

近红外光谱传感物联网研究与应用进展

王绪泉^{1,3}, 王丽丽^{2*}, 方家熊^{1,2**}

¹中国科学院上海技术物理研究所传感技术联合国家重点实验室, 上海 200083;

²山东大学光学高等研究中心, 山东 青岛 266237;

³中国科学院大学, 北京 100049

摘要 通过在感知层中加入定制化的微型光谱感知节点, 近红外(NIR)光谱传感物联网(IoT)实现了 NIR 光谱分析技术和 IoT 技术的集成应用, 进而可以满足 IoT 感知层中对物质成分传感的应用需求。近年来, 中国科学院上海技术物理研究所依托成熟的 InGaAs 焦平面探测器技术, 与山东大学联合, 在 NIR 光谱传感 IoT 的研究和应用上取得了良好进展。首先, 介绍了 NIR 光谱传感 IoT 的系统架构和关键技术。接着, 为了实现光谱感知节点的微型化设计, 重点介绍了集成多通道滤光片和集成线性渐变滤光片的两种微型光谱组件结构及其波长定标方法, 并结合制备工艺对光谱组件的性能展开对比和分析。最后, 基于集成式光谱组件, 进一步介绍了 NIR 光谱感知节点、云服务器和手机客户端的研究应用情况, 并对 NIR 光谱传感 IoT 的未来发展进行展望。

关键词 近红外光谱学; 焦平面探测器; 铟镓砷; 线性渐变滤光片; 物联网

中图分类号 TN219

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202148.1210001

1 引言

进入 21 世纪以来, 信息技术先后经历了互联网时代和移动互联网时代, 正快速向万物互联的物联网(IoT)时代迈进^[1]。从技术架构来看, IoT 系统可以分为感知层、传输层和应用层。随着 IoT 云平台的日趋成熟, “IoT+行业应用”的模式开始在智慧城市、智慧农业、智能交通和智慧医疗等细分领域得到规模化的应用验证^[2-6]。依托于传输层和应用层解决方案的多样化, IoT 感知层节点设备迅速增加, 在 2017 年达到 84 亿, 首次超过全球人口数目^[2]。面对 IoT 多样化的传感需求, 感知层的感知以及认知能力亟需多样化和立体化的发展。对物质成分的传感能力是 IoT 感知层的薄弱环节, 实验室中传统的质谱、色谱和化学分析方法受其技术特点所限, 很难直接应用于注重微型化、低成本和时效性的 IoT 领域。

近红外(NIR)光谱分析技术具有快速、无损、高效的特点, 是一种常用的物质成分分析手段^[7]。近

年来, 光谱分析的商业化趋势推动了分析设备的微型化、网络化和成像化发展, 并在石油化工、谷物筛选、制药等众多工农业生产领域取得成功应用^[7-11]。随着机器学习和深度学习等技术在光谱分析领域的应用取得成功, NIR 光谱分析进一步出现了智能化的发展趋势, 为实现 IoT 领域的智能化成分感知奠定了技术基础^[12-14]。

按照波长范围和使用的传感器种类划分, NIR 光谱传感主要可以分为两类, 一类是使用电荷耦合元件(CCD)、互补金属氧化物半导体(CMOS)类基于已充分发展的 Si 材料传感器, 受到材料本身特性限制, 其响应波段位于 NIR 的短波端(700~1100 nm), 也可以进入可见光波段和紫外波段; 另一类是使用 InGaAs 等化合物材料的传感器, 其响应波段位于 NIR 的长波端(1100~2500 nm), 也可向 NIR 短波端及可见光波段拓展^[7]。在遥感应用、红外探测器和红外材料等专业领域中, 长波 NIR 波段常被称为短波红外。相比于短波 NIR, 长波 NIR 波段含有更丰富的特征信息并且吸收波带重叠程度更低, 因而

收稿日期: 2021-01-12; 修回日期: 2021-03-16; 录用日期: 2021-03-18

基金项目: 国家自然科学基金(62075229)、安徽省科技重大专项(S202003a06020001)、山东省重点研发计划(2019GGX104003)、传感技术联合国家重点实验室开放课题(SKT1907)

* E-mail: wanglili1983@sdu.edu.cn; ** E-mail: jxfang@mail.sitp.ac.cn

具有更广泛的应用前景和开发价值^[7]。按照仪器的分光方式划分,可以将 NIR 光谱设备分为光栅型、滤光片型、傅里叶变换型和声光可调滤波器型等^[7,15]。基于滤光片和阵列探测器的滤光片型光谱分析设备结构紧凑、不含移动部件,非常适合应用于对微型化和便携式设计要求较高的 IoT 领域^[15-23]。得益于 CMOS 工艺的成熟,滤光片型短波 NIR 光谱仪较为常见^[18-20]。国外已经报道了集成线性渐变滤光片(LVF)和 128 元 InGaAs 阵列的微型 NIR 光谱仪,其像元尺寸为 $30\ \mu\text{m} \times 500\ \mu\text{m}$,中心距为 $50\ \mu\text{m}$ ^[1]。虽然当下此类光谱设备的分辨率不高(在 $900\sim 1700\ \text{nm}$ 范围内为 $10\sim 20\ \text{nm}$),但在吸收峰较宽、对光谱分辨率要求不高的 NIR 波段,仍然具有体积和成本方面的优势。

近 10 年来,中国科学院上海技术物理研究所在高灵敏度常规波长($0.9\sim 1.7\ \mu\text{m}$) InGaAs 焦平面、延伸波长($1.0\sim 2.5\ \mu\text{m}$) InGaAs 焦平面以及新型多功能 InGaAs 探测器研究领域取得了良好进展^[24-26],并进一步联合山东大学等相关单位在 NIR 光谱传感 IoT 中开展了开拓性的研究和应用探索。针对 IoT 感知层中物质成分传感的应用需求,采用滤光片作为分光部件与 InGaAs 线列焦平面耦合集成,可以研制微型化 NIR 光谱组件。基于光谱组件进一步设计光学测试附件、信号采集处理电路和无

线通信模块,可以进一步形成 NIR 光谱感知节点,进行光谱传感 IoT 应用。文章首先介绍了 NIR 光谱传感 IoT 系统采用的网络架构和关键技术。接着,针对多种集成光谱组件的微型化结构设计、波长定标、性能测试和分析展开重点阐述,并结合传输层和应用层设计完成了基于光谱组件的 NIR 传感 IoT 应用验证。最后,对 NIR 光谱传感 IoT 的未来发展进行展望。

2 光谱传感物联网系统结构

相比于常规的 IoT 系统,NIR 光谱传感 IoT 在感知层中加入定制化的 NIR 光谱感知节点,通过集成 NIR 光谱分析技术实现 IoT 感知层的成分传感功能^[27-30]。一个典型的光谱传感 IoT 结构如图 1 所示。光谱感知节点和温湿度等其他类型节点组成 IoT 系统的感知层;节点数据通过无线通信远程上传至云服务器(ECS),在云端完成数据解析和预处理后存入数据库相应表内,通过数据发布接口提供手机等移动终端进行远程访问,进而形成完整的传输层数据通路;应用层设计主要依托于移动终端和 ECS 实现,其中 ECS 主要完成传感数据的分类、存储、处理和发布,移动终端作为应用软件(APP)的运行载体,主要完成与用户的人机交互和数据的终端处理^[31-33]。

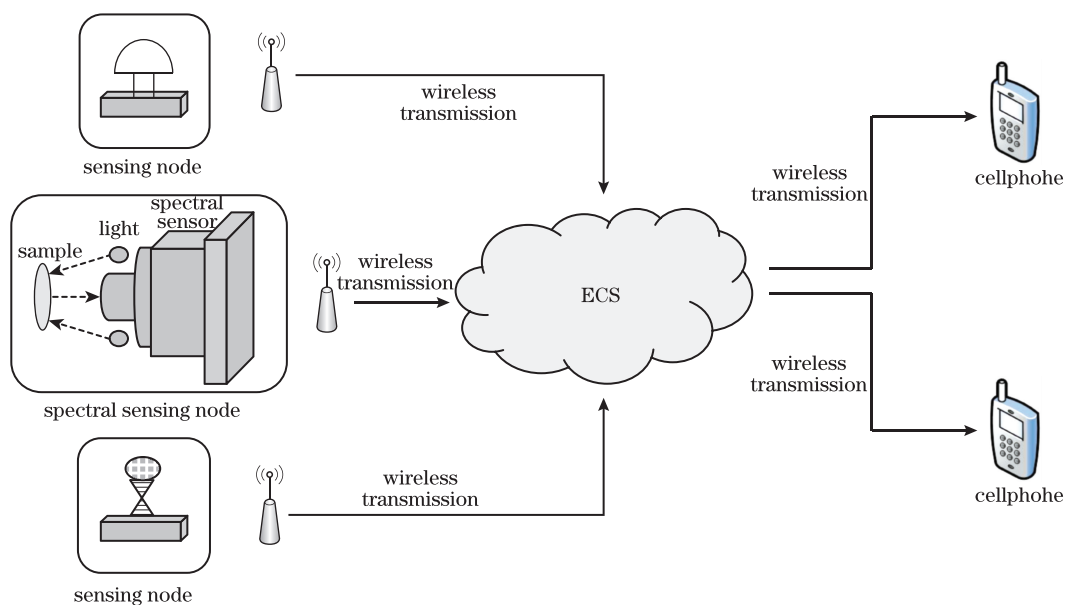


图 1 NIR 光谱传感 IoT 系统架构图

Fig. 1 System architecture of NIR spectral sensing IoT

光谱感知节点可以看作是经过微型化、网络化和便携式设计改进的定制 NIR 光谱仪,在探测器、分光部件、信号采集电路和光学测试附件的基础上

增加了无线通信模块,可以满足 IoT 的应用需求^[28]。光谱感知节点是光谱传感 IoT 系统中的核心部件,光谱感知节点的性能和微型化程度与光谱

组件的结构和设计方案息息相关。

3 近红外光谱组件

InGaAs 探测器不仅可在近室温情况下工作,还具有量子效率高、暗电流低和抗辐照特性强等优点,进而成为高灵敏度、低功耗、小型化、高可靠性 NIR 传感系统的理想选择^[23-25]。将 NIR InGaAs 焦平面阵列与不同波段中心波长的滤光片耦合,可以获得内部集成分光部件的光谱组件。由于没有可移动部件,该结构的光谱组件结构紧凑易于集成,同时还具有高光能量利用率、高可靠性和低成本的优点。以广泛应用的全介质膜窄带通滤光片为例,采用光学镀膜工艺获得高低折射率膜层相互交替的多层反射膜结构,通过调控间隔层厚度,即可获得不同的透过率中心波长 λ ,其理论关系式为^[20, 34]

$$\lambda = 2nd \cdot \cos \theta / N, \quad (1)$$

式中, n 为间隔层介质的折射率, d 为间隔层厚度, θ 为入射角, N 为干涉级次。

3.1 集成式滤光片型光谱组件

采用多波段窄带通滤光片阵列和 InGaAs 线列

探测器耦合是一种常用的 NIR 光谱组件研制方案。一种典型的 64 通道光谱组件结构图如图 2 所示^[35-36],在焦平面的光敏芯片表面利用镀膜工艺制备不同透过率中心波长的膜系结构,通过光敏元与滤光片有效区域的对准匹配实现不同光敏元的特定波长响应。

基于一款 256×1 焦平面研制此集成 64 通道滤光片型光谱组件。其中,光敏芯片设计为正入射的长条形结构,256 个光敏元呈一字型排列,相邻光敏元中心距为 $50 \mu\text{m}$,单个光敏元尺寸为 $50 \mu\text{m} \times 500 \mu\text{m}$ 。光敏芯片通过键合工艺与分布两侧的两个 128×1 读出集成电路(ROIC)完成交叉互联,通过过渡电基板完成信号引出。由于光敏元中心距为 $50 \mu\text{m}$,如采用每个像元作为一个光谱通道,滤光片阵列的每个通道区域较小,对微纳工艺的制备水平要求较高。考虑到滤光片通道制备以及与光敏元对准过程中的工艺误差会对光谱组件性能产生直接影响,因而采用 4 个相邻光敏元复用作为一个光谱通道,在 256 个光敏元上制备 64 个光谱通道,可以极大程度地减小光谱组件制备工程中的工艺误差。

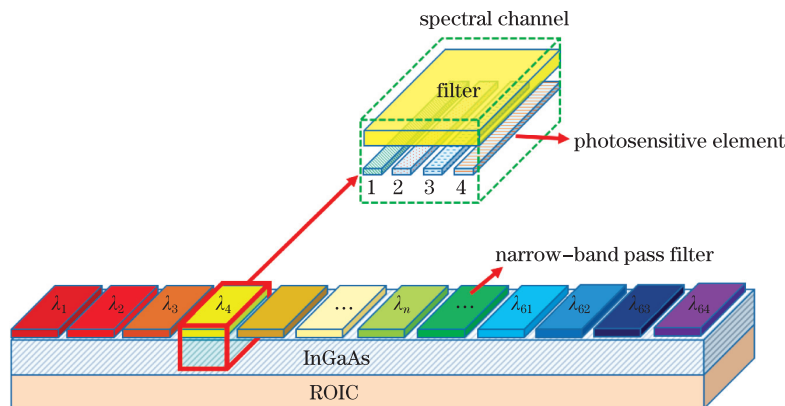


图 2 集成 64 通道滤光片型 256×1 光谱组件结构图

Fig. 2 Architecture of 256×1 spectral sensor integrated 64 channels filter

LVF 是一种楔形介质薄膜法布里-珀罗窄带通滤光片,通过特殊镀膜工艺将窄带滤光片的间隔层制作成楔形,不同位置的间隔层对应不同的等效光学厚度,从而对应线性变化的透过率中心波长^[37-38]。采用一款 $900 \sim 1700 \text{ nm}$ 的 LVF 分别与 256×1 和 512×2 两种规格焦平面进行耦合研制 LVF 型光谱组件^[39-40]。 256×1 焦平面设计参数与 64 通道滤光片型光谱组件所采用的焦平面一致, 512×2 焦平面采用 $25 \mu\text{m} \times 25 \mu\text{m}$ 光敏元尺寸,两列光敏元平行放置,两列中间存在 $25 \mu\text{m}$ 间隔。LVF 型光谱组件

结构如图 3 所示,其中 256×1 型采用单个大光敏元作为一个光谱通道, 512×2 型采用双列多个小光敏元组合作为一个光谱通道,一定程度上可以减少焦平面盲元和非均匀性对光谱信号造成的不良影响。 512×2 型光谱组件的光谱通道配置灵活,可以根据特征波长调整光敏元组合方式,并且光谱通道间预留间隔光敏元可以减少相邻通道间的谱线交叠问题^[40]。

减小 LVF 和光敏芯片的间隔可以减小光谱串扰,提升光谱分辨率。LVF 型光谱组件的装配方案

如图 4 所示, LVF 固定于光阑背面, 与光阑共同反转覆盖于光敏芯片之上。光敏芯片到光阑支架之间的设计高度为 0.5 mm, 与 LVF 厚度一致。为了保留

适当设计余量, 在光阑背面设计了深度为 0.1 mm 的凹槽用来装配滤光片。耦合后 LVF 与光敏芯片的间距约为 0.1 mm, 是一个较为理想的尺寸。

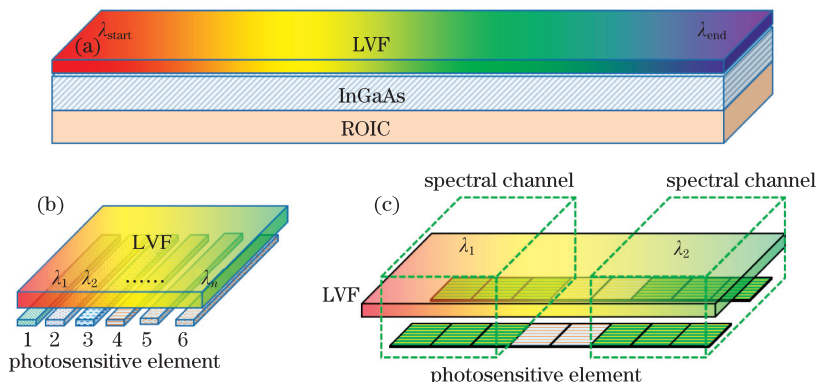


图 3 LVF 型光谱组件。(a) 组件结构图; (b) 256×1 型组件的光谱通道示意图; (c) 512×2 型组件的光谱通道示意图

Fig. 3 Spectral sensor integrated LVF. (a) Architecture of the spectral sensor;

(b) spectral channels of 256×1 spectral sensor; (c) spectral channels of 512×2 spectral sensor

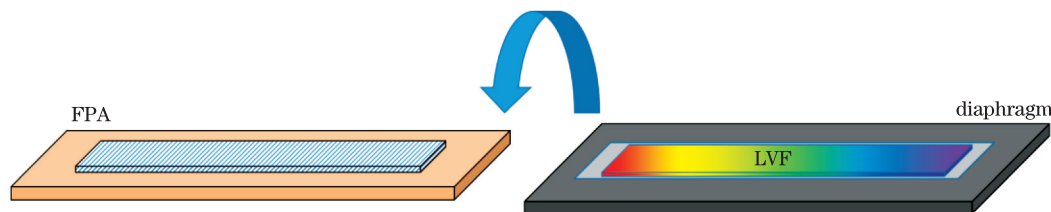


图 4 LVF 型光谱组件装配方案

Fig. 4 Assembly structure of LVF spectral sensor

3.2 光谱组件性能分析

采用单色仪和焦平面测试系统采集各光敏元对单色光的响应, 按照设计结构完成对各个光谱通道的波长定标, 并采用稀土氧化物玻璃等标准物质对标定结果进行验证。三种光谱组件的详细定标过程在早期论文中有详细介绍^[35, 39-40], 下面重点对不同光谱组件的性能进行对比和分析。

三种光谱组件的波长定标结果如图 5 所示。多通道滤光片型光谱组件由四个光敏元合并作为一个光谱通道, 通道中心波长定为四个光敏元响应波长的均值, 64 个通道的波长范围为 1350~1550 nm。LVF 型 256×1 光谱组件中每个光敏元作为一个光谱通道, 由于 LVF 尺寸问题, 共有 204 个光谱通道, 波长范围为 950~1700 nm。LVF 型 512×2 光谱组件中两列的 6 个相邻光敏元(3×2)作为一个光谱通道, 相邻光谱通道间预留 4 个光敏元(2×2)作为间隔, 共有 103 个光谱通道, 波长范围为 950~1700 nm。

三种光谱组件光谱通道的响应曲线细节如图 6 所示。相比于 LVF, 多通道型滤光片由于是在光敏芯片表面直接镀膜, 因而具有较高的分辨率特性, 其半峰全宽为 5~9 nm, 随波长增加而增大。LVF 受益于连续渐变的结构, 受通道间滤光片的边缘突变效应对准问题影响较小, 因而光谱通道间的均匀性和一致性相比多通道滤光片较好, 这可以从图 5 和图 6 得到验证。但受限于 LVF 的制备工艺, 此方案光谱组件的通道半峰全宽很难做到 10 nm 以下, 且随波长增加而增大, 约为中心波长的 1.25%。此

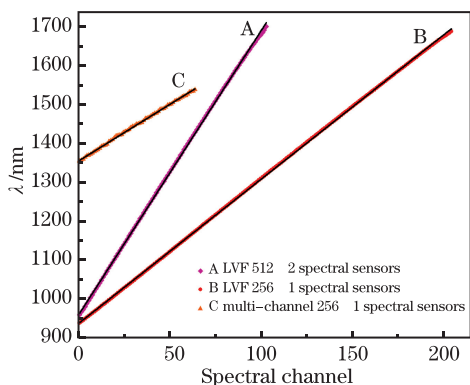


图 5 三种光谱组件的光谱通道与中心波长关系

Fig. 5 Corresponding relations between wavelength and spectral channels of three spectral sensors

外,滤光片型光谱组件普遍存在光谱通道间的谱线交叠问题,通过多光敏元组合和预留通道间隔,512×2 LVF 型光谱组件的谱线交叠得到了显著改善,相邻光谱通道的光谱响应曲线在峰值高度的 80% 左右区域交叠,基本符合瑞利判据标准,因而光谱通道间的串扰可以忽略,验证了此光谱通道划分

方式具有较高的可行性。

综上所述,现阶段滤光片型光谱组件的性能主要受滤光片性能所限。其中,多通道型滤光片主要存在与光敏芯片对准问题和性能一致性问题,LVF 则是分辨率稍显不足,而普遍存在的通道间谱线交叠问题可以通过光谱通道结构设计予以显著改善。

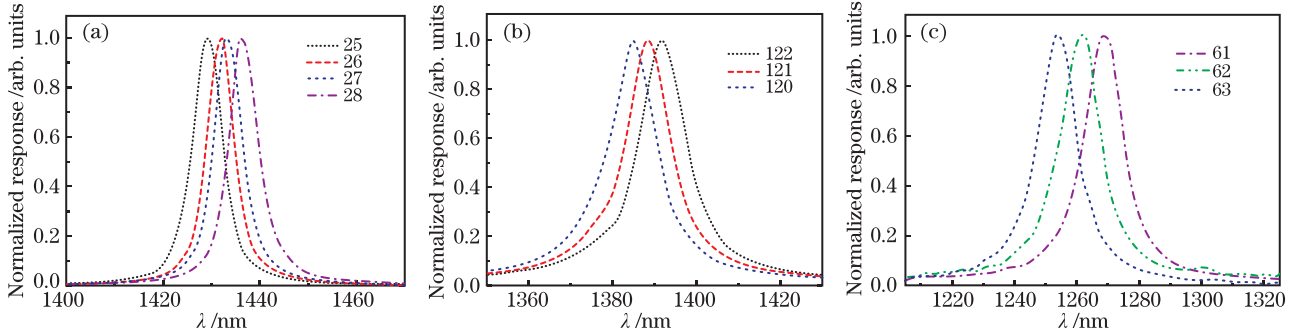


图 6 三种光谱组件的归一化光谱响应。(a)64 通道滤光片型光谱组件;
(b)256×1 LVF 型光谱组件;(c)512×2 LVF 型光谱组件

Fig. 6 Normalized spectral response of three spectral sensors. (a) Spectral sensor integrated 64 channels filter;
(b) 256×1 LVF spectral sensor;(c) 512×2 LVF spectral sensor

4 近红外光谱传感物联网应用验证

光谱传感 IoT 应用验证采用图 1 所示的网络结构,首先基于 256×1 LVF 型光谱组件研制微型光谱感知节点^[28],主要包括具有光束准直和均匀功能的光学测试附件设计、数据采集电路设计和无线通信模块设计。光谱数据的传输流程如图 7 所示,光谱数据采集完成后,光谱感知节点内的处理器通过 attention(AT)指令启动窄带物联网(NB-IoT)模组开始传输,数据经运营商的 IoT 卡和基站上传至 ECS。相比于传统的无线传感器网络,光谱节点选用的 NB-IoT 技术是基于蜂窝网络的 IoT 定制通信技术,具有广覆盖、低功耗和大容量特点,非常适合光谱传感 IoT 的数据传输。NB-IoT 模组可以利用内置全球导航卫星系统(GNSS)功能进行卫星定位,通过运营商网络与 ECS 建立传输控制协议/网际(TCP/IP)协议连接,

上传光谱节点的编号、工作参数、位置信息和光谱数据到指定端口。ECS 作为数据平台,将上传的参数信息、位置信息和光谱数据分类解析后存储于数据库,并发布外部接口供移动终端的软件调用查询。用户使用账号和密码登录手机客户端应用程序,选择特定编号和位置的光谱感知节点,查询并下载其特定时间的光谱数据,完成光谱数据的显示和预处理。光谱传感物联网 IoT 的实际应用效果如图 8 所示。

对于三种不同结构的光谱组件,均进一步开展相应的光谱感知节点研制。针对 64 通道滤光片型光谱组件,开展节点专用的光学结构设计,探讨远距离探测及入射光角度带来的问题和影响,取得了有益效果^[41-42]。使用 256×1 LVF 型光谱感知节点测试了 SRM 2035a 稀土氧化物玻璃、低压汞灯、多种激光器的光谱曲线,验证了节点的基本性能参数^[28]。基于 512×2 LVF 型光谱感知节点搭建测

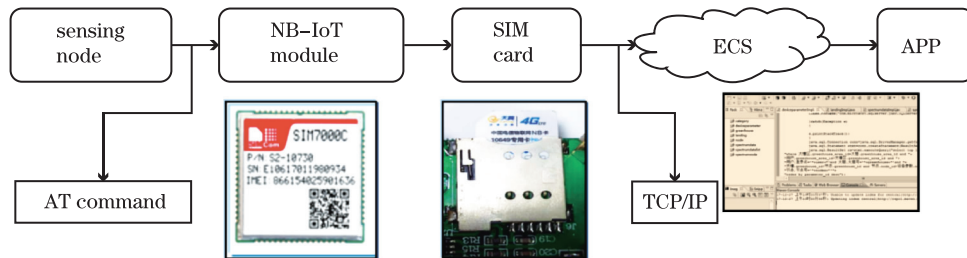


图 7 光谱传感 IoT 的典型数据通路

Fig. 7 Typical data path of spectral sensing IoT

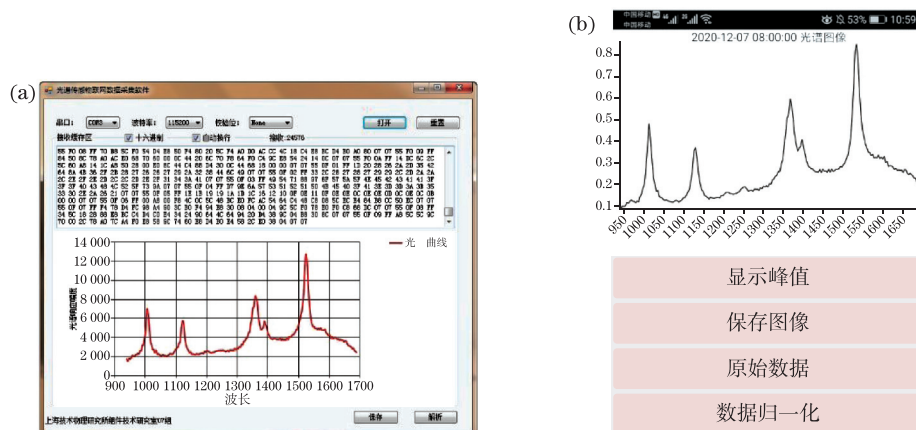


图 8 光谱传感 IoT 实际应用效果图。(a)光谱感知节点测试的低压汞灯谱线；(b)手机客户端特定时间获取的测试谱线
Fig. 8 Practical application demonstration pictures of spectral sensing IoT. (a) Spectrum of low pressure mercury lamp tested by spectral sensing node; (b) test spectrum obtained by mobile phone client at a specific time

试平台,对 4 种不同标称乙醇浓度的酒类样本进行测试,获得了实际应用验证^[30]。在光谱感知节点的无线通信接口上,分别开展了基于 433 MHz 无线模块、Zigbee 协议组网、GPRS、3G 和 NB-IoT 蜂窝网络的接口开发,实现了 NIR 光谱数据的近距离和广域传输,为后续光谱传感网络的野外应用奠定了技术基础^[28,31]。分别使用“阿里云”和“华为云”搭建 ECS 平台,实现了光谱数据的多平台转存和发布。在光谱分析模型开发上,针对土壤样本开展有机质和总氮含量数据预处理和建模研究^[43],实现了崂山绿茶和日照绿茶的产地溯源和生产日期鉴别验证^[44-45]。在 NIR 光谱分析软件开发上,自主开发绿茶成分分析软件 ARCO-NIR,实现了光谱信息预处理、特征波长提取、定性识别和定量回归四大功能模块的集成^[36]。在手机客户端分析软件开发上,实现了光谱曲线的绘制和图像的保存功能,集成了光谱数据的归一化、一阶微分、二阶微分、峰值寻找等数据处理功能和温湿度、二氧化碳浓度、光照强度等环境数据显示功能^[32-33]。在下一代光谱组件的研发上,通过在 ROIC 内部片上集成逐次逼近寄存器(SAR)结构模数转换器(ADC),实现了光谱组件传感器内的数字化,并取得了应用验证^[46-48]。片内数字化不仅有效改善了组件的噪声性能,更为下一步片上的智能化信号处理奠定了技术基础。

在光谱传感 IoT 的后续发展中,需要考虑光谱分析模型的嵌入方式。从整个网络结构来看,光谱感知节点集成、ECS 集成和手机客户端集成是三个可行方案。光谱感知节点集成的优势在于数据在系统最前端处理,可以显著减小数据传输和服务器存储压力,缺点是对节点的数据处理能力要求较高,且

分析模型的配置灵活性较差,在当前的技术水平下有较高的后续维护成本。相比于节点,智能手机拥有更高的算力,但位置位于系统最末端,需要对大量的原始数据进行多次传输。ECS 位于 IoT 的平台层,拥有最强的算力,将多种应用的模型布置在云平台,可以直接完成光谱数据的处理和分析,并将结果反馈至用户手机客户端,具备较高的技术可行性。长远来看,光谱传感 IoT 未来的发展方向是网络节点的智能化,在分光结构和 ADC 集成的基础上,进一步实现片上系统(SoC)、无线通信模块以及智能分析算法的集成,最终由 NIR 光谱感知节点发展为专用的 NIR 智能光谱传感器。

5 结束语

介绍了 NIR 光谱传感 IoT 系统的网络架构和关键技术。为了实现光谱感知节点的微型化设计,提出集成多通道滤光片和集成 LVF 这两种微型光谱组件结构,在波长定标的基础上,结合焦平面、滤光片的特性及耦合工艺对两种光谱组件开展性能对比和分析。标定结果表明,多通道型滤光片主要存在与光敏芯片对准问题和性能一致性问题,LVF 则是分辨率稍显不足,通道间谱线交叠问题可以通过光谱通道结构设计予以显著改善。基于集成式光谱组件,进一步介绍了 NIR 光谱感知节点、ECS 和手机客户端的研究应用现状,并对 NIR 光谱传感 IoT 的未来发展进行了展望。

参 考 文 献

- [1] Fang J X. Research on the development of electronic information engineering technology in China [M].

- Beijing: Science Press, 2018: 1-23.
- 方家熊. 中国电子信息工程科技发展研究[M]. 北京: 科学出版社, 2018: 1-23.
- [2] Yu W P. Annual report on the development of the Internet of Things in China 2017-2018[J]. *Internet of Things Technologies*, 2018, 8(10): 5-6.
- 于文平. 《2017—2018 中国物联网发展年度报告》发布[J]. *物联网技术*, 2018, 8(10): 5-6.
- [3] Chen H M, Cui L. Design and model checking of service oriented software architecture for Internet of Things: a survey[J]. *Chinese Journal of Computers*, 2016, 39(5): 853-871.
- 陈海明, 崔莉. 面向服务的物联网软件体系结构与模型检测[J]. *计算机学报*, 2016, 39(5): 853-871.
- [4] Xiong B H, Yang Z G, Yang L, et al. Review on application of Internet of Things technology in animal husbandry in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(S1): 237-246.
- 熊本海, 杨振刚, 杨亮, 等. 中国畜牧业物联网技术应用研究进展[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(S1): 237-246.
- [5] Wang J Y, Li C, Xiong Z, et al. Survey of data-centric smartcity[J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2014, 51(2): 239-259.
- 王静远, 李超, 熊璋, 等. 以数据为中心的智慧城市研究综述[J]. *计算机研究与发展*, 2014, 51(2): 239-259.
- [6] Li J, Guo M R, Gao L L. Application and innovation strategy of agricultural Internet of Things [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(S2): 200-209.
- 李瑾, 郭美荣, 高亮亮. 农业物联网技术应用及创新发展策略[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(S2): 200-209.
- [7] Chu X L. Handbook of near infrared spectroscopy [M]. Beijing: China Machine Press, 2016.
- 褚小立. 近红外光谱分析技术实用手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2016.
- [8] Chu X L, Shi Y Y, Chen P, et al. Research and application progresses of near infrared spectroscopy analytical technique in China in past five years[J]. *Journal of Instrumental Analysis*, 2019, 38(5): 603-611.
- 褚小立, 史云颖, 陈瀑, 等. 近五年我国近红外光谱分析技术研究与应用进展[J]. *分析测试学报*, 2019, 38(5): 603-611.
- [9] Chu X L, Lu W Z. Research and application progress of near infrared spectroscopy analytical technology in China in the past five years [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2014, 34(10): 2595-2605.
- 褚小立, 陆婉珍. 近五年我国近红外光谱分析技术研究与应用进展[J]. *光谱学与光谱分析*, 2014, 34(10): 2595-2605.
- [10] Wang D J, Zhou X Y, Jin T M, et al. Application of near-infrared spectroscopy to agriculture and food analysis [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2004, 24(4): 447-450.
- 王多加, 周向阳, 金同铭, 等. 近红外光谱检测技术在农业和食品分析上的应用[J]. *光谱学与光谱分析*, 2004, 24(4): 447-450.
- [11] Liu W Q, Chen Z Y, Liu J G, et al. Advances with respect to the environmental spectroscopy monitoring technology[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(5): 0500001.
- 刘文清, 陈臻懿, 刘建国, 等. 环境监测领域中光谱学技术进展[J]. *光学学报*, 2020, 40(5): 0500001.
- [12] Liu L X, He D, Li M Z, et al. Identification of Xinjiang jujube varieties based on hyperspectral technique and machine learning[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(11): 1111002.
- 刘立新, 何迪, 李梦珠, 等. 基于高光谱技术与机器学习的新疆红枣品种鉴别[J]. *中国激光*, 2020, 47(11): 1111002.
- [13] Ni C, Li Z Y, Zhang X, et al. Filmsorting algorithm in seed cotton based on near-infrared hyperspectral image and deep learning [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(12): 170-179.
- 倪超, 李振业, 张雄, 等. 基于短波近红外高光谱和深度学习的籽棉地膜分选算法[J]. *农业机械学报*, 2019, 50(12): 170-179.
- [14] Tan A L, Wang X S, Chu Z Y, et al. Research on quantitative modeling method of maize composition based on near infrared spectrum fusion and deep learning[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2020, 46(23): 213-219.
- 谈爱玲, 王晓斯, 楚振原, 等. 基于近红外光谱融合与深度学习的玉米成分定量建模方法[J]. *食品与发酵工业*, 2020, 46(23): 213-219.
- [15] Pasquini C. Near infrared spectroscopy: a mature analytical technique with new perspectives: a review [J]. *Analytica Chimica Acta*, 2018, 1026(5): 8-36.
- [16] O'Brien N A, Hulse C A, Friedrich D M, et al. Miniature near-infrared (NIR) spectrometer engine for handheld applications[J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8374: 837404.
- [17] Pérez-Marín D, Paz P, Guerrero J E, et al. Miniature handheld NIR sensor for the on-site non-destructive assessment of post-harvest quality and refrigerated storage behavior in plums[J]. *Journal of Food Engineering*, 2010, 99(3): 294-302.
- [18] Schmidt O, Kiesel P, Bassler M. Performance of

- chip-size wavelength detectors [J]. *Optics Express*, 2007, 15(15): 9701-9706.
- [19] Saxe S, Sun L, Smith V, et al. Advances in miniaturized spectral sensors [J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 10657: 106570B.
- [20] Yu X Y. Development and application of a handheld near-infrared spectrometer based on a linear variable filter for measuring the internal quality of fruit [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2016: 2-38.
于新洋. 线性渐变滤光片型近红外水果品质分析仪及应用研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2016: 2-38.
- [21] Abel-Tibérini L, Lemarquis F, Lequime M. Masking mechanisms applied to thin-film coatings for the manufacturing of linear variable filters for two-dimensional array detectors [J]. *Applied Optics*, 2008, 47(30): 5706-5714.
- [22] Zhang S D, Bin W, Xu B B, et al. Mixed-gas CH₄/CO₂/CO detection based on linear variable optical filter and thermopile detector array [J]. *Nanoscale Research Letters*, 2019, 14(1): 348.
- [23] Schmidt O, Kiesel P, Mohta S, et al. Resolving pm wavelength shifts in optical sensing [J]. *Applied Physics B*, 2007, 86(4): 593-600.
- [24] Li X, Shao X M, Li T, et al. Developments of short-wave infrared InGaAs focal plane detectors [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(1): 0103006.
李雪, 邵秀梅, 李淘, 等. 短波红外 InGaAs 焦平面探测器研究进展 [J]. *红外与激光工程*, 2020, 49(1): 0103006.
- [25] Li X, Gong H M, Fang J X, et al. The development of InGaAs short wavelength infrared focal plane arrays with high performance [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2017, 80: 112-119.
- [26] Shao X M, Gong H M, Li X, et al. Developments of high performance short-wave infrared InGaAs focal plane detectors [J]. *Infrared Technology*, 2016, 38(8): 629-635.
邵秀梅, 龚海梅, 李雪, 等. 高性能短波红外 InGaAs 焦平面探测器研究进展 [J]. *红外技术*, 2016, 38(8): 629-635.
- [27] Wang X Q. The design and experiments of network node based on a new monolithically integrated multichannel spectral sensor [D]. Jinan: Shandong University, 2016: 2-38.
王绪泉. 新型光谱组件的网络节点设计及实验 [D]. 济南: 山东大学, 2016: 2-38.
- [28] Wang X Q, Huang S L, Yu Y H, et al. A compact long-wavelength near-infrared IoT node and its performance experiments [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2018, 37(1): 42-46.
王绪泉, 黄松垒, 于月华, 等. 微型长波近红外物联网节点及实验研究 [J]. *红外与毫米波学报*, 2018, 37(1): 42-46.
- [29] Wang G S. Design and experiment of a new spectral-sensing IoT node system [D]. Jinan: Shandong University, 2018: 20-58.
王果山. 新型光谱感知物联网节点系统设计及实验 [D]. 济南: 山东大学, 2018: 20-58.
- [30] Ke P Y, Liu M X, Wang X Q, et al. Development of 512×2-element InGaAs spectral sensor IOT node [J/OL]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*. [2021-01-10]. http://journal.sitp.ac.cn/hwyhmb/hwyhmbcn/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=202010270000005.
柯鹏瑜, 刘梦璇, 王绪泉, 等. 512×2元 InGaAs 光谱传感物联网节点研制 [J/OL]. *红外与毫米波学报*. [2021-01-10]. http://journal.sitp.ac.cn/hwyhmb/hwyhmbcn/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=202010270000005.
- [31] Wang K. Design and implementation of real-time monitoring system based on spectral data [D]. Jinan: Shandong University, 2016: 10-58.
王凯. 基于光谱数据的多参数实时监测系统设计与实现 [D]. 济南: 山东大学, 2016: 10-58.
- [32] Wei Y C, Wang X Q, Wei Y, et al. Design of mobile terminal in spectral sensing Internet of Things based on android platform [J]. *Computer Measurement & Control*, 2019, 27(3): 131-136.
魏永畅, 王绪泉, 魏杨, 等. 基于 Android 系统的光谱传感物联网移动终端设计 [J]. *计算机测量与控制*, 2019, 27(3): 131-136.
- [33] Wei Y C. Design and experiment of dedicated mobile terminal in spectral sensing Internet of Things [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2019: 21-58.
魏永畅. 光谱传感物联网专用移动终端设计与实验 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2019: 21-58.
- [34] Zhao Y Q, Liu X Y, Tang C L. Progress in spectral filter arrays [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(19): 190004.
赵永强, 刘芯羽, 汤超龙. 光谱滤光片阵列进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(19): 190004.
- [35] Zhang Y G, Zhuang X G, Wang X Q, et al. Wavelength calibration of a new monolithically integrated spectral sensor [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2017, 36(1): 15-19.
- [36] Zhuang X G. Applied study of near-infrared spectroscopy and incidence optical system design of new spectral sensing node [D]. Jinan: Shandong University, 2017: 15-108.

- 庄新港. 近红外光谱分析应用研究及新型光谱感知节点入射光学系统设计[D]. 济南: 山东大学, 2017: 15-108.
- [37] Wang S F, Yuan Y, Su L J, et al. Measurement of the spectral characteristic parameters of linear variable filters [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, 46(11): 1112002.
王世丰, 袁艳, 苏丽娟, 等. 线性渐变滤光片光谱特征参数测试方法 [J]. *光子学报*, 2017, 46(11): 1112002.
- [38] Sheng B, Chen P, Tao C X, et al. Linear variable filters fabricated by ion beam etching with triangle-shaped mask and normal film coating technique [J]. *Chinese Optics Letters*, 2015, 13(12): 122301.
- [39] Wang X Q, Huang S L, Yu Y H, et al. Integrated linear variable filter/InGaAs focal plane array spectral micro-module and its wavelength calibration [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, 47(5): 0530001.
王绪泉, 黄松奎, 于月华, 等. 集成线性渐变滤光片和 InGaAs 焦平面的微型光谱模组及其波长定标 [J]. *光子学报*, 2018, 47(5): 0530001.
- [40] Wang X Q, Huang S L, Ke P Y, et al. Improvement of LVF-based NIR spectral sensor on both spatial and time domains [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2021, 50(4): 0430001.
王绪泉, 黄松奎, 柯鹏瑜, 等. 集成滤光片型近红外光谱组件的时空域性能改善研究 [J]. *光子学报*, 2021, 50(4): 0430001.
- [41] Zhuang X G, Wang L L, Shao X M, et al. Design of fiber-optic collector for spectrometer based on curved mirror [J]. *Journal of Measurement Science and Instrumentation*, 2017, 8(1): 97-102.
- [42] Zhuang X G, Shi X S, Wang H F, et al. Spectral resolution of the angle-tuned short wave infrared multichannel integrated spectrum assembly [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2018, 37(3): 332-337.
庄新港, 史学舜, 王恒飞, 等. 角度调谐短波红外光谱组件光谱分辨率特性研究 [J]. *红外与毫米波学报*, 2018, 37(3): 332-337.
- [43] Jiao D X. Determination of soil organic matter and total nitrogen by modeling with different spectral pretreatment methods [D]. Jinan: Shandong University, 2019: 15-55.
焦德晓. 应用不同预处理方法建模测定土壤有机质和总氮含量 [D]. 济南: 山东大学, 2019: 15-55.
- [44] Zhuang X G, Wang L L, Shi X S, et al. Rapid determination of production date for green tea by near-infrared spectroscopy [J]. *Journal of Measurement Science and Instrumentation*, 2018, 9(2): 199-204.
- [45] Zhuang X G, Wang L L, Wu X Y, et al. Origin identification of Shandong green tea by moving window back propagation artificial neural network based on near infrared spectroscopy [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2016, 35(2): 200-205.
庄新港, 王丽丽, 吴雪原, 等. 基于近红外的移动窗口 BP 神经网络实现山东绿茶产地溯源 [J]. *红外与毫米波学报*, 2016, 35(2): 200-205.
- [46] Wei Y, Wang X Q, Wei Y C, et al. Application research of sensor output digitization for compact near infrared IoT node [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(9): 0904002.
魏杨, 王绪泉, 魏永畅, 等. 微型近红外物联网节点的传感器输出数字化应用研究 [J]. *红外与激光工程*, 2019, 48(9): 0904002.
- [47] Wei Y, Wang X Q, Huang Z C, et al. Digital output for short-wave infrared InGaAs linear FPA [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2018, 37(3): 257-261.
魏杨, 王绪泉, 黄张成, 等. 短波红外 InGaAs 线性焦平面数字化输出研究 [J]. *红外与毫米波学报*, 2018, 37(3): 257-261.
- [48] Wei Y. Study on compact short-wave infrared InGaAs spectral sensor with digital output [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2019: 21-108.
魏杨. 数字输出的微型短波红外铟镓砷光谱组件研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2019: 21-108.

Research and Application Progresses of Near-Infrared Spectral Sensing Internet of Things

Wang Xuquan^{1,3}, Wang Lili^{2*}, Fang Jiaxiong^{1,2**}

¹ State Key Laboratories of Transducer Technology, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

² Advanced Research Center for Optics, Shandong University, Qingdao, Shandong 266237, China;

³ University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract

Significance A variety of sensing applications in the Internet of Things (IoT) raise the diverse needs for sensors. The sensing ability of material composition is a weak part of the sensing layer of the IoT. Due to the technical limitations, traditional analysis methods, such as mass spectrometry and chromatography, cannot be directly applied in the field of the IoT. With the advantages of speediness, lossless and high-efficiency, the technology of near-infrared (NIR) spectroscopy can be applied to the applications of composition analysis. In recent years, the trend of commercialization of spectral analysis has promoted the development of miniaturization, networking and imaging of analytical equipment. The devices based on filters and array detectors are compact without moving parts, which makes them ideal for IoT applications. The miniaturized instruments have been successfully applied in many industrial and agricultural production fields such as petrochemical industry, grain screening, and pharmaceutical industry. With the successful application of machine learning and deep learning, NIR spectral analysis has an intelligent trend of component sensing.

InGaAs focal plane arrays (FPAs) have the advantages of working near room temperature, high detection rate, good uniformity and stability, which are beneficial to realize the miniaturization design of the NIR photoelectric system. As the core photoelectric sensor, InGaAs FPAs are widely used in NIR spectral analysis equipments. This paper introduces the key technologies of the NIR spectral sensing IoT with several kinds of compact InGaAs spectral sensors.

Progress NIR spectral sensing IoT (Fig. 1) integrates spectral analysis techniques by using customized micro spectral sensing nodes. In recent years, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences and Shandong University have made good progresses in the research and application of the NIR spectral sensing IoT based on InGaAs FPAs. Spectral sensing nodes can be regarded as customized NIR spectrometers improved by miniaturization, networking and portable design. The wireless communication modules are added on the basis of spectral components, PFA, signal acquisition circuits and optical test accessories, which can meet the application requirements of the IoT. In order to realize the miniaturization design of spectral sensing nodes, two kinds of micro spectral sensors are introduced, which are integrated multi-channel filter and integrated linear variable filter (LVF). The performance of spectral sensors is compared and analyzed with the preparation process. The research and application of NIR sensing nodes, cloud server and mobile phone client are further introduced. Finally, the future development of NIR sensing IoT is proposed.

Based on a 256×1 FPA, the 64-channel filter integrated spectral sensor (Fig. 2) was developed. Considering the impact of filter's alignment offset with photosensitive elements on the performance of the spectral sensor, four adjacent photosensitive elements were combined as a spectral channel. LVF is a kind of wedge-shaped dielectric thin-film Fabry-Perot narrow-band pass filter. The spacer layer of narrow-band filter was made into wedge-shaped by special coating process. The spacer layer at different positions corresponds to different equivalent optical thickness, thus corresponding to the central wavelength of linearly varying transmittance. The LVF with 900–1700 nm was used to develop a LVF type spectral sensor (Fig. 3, Fig. 4), which was coupled with 256×1 and 512×2 FPA respectively. The 256×1 spectral sensor used a single large photosensitive element as a spectral channel. The 512×2 spectral sensor used a combination of multiple small photosensitive elements as a spectral channel, which could reduce the adverse effects of blind elements and nonuniformity of the FPA on the spectral signal. The test results show that the multi-channel filter has higher resolution compared with the LVF (Fig. 5). However, benefitting from the continuous gradient structure, the LVF is less affected by the edge mutation effect and alignment problem between filter and channels. Therefore, the uniformity and consistency between the spectral channels of LVF spectral sensor are better than these of the multi-channel filter (Fig. 6).

For the spectral sensors with different structures, the corresponding spectral sensing nodes were further developed. The optical structure and wireless communication interface had been integrated in the spectral sensing node (Fig. 7). In the network structure, the cloud server platform, the analysis software and the green tea origin identification spectral analysis model were studied (Fig. 8). In the research and development of the next generation spectral sensor, the digitization in the sensor was realized by integrating successive-approximation register structure analog-to-digital converter in the readout circuit.

Conclusion and Prospect This paper introduces the system architecture and key technologies of the NIR spectral sensing IoT. In order to realize the miniaturization design of spectral sensing nodes, two kinds of micro spectral sensors are introduced, which are integrated multi-channel filter and integrated LVF. The performance of spectral sensors is compared and analyzed with the preparation process. The research and application of NIR sensing nodes, cloud server and mobile phone client are further introduced. Finally, the future development of NIR sensing IoT is proposed. In the long term, the future development direction of spectral sensing IoT is intellectualization. The integration of system on chip (SoC), wireless communication module and intelligent analysis algorithm will be further realized in the intelligent spectral sensors.

Key words infrared spectroscopy; focal plane detector; InGaAs; linear variable filter; Interent of Things

OCIS codes 300.6340; 040.3060; 230.0040