

文章编号: 1672-8785(2020)09-31-06

数字化红外焦平面探测器 光谱响应测试系统研究

陈彦冠 王 亮 李进武 王成刚 于 艳

(华北光电技术研究所, 北京 100015)

摘 要: 由于目前没有可测试数字化红外探测器光谱响应的设备, 研制了一种可将数字化红外探测器的输出转换为与模拟探测器一样形式的电路板装置, 并利用原有的傅里叶光谱仪解决了无法测试数字化红外探测器光谱的问题。该方法成本低、易实现, 不仅操作简单, 而且测试性能稳定, 因此适用于各种形式的数字化探测器。首先介绍了红外光谱响应测试系统, 然后对研制的模数电路板装置的原理进行了分析, 并对此电路板进行了硬件实现, 接着编写了内部测试程序, 最后完成了功能验证。结果表明, 配有新研制模数电路板装置的红外光谱测试系统可以测试不同位宽输出的数字化面阵探测器或线列探测器的光谱数据, 而且测试结果准确可靠。

关键词: 光谱响应测试; 数字化红外探测器; 傅里叶光谱仪; 兼容性

中图分类号: TN918 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2020.09.005

Research on Spectral Response Test System of Digitalization Infrared Focal Plane Detector

CHEN Yan-guan, WANG Liang, LI Jin-wu, WANG Cheng-gang, YU Yan

(North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China)

Abstract: There is currently no equipment that can test the spectral response of digital infrared detectors. Therefore, a circuit board device is developed to convert the output of the digital infrared detector into the same output form as the analog detector. The original Fourier spectrometer is used to solve the problem that the digital infrared detector spectrum can not be tested. This method is low in cost, easy to implement, simple in operation, and stable in test performance, and is suitable for various forms of digital detectors. First, the infrared spectrum response test system is introduced, and then the principle analysis of the developed analog-to-digital circuit board is carried out. Finally, this circuit board is implemented in hardware, and the internal test program is written to complete the functional verification. The result shows that the infrared spectrum test system with the newly developed analog-digital circuit board device can test the spectrum of digital area array detectors or linear detectors with different bit width outputs, and the test results are accurate and reliable.

收稿日期: 2020-07-08

作者简介: 陈彦冠(1990-), 男, 山西吕梁人, 工程师, 硕士, 主要从事红外探测器测试技术及系统研究。
E-mail: 286852460@163.com

Key words: spectral response test; digital infrared detector; Fourier spectrometer; compatibility

0 引言

光谱响应测试是红外焦平面探测器测试环节中的重要组成部分。只有对光谱响应进行了准确测试,才能绘制出相对光谱响应曲线,获得相应的前后截止波长和峰值波长,进而得到光谱因子。测试结果的有无以及准确性在很大程度上决定了红外焦平面测试指标的完整性和准确性。在传统的红外焦平面探测器测试中,由于其输出为模拟电压,相对光谱响应曲线测试设备比较成熟。但是对于数字化红外焦平面探测器来说,由于其读出电路的内部结构不同,像素级数字化探测器有单路输出和并行几路输出;列级数字化探测器则是低压差分(Low-Voltage Differential Signaling, LVDS)输出。这样的输出差异导致市面上没有通用型数字化红外焦平面探测器光谱响应测试设备。而光谱响应又是探测器的重要测试指标,且对探测器工艺改进和用户使用有很大的指导意义。因此,本文通过电路板将数字化输出转换成传统的输出形式,然后利用现有的传统红外光谱测试设备对数字化红外焦平面探测器光谱进行测试^[1-5]。

1 红外光谱测试系统

红外焦平面光谱响应测试系统有两种。第一种是单色仪法:在红外焦平面探测器窗口与黑体辐射面之间加装单色仪,使探测器窗口通过反射镜接收单色仪分出的红外光(窗口与反射镜之间的距离为二十多厘米);然后选取一个有效通道进行测试。第二种是傅里叶光谱仪法:红外焦平面探测器窗口对准傅里叶光谱测试仪的出光口,两者之间的距离在 2~10 cm 之间;选取一个有效通道进行测试,对该通道采集的信号进行傅里叶变换,输出光谱曲线。

图 1 为红外光谱响应测试系统的原理图。该系统由傅里叶光谱仪、光谱仪控制模块、被

测探测器、探测器驱动电路、信号采集与处理模块以及计算机等组成。其中,光谱仪控制模块和信号采集处理模块从属于傅里叶光谱仪,构成完成的红外光谱响应测试设备^[6]。

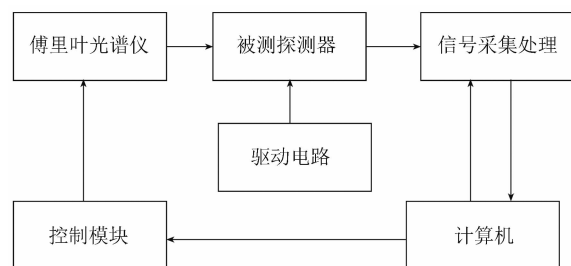


图 1 红外光谱响应测试的原理图

在使用红外光谱测试系统时,只需按图 2 所示的连接方式,对模拟型红外探测器的模拟电平进行阻抗变换,就可以接入信号采集板卡,同时提供与探测器输出同步的时钟 MC 和帧行使能信号。在用傅里叶光谱仪进行扫描时,即可对探测器进行同步采集。但该设备只能采集模拟输出型红外探测器信号,而无法采集数字化输出信号,导致研发的很多款数字化红外探测器的红外光谱不具备测试条件。为了能够在现有设备的基础上测得数字化探测器的光谱响应,本文研制了一块用于将数字化输出转换成模拟输出的数模转换电路。

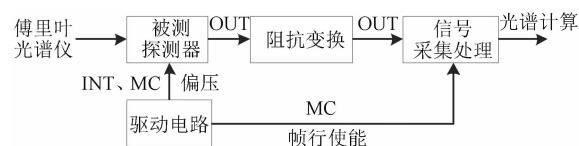


图 2 模拟型红外探测器光谱测试的连接图

2 模数转换电路的组成及原理

2.1 数模转换电路的组成

如图 3 所示,通用型数字化红外探测器数模转换电路主要包括电源防接反与滤波电路、CameraLink 图像解码电路、现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)主芯片电路、RS422 串口电路、磁隔离电路、

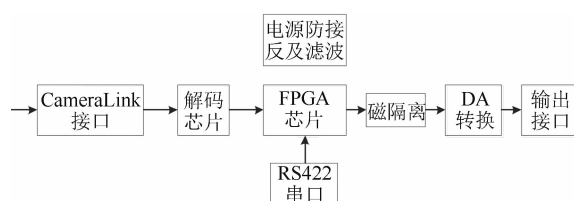


图 3 数模转换电路的结构图

DA 转换电路和输出接口电路。

数字化红外探测器数模转换电路利用输入接口将由被测探测器数据转换后的串行 CameraLink 数据连接至解码电路。解码电路自动将串行 LVDS 数据解码成并行 28 bit 的数据信息(其中包含帧、行和数据有效信号), 另外也会输出数据同步时钟信号。结合被测探测器的面阵规格或线列规格, 在 FPGA 中对并行 28 bit 的数据信息进行拆解和选取。由于傅里叶光谱仪最少可对单元进行光谱测试, 线列像元全部选取进行下一步转换, 面阵像元选取中间一行进行下一步转换。由于 DA 电路选取的芯片只能进行 14 位数模转换, 为了提高信噪比, 选取有效数据的高 14 位进行转换, 同时将其降频至 DA 可转换时钟范围, 并将时钟信号、帧起始和行起始信号也输出至输出 BNC 接口。上述这些信号在传输过程中会通过磁隔离电路进行干扰抑制。14 位数据信号经过 DA 芯片后, 再通过一级运放调节输出范围和增强驱动能力, 最后到输出电路进行输出。

2.2 数模转换电路的原理

图 4 为通用型数字化红外探测器数模转换

电路的原理图。因为数字化电路的输出形式多、规格多, 所以中间选用 FPGA 芯片来实现程序的多次编写。由于傅里叶光谱仪的采集速度不大于 10 MHz, 在转换过程中无法降低信噪比, 因此选用 AD9744 芯片来完成数模转换过程。

图 4 中, 低噪声电源电路由熔断丝与二极管组成, 主要通过熔断丝对输入电压进行限流保护, 并为可能出现的由操作失误导致的电源正负反接情况提供电路保护。CameraLink 图像解码电路采用标准 CameraLink 协议解码芯片, 将通过输入接口输入的 CameraLink 串行 LVDS 数据解码为标准的并行数据和时钟信号。输出端全部与 FPGA 芯片连接, 可支持 RGB 模式(针对 16 bit 以上的输出)或者 base 模式(16 bit 及以下)。

作为数模转换电路的核心部分, FPGA 主芯片电路包含 FPGA 电源提供电路、FPGA 配置电路、FPGA 程序下载接口和 RS422 通信接口电路, 具有可重复编程和外部通信控制功能。本装置通过 FPGA 程序下载接口, 针对不同的数字化探测器, 适配不同的程序, 从而实现状态的切换。在帧频较低的情况下, 可以全帧输出; 在帧频过高的情况下, 可以采取隔列输出或者某行输出(类似于传统模拟探测器的多路输出模式, 取其中一路)。此外, 在输出数据的同时, 将同步时钟信号和帧起始信号随其一起输出。经 DA 转换后, 它们实现了与模拟型红外探测器同样的输出形式。

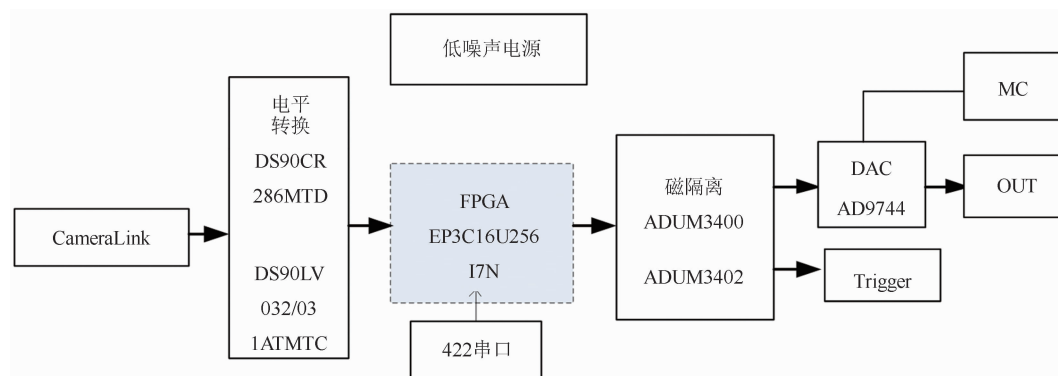


图 4 数模转换电路的原理图

DA 转换电路经 DA 芯片将 FPGA 主芯片电路提供的并行数字信号转换为模拟电平,并在 DA 芯片前设计了磁隔离芯片,以消除环境噪声和抑制干扰。在 DA 芯片后设计了运放芯片,用于抑制模拟电平的无效干扰,提高信噪比。

接口电路包含输入接口和输出接口。其中,输入接口是一个标准的 CameraLink 接插件,可将数字化探测器输出数据转换成 CameraLink 数据进行输入。输出接口由 4 个标准 BNC 接插件组成,分别输出数据同步时钟信号、模拟信号、帧起始使能信号和行起始使能信号。它通过同轴电缆与傅里叶光谱仪的采集卡连接。

3 硬件实现和功能验证

3.1 系统描述

与传统的模拟型红外探测器光谱测试系统类似,本测试系统仅在傅里叶光谱仪测试框架中加了新研制的数模转换电路(系统框架见图 5)。被测数字化探测器需要驱动电路来提供偏压和时序。然后对其输出形式进行统一格式转换,即统一为 CameraLink 图像协议数据;再通过数模电路板将其后端连接至傅里叶光谱仪的信号采集处理卡。

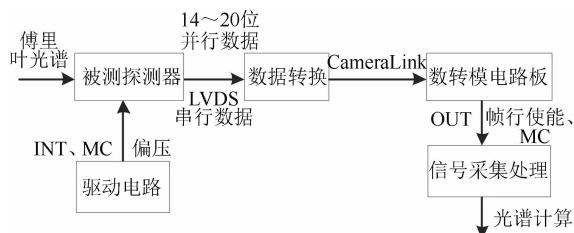


图 5 数字化红外探测器光谱测试的连接图

本文系统中的测试方法与模拟型红外探测器测试方法一致,如图 6 所示。不论是利用液氮制冷的中测杜瓦还是配有制冷机的微杜瓦,仅需将数字化探测器的杜瓦窗口对准傅里叶光谱仪的出光口。在傅里叶光谱仪 OPUS 操作软件中调入测量参数,将设备名称、探测器规格、输出主频、时间片数目和时间基准接口等基础信息提供给测试软件。在高级设置中,可

以给测试结果定义名称和存储路径,并设置好步进分辨率、待测波段的前后截止波长和要保存的数据块信息;将线列探测器存为单通道光谱,将面阵探测器存为样品干涉图;最后在光学设置中对光源和光阑进行设置,以防探测器对光不响应或发生饱和现象;以上参数设置完成后就可以开始进行步进扫描时间分辨测量。接着在测试结果中选出合适的像元数据并对其进行快速傅里叶变换和波数转换,得到被测探测器的光谱曲线。将标准探测器测得的标准光谱曲线从此数据中去除,并进行归一化处理,最终得到相同能量下数字化探测器的相对光谱响应曲线^[7-8]。

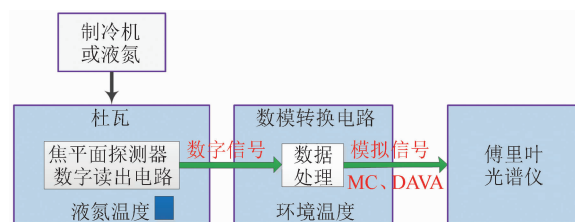


图 6 数字化探测器的光谱测试图

3.2 探测器光谱测试

为了验证本文系统的有效性,选取不同波段、不同规格、不同输出位宽和不同制冷方式的几种典型数字化探测器,对它们的相对光谱响应进行测试,然后将其与这几种探测器的材料波长进行对比,判断测试结果是否与研发材料的光谱后截止波长匹配,并以此判断本文系统的结果是否准确可靠。

3.2.1 标准探测器的光谱测试

为获得准确的相对光谱响应曲线,必须先得到各波长单色光能量分布曲线。因此使用一个标准单元热释电探测器测出辐射源的光谱曲线。这条曲线用于表征辐射源的辐射随波长的分布情况。图 7 所示为不同波长下的标准光谱曲线。

3.2.2 数字化红外焦平面探测器的光谱测试

在与上述相同的辐射源条件下,将几个不同的待测探测器分别对准傅里叶光谱仪的出光口(距离 2~10 cm)。在探测器制冷机的工作温

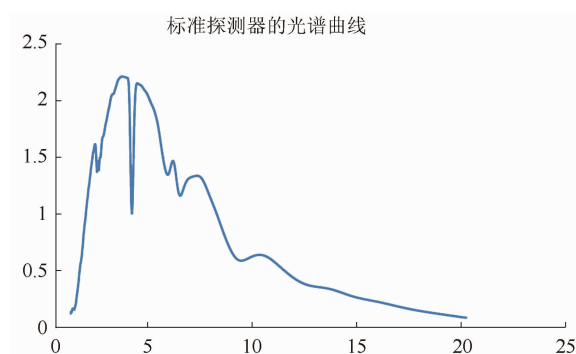


图 7 辐射源的标准光谱曲线

度正常后加电工作, 并调至合适的积分时间。在模数转换电路板的 FPGA 芯片程序中, 对于线列探测器, 选择全部像元进行转换; 对于面阵探测器, 选择中心行像元进行转换; 然后传输给傅里叶光谱仪, 在时域内对光谱信号进行连续变换, 并计算光谱特征谱带; 利用快速傅里叶变换将光谱特征谱带由时域转换为频域, 将噪声与目标信号分离, 滤除高频白噪声; 再通过傅里叶反变换将滤波后的频谱信息转换为滤波后的时域光谱信息; 最后, 在时域内根据光谱的连续性恢复光谱信号, 得到滤波后的光谱。通过将它除以标准光谱曲线并对其进行归一化处理, 可得到红外探测器的相对光谱响应曲线。几种典型的数字化探测器光谱曲线如图 8 所示。

为了验证上述三个探测器相对光谱测试的准确性, 将其与外延材料测试的光谱后截止数据进行对比。将同一个材料片上的器件与模拟读出电路进行互联, 并对其光谱曲线进行对比。表 1 列出了这些数据的比对分析结果。可以看出, 这三款探测器的后截止波长都与材料本身的后截止数据以及同模拟读出电路互联的光谱测试结果相对应, 从而验证了数字化光谱测试系统测试结果的准确性和可靠性。

表 1 三款探测器的光谱数据对比

后截止波长	探测器名称		
	320×256	384×288	512×8
数字化	7.442 μm	9.600 μm	10.059 μm
材料	7.317 μm	9.612 μm	10.061 μm
模拟	7.431 μm	9.598 μm	10.055 μm

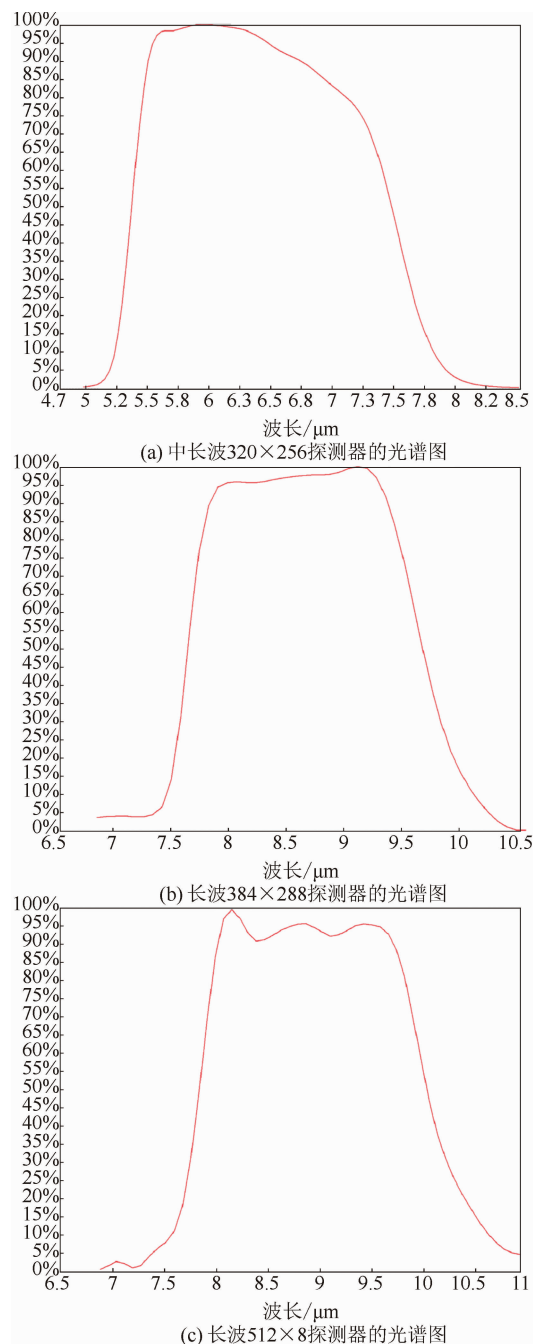


图 8 三种典型的数字化光谱曲线

4 结束语

本文介绍了红外光谱测试系统, 分析了新

研制的数模转换电路的组成和原理。然后对此电路进行了硬件实现,并将其加入到传统的傅里叶光谱仪系统中,完成了数字化探测器光谱测试功能的验证。最后对其测试结果的准确性进行了对比分析。结果表明,基于数模转换电路的数字化红外光谱响应测试系统不仅可以实现不同位宽输出的数字化面阵探测器或线列探测器的光谱测试,而且还可得到准确可靠的光谱测试结果。由于数字化红外电路的输出形式越来越多,还需对此系统进行升级,以提高它的兼容性。

参考文献

- [1] 姬玉龙,毛京湘,李雯霞,等. 数字化红外焦平面探测器光谱响应测试系统研究 [J]. **红外技术**, 2017, **39**(10): 897-902.
- [2] 姚立斌,陈楠,张济清,等. 数字化红外焦平面技术 [J]. **红外技术**, 2016, **38**(5): 357-366.
- [3] 刘传明,姚立斌. 红外焦平面探测器数字读出电路研究 [J]. **红外技术**, 2012, **34**(3): 125-133.
- [4] 于艳,李敬国,刘泽巍. 红外焦平面像素级数字化技术最新进展 [J]. **激光与红外**, 2018, **48**(8): 951-957.
- [5] 白丕绩,赵俊,韩福忠,等. 数字化中波红外焦平面探测器组件研究进展 [J]. **红外与激光工程**, 2017, **46**(1): 23-30.
- [6] 刘兰娇. 红外辐射源能量光谱分布测试研究 [J]. **科技资讯**, 2014, **12**(33): 42.
- [7] 李鸥,杨德振. 数字化红外焦平面噪声分析研究 [J]. **激光与红外**, 2017, **47**(10): 1281-1285.
- [8] 刘庆杰,蔺启忠,王钦军,等. 基于连续统快速傅里叶变换的红外光谱处理技术 [J]. **光谱学与光谱分析**, 2009, **29**(12): 3279-3282.