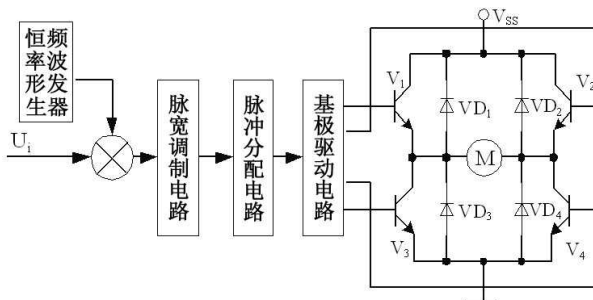


图 2 H 型双极性 PWM 驱动原理图

控制电路由恒频率波形发生器、脉宽调制电路、脉冲分配电路和基极驱动电路组成。H 型

驱动电路由 4 个大功率晶体管组成, 并由单电源供电。其晶体管的耐压较低, 在以双极模式工作时, 电枢电流始终是连续的。PWM 驱动的主要优点是调速范围宽、调制频率高、电流波形好。

电机控制专用芯片将 DSP 核处理器和丰富的功能外设集成在单个芯片上, 为设计小体积、低功耗、高性能的电机控制系统提供了方便, 逐渐成为电机控制的主流技术。DSP 运算速度快, 控制策略中可使用实时算法。TMS320LF2407 DSP 芯片是为了满足电机控制应用而设计的, 在电机控制领域中用得非常广泛。选用以 DSP 为核心的数字控制器扩展少量的外围电路, 便可组成数字控制器。基于 DSP 的数字控制器如图 3 所示。

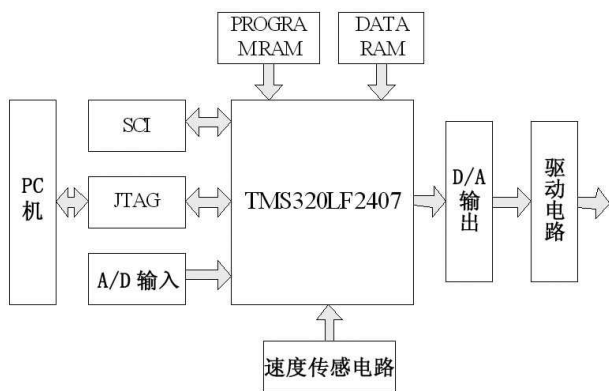


图 3 DSP 数字控制器

星载傅里叶变换光谱仪通常采用激光作为参考光源。He-Ne 激光器的频率稳定性好, 可达到 10^{-7} 。由于它输出单模光斑, 其准直性也较好, 是地面原理性实验的理想光源。采用 He-Ne 激光器作为参考光源, 再在 He-Ne 激光器前加上准直装置即可得到准直性非常好的单色光源。

激光干涉仪是干涉式大气垂直探测仪的参考干涉系统。它采用波长为 632.8nm 的 He-Ne 激光光源。当大气垂直探测仪的动镜运动时, 该光源发出的光在主干涉系统中与目标红外辐射一起同时被调制。通过对光电探测器接收的激光干涉信号进行处理, 便可以获取控制信号, 并用该控制信号来触发主干涉仪等间隔采样及控制动镜匀速运动。设激光干涉信号的频率为 f , 激

光波长为 λ , 动镜速度为 v , 就能满足下面的关系式:

$$f = 2v\lambda \quad (1)$$

根据动镜运动速度和调制信号频率之间具有确定的对应关系这一原理, 电机速度的测量就可以通过测量激光干涉信号的频率 f 来实现。将此正弦信号前置放大, 经过低通滤波再将其整形成方波, 再将该方波信号送入数字频率计进行计数, 然后使用 M/T 法测量其频率, 即测量 N 个方波信号的经过时间, 再除以 N , 就可得到信号的频率 f 。此时, 该频率值便可作为 DSP 的速度反馈信号用以控制动镜匀速运动。

5 动镜驱动闭环控制系统的实现

在新型星载傅里叶变换光谱仪动镜驱动闭环控制系统中, 为了提高系统的稳定性, 采用了电流环和速度环这种双闭环速度控制方法。其中内环为电流环, 通过改造内环控制对象的传递函数, 可提高系统的快速性, 从而使其能快速响应外环的控制输入。外环为速度环, 主要用以保证系统的稳态精度和动态跟踪性能, 直接关系到伺服控制系统的稳定性, 而且也是速度负反馈控制的主通道。多路闭环控制能显著提高系统的控制效果, 但需要内环有足够的带宽来快速响应外环的控制输入, 否则系统的动态误差就有可能超出预期值^[12]。图 4 给出了动镜驱动闭环控制的组成框图, 通过电流采样和速度采样构成了电流负反馈和速度负反馈的双闭环驱动控制方法。

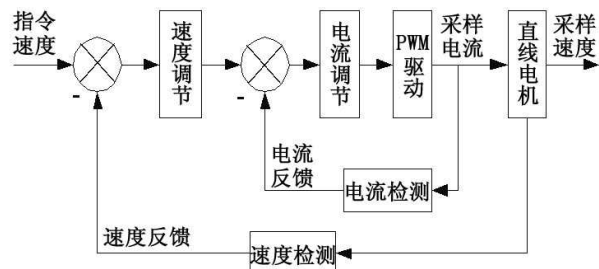


图 4 动镜驱动闭环控制的框图

PID 控制是一种经典的控制方式, 由于其算法简单、鲁棒性好且可靠性高, 已被广泛应用于

工业过程控制, 至今仍有 90% 左右的控制回路具有 PID 结构, 它也是国防等领域中所采用的最经典的控制策略。经典 PID 控制器作为一种线性控制器, 能根据给定值和输出值构成控制偏差, 将偏差按比例、积分和微分通过线性组合方式构成控制量, 从而对被控对象进行控制。

在图 2 的 PWM 驱动原理图中, 是通过一个霍尔电流传感器来检测流过直线电机线圈的电流的。电流检测信号经滤波放大后反馈到电流调节器的输入端, 与输入的电流信号进行比较, 形成电流负反馈回路。对于 H 型 PWM 功率转换电路, 反馈到输入端的信号必须能真实反映流过直线电机脉动电流中的直流分量。依据伺服系统的动态跟踪要求, 电流环的一个重要作用就是使电机线圈电流在动态过程中不超过允许值, 即在突加控制作用时不希望有超调, 或者超调量越小越好; 电流环的另一个重要作用是对电源的电压波动进行及时调节^[13]。电流环采用 PI 控制器可获得较为理想的控制效果, 即在 PID 控制器中去掉微分环节就可构成 PI 控制器。

模糊控制是智能控制的一个重要分支, 对不能准确确定控制对象数学模型的系统具有很好的适应性^[14]。模糊 PID 控制的基本策略是将模糊控制和 PID 控制结合起来, 用偏差 e 和偏差变化率 ec 作为输入, 利用模糊控制规则对 PID 参数进行调整, 使其既具有模糊控制灵活和适应性强的特点, 又具有经典 PID 控制的广泛应用性和控制精度高的特点。图 5 为动镜驱动的模糊 PID 控制原理图。

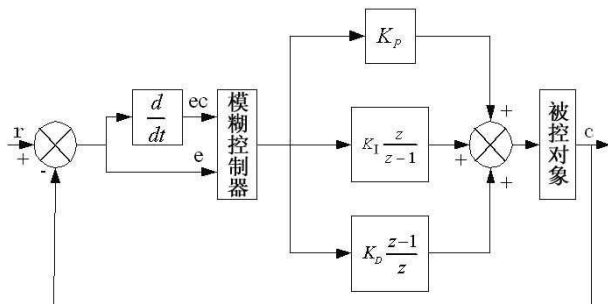


图 5 模糊 PID 控制原理图

动镜驱动系统稳态运行时, 要求具有一定的稳态跟踪精度, 产生的稳态速度误差越小越好。

动镜伺服驱动系统具有非线性, 且系统存在一些不确定因素, 如负载变化, 外部干扰等^[15]。动镜摆扫速度均匀性要求在 2% 以内, 摆扫周期为 0.5s。在 PID 控制中, 由于 K_p 、 K_i 、 K_d 参数固定, 即使合理调节、整定这三个参数, 还是不能满足系统的匀速要求。综合考虑实时性和参数优化的要求, 对作为速度负反馈控制的主通道的速度环, 采用模糊 PID 控制策略, 将速度调节器设计成能够自适应调节 PID 参数 K_p 、 K_i 、 K_d 的模糊控制器, 可以满足系统的匀速运行要求。

6 结束语

动镜驱动控制系统作为星载傅里叶变换光谱仪的重要组成部分, 其性能决定了仪器的干涉效果和光谱分辨率。本文在总结动镜驱动技术发展现状的基础上, 提出了基于 DSP 芯片 TMS320LF2407 的直线电机驱动动镜运动伺服控制系统的实现方法。该系统采用带电流环和速度环的双闭环控制方案, 其中电流环采用 PI 控制器, 速度环采用模糊 PID 控制器。

参考文献

- [1] Glumb R J, Williams F L, et al. Cross-track Infrared Sounder Development Status [C]. *SPIE*, 2003, **5152**: 1-8.
- [2] Williams F L, Schwantes K R, et al. Derivation and Allocation of Requirements for the Crosstrack Infrared Sounder [C]. *SPIE*, 2002, **4486**: 425-436.
- [3] Sellar R G, Boreman G D. Classification of Imaging Spectrometers for Remote Sensing Applications [J]. *Optical Engineering*, 2005, **44**(1): 0136021-0136023.
- [4] Ferrec Y, Taboury J, et al. Optimal Geometry for Sagnac and Michelson Interferometers Used as Spectral Imagers [J]. *Optical Engineering*, 2006, **45**(11): 1156011-1156016.
- [5] Giroux J G, Soucy M, et al. Design of the Atmospheric Chemistry Experiment Instrument [C]. *SPIE*, 2000, **4131**: 334-347.
- [6] Henault F, Buil C, et al. Spaceborne Infrared Interferometer of the IASI Instrument [C]. *SPIE*, 1999, **3437**: 192-202.
- [7] Kuze A, Nakajima H, et al. Conceptual Design of Solar Occultation FTS for Inclined-orbit Satellite on GCOM-A1 [C]. *SPIE*, 2000, **4131**: 305-314.

- [8] Gessner R, Smith D J, et al. MIPAS onboard ENVISAT: Preparations for in-flight Commissioning and Calibration [C]. *SPIE*, 2001, **4540**: 71-80.
- [9] 吴航行, 华建文, 王模昌. 新型红外空间遥感傅里叶变换光谱仪 [J]. *红外与激光工程*, 2004, **33**(4): 387-400.
- [10] 胡. 傅里叶变换光谱仪动镜驱动系统的研究 [D]. 上海: 中国科学院上海技术物理研究所, 2007.
- [11] 叶云岳. *直线电机原理与应用* [M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [12] Liu T H, Lee Y C, et al. Adaptive Controller Design for a Linear Motor Control System [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2004, **40**(2): 601-616.
- [13] 杜志强. 高响应短行程直线直流电机的建模、控制与实验研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2006.
- [14] Tan K K, Dou H, et al. High Precision Linear Motor Control via Relay-Tuning and Iterative Learning Based on Zero Phase Filtering [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2001, **9**(2): 244-253.
- [15] Grandmot F, Drissen L, et al. Development of an Imaging Fourier Transform Spectrometer for Astronomy [C]. *SPIE*, **4842**: 392-401.

简讯 News

新型兆像素级多光谱成像仪

据《Laser Focus World》杂志报道, 美国海洋光学公司和海洋薄膜公司开发了一种可扩展的兆像素级多光谱成像仪。该仪器采用了图案化二向色滤光片以及 CCD 或 CMOS 传感器结构, 适用于低成本、大容量的多光谱成像系统。其中, 图案化二向色滤光片是将薄膜技术和光刻技术相结合而制成的。

一般来说, 多光谱摄像机包含有滤光片转盘或切成小块的二向色薄膜滤光片, 它们被安装于图像传感器的前面。其他一些普通多光谱成像系统则使用含有大量二向色滤光片的多台摄像机, 或是在传统彩色摄像机上采用多块带通滤光片, 从而在 4 到 20 种不同波长上对场景进行成像。

彩色摄像机一般在二维探测阵列上放置不同颜色的凝胶滤光片 (通常为由红外、绿色和蓝色组成的拜耳图案), 并通过这种滤光方法来产生彩色图像。新型兆像素级多光谱成像仪采用了相同的结构, 但淘汰了广谱彩色凝胶滤光片, 取而代之的是在 20nm ~ 200nm 通带内截取特定波段的二色向滤光片。另外, 单个像元可以使用长 (短) 通滤光片, 或者不使用滤光片。

制造商在制造过程中将薄膜制备方法和标准光刻技术相结合, 从而使覆盖在兆像素阵列各像元上的千百万个非常小的二向色薄膜滤光片元件 (特征尺寸为 10 μm , 相邻对准精度为 1 μm) 大体上形成如图 1 所示的图案。在制造微型滤光片时, 先将光刻胶涂在衬底之上, 然后重复掩模对准、曝光、蚀刻、薄膜沉积和剥离这一系列工艺流程来形成滤光片阵列。它们可以直接安装在 CCD 或 CMOS 传感器阵列之上。

由于图像是在一次拍摄中获得的, 所以光谱数据和空间数据被同时获得。考虑到阵列可以达到兆像素尺寸, 空间分辨力略有损失。如同使用现有的数码相机, 先进的递归算法能够将空间信息内容插入到不同波长的像元中, 从而在某一特定波段产生出高分辨率的图像。

如果只需要五个系统, 制造过程显得并不实用或不划算。然而如果需要大量系统, 兆像素级多光谱成像仪的制造过程就可以完全规模化。海洋光学公司的相关技术主管表示, 低成本的多光谱成像仪在人们的生活方面可以提供潜在的巨大帮助: 在确保食品安全上, 它可以通过对产品的扫描来检测出污染物, 例如在土豆和菠菜中爆发的大肠杆菌; 另外, 它还可以在手术中识别和确定癌细胞。虽然有些实验室已经开发出针对这些应用的高光谱系统, 但是它们成本太高、体积太大, 并且对于实质性的广泛应用显得过于复杂。该公司镀膜工艺上的规模经济, 使得多光谱成像仪能够容易地应用在超市、病房、农场以及肉类加工厂之中。

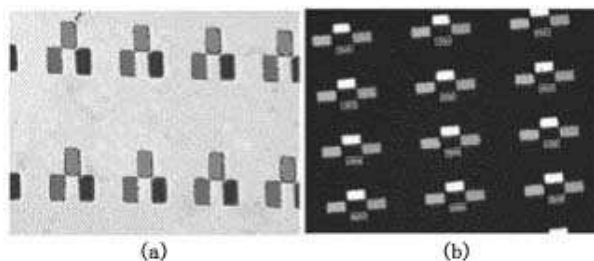


图 1 采用薄膜及光刻混合技术而制造的、用于低成本新型兆像素级多光谱成像仪的二向色滤光片的显微照片。这些滤光片能够通过专门设计而在微光 (左图) 或外加红外滤波 (右图) 的条件下提供场景的彩色图像。其中, 矩形元件的尺寸为 19 μm ×33 μm

□ 岳桢干