Vol.46 No.4 April, 2020



doi: 10.11857/j.issn.1674-5124.2018110018

微型光纤光谱仪的光谱线性响应测试研究

崔继承¹, 朱继伟^{1,2}, 杨晋³, 马婷婷^{1,2}, 崔 弘^{1,2}, 郭雪强^{1,2} (1. 吉林省光栅应用中试中心, 吉林长春 130102; 2. 长春长光格瑞光电技术有限公司, 吉林长春 130102; 3. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林长春 130033)

摘 要: 该文主要针对所开发的微型光纤光谱仪系列产品的光谱线性响应测试问题,提出一种简单易行的方法。根据图像传感器在采集过程中,将实际探测到光谱图像亮度转换为数字图像灰度并以 DN 值形式记录的原理,采用积分时间等间隔步进的方法依次测试相应光谱数据,通过对采集所得原始 DN 值数据进行近似归一化及拟合处理的方式来表征 DN 值随积分时间变化的线性关系,并以此评判光谱仪系统的光谱响应线性特性。依照此方案进行实际测试,通过对测得数据的分析处理,验证该方案具有可行性,且结果显示该款产品的光谱线性响应良好。 关键词:光谱;光谱仪;线阵 CCD;切尼尔-特纳结构 中图分类号: TN29 文献标志码: A 文章编号: 1674–5124(2020)04–0130–06

Study on spectral linearization response test of miniature fiber optic spectrometer

 CUI Jicheng¹, ZHU Jiwei^{1,2}, YANG Jin³, MA Tingting^{1,2}, CUI Hong^{1,2}, GUO Xueqiang^{1,2}
(1. Jilin Grating Application Pilot Center, Changchun 130102, China; 2. Changchun SPKTRM Optronics Co., Ltd., Changchun 130102, China; 3. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: In this paper, a simple and feasible method to test the spectral linear response of the miniature fiber optic spectrometer is presented. According to the actual acquisition process of image sensor, that the detected spectral image brightness is converted into digital image grayscale and recorded in the form of DN value. The method of integral time stepping is adopted and corresponding spectral data are tested successively. The linear relation of DN value with integration time is characterized by approximate normalization and fitting processing of the original DN value data collected, and the linear characteristic of spectral response of spectrometer system is evaluated by this method. Through the analysis and processing of the measured data the feasibility of the solution is verified. and the results show that the spectral linear response of this product is good. **Keywords**: spectral; spectrometer; linear CCD; Czerny-Turner structure

收稿日期: 2018-11-06; 收到修改稿日期: 2019-03-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61805240);吉林省科技发展计划项目(20180201122GX, 20180201123GX, 20180201049SF);长春市科技计划项目(18DY003)

作者简介: 崔继承(1976-), 男, 吉林长春市人, 研究员, 博士, 主要从事光学设计、光谱仪设计及各种光电系统设计工作。 通信作者: 朱继伟(1980-), 男, 吉林省吉林市人, 副研究员, 博士, 主要从事光栅刻划机、光谱仪器等相关设计工作。

131

0 引 言

光谱仪作为科研、生产工作中常用的检测、分 析仪器,广泛应用于医学、环保、天文、地质、生化、 农业、工业等各个领域[1-2]。自 20 世纪 90 年代起, 现代检测、分析仪器均逐步朝着智能、微小化发展, 以满足在线测试、监控的普遍需求^[3]。随着现代科 学技术的纵深发展,各行业对科研、生产装备水平 的要求也有了提升,尤其是航天遥感、地质勘探、环 境监测等众多应用领域,对光谱检测仪器的轻小便 携、可灵活集成及原位实时获取信息等特性具有很 高要求。而微型光纤光谱仪实现以光纤为媒介的光 载信号传输测试,信号采集方式灵活且效率高。作 为一类结构简单轻小、性能良好稳定、探测灵敏快 捷、成本功耗低的光谱仪,能够突破应用环境局限、 分析周期长及样品携带等限制,并且可集成应用、 二次开发,应用领域及适用范围十分广泛,一直是 国内外研制微型光机电系统的热点[4-5]。

微型光纤光谱仪的线性响应特性是光谱仪器稳 定性的直观表现,同时也是实现物质精准测试分析 的重要保证。本文针对所开发并投入生产的系列微 型光纤光谱仪的光谱响应线性问题设计测试方案、 搭建实验平台,进行了实验测试,并对测得数据进 行处理分析。

1 基本原理及结构

1.1 基本工作原理

微型光纤光谱仪作为光、机、电集成系统,主要 由光学分光成像系统、机械支撑调整系统、CCD 探 测器及主控电学系统构成,其主要工作原理如图1 所示。



图 1 微型光纤光谱仪结构图

此款光谱仪基于通用平台设计结构,以相同的 机械结构,通过完成光学附件的更改及微量调谐实 现由紫外到可见波段的不同参数配置。主要通过调 整螺丝、锁紧螺丝与转轴间的配合,为准直镜、光栅 以及聚焦镜的水平和俯仰方向预留微量偏心、倾斜 调整量及光栅的转动量;通过探测器支座上的长圆 孔,可改变成像镜与线阵 CCD 间的相对出射距 离。可变参量的预留,不仅能在装调过程大大增益 系统的成像质量和光谱强度,且增加了仪器结构的 灵活性及通用性。

微型光纤光谱仪采用了可调谐机械结构实现各 组件的固定、支撑及传动。信号光束通过分光光 路,实现光束色散的同时产生按波长分布的表征检 测样本成分信息的光谱条带状图像。通过线阵 CCD 探测器对光谱图像进行实时采集、记录及光电 信号转换。通过以 PCB 板为基载的电学系统实现 A/D 信号的转换,应用 USB 接口供电及传输数据, 将信息传送至上位机端,最终配合软件完成对系统 的主控及光谱信息的分析处理^[6-7]。

1.2 核心光路结构

光路结构是影响微型光谱仪工作范围及分辨率 等指标的关键,采用了非对称垂直交叉的切尼尔-特 纳(Czerny-Turner, C-T)结构,主要由入射狭缝、准 直镜、光栅、聚焦镜、柱面镜(部分型号采用)组成, 光纤接入端由光纤头本体、入射光阑、入射针孔组 成。在光路结构的出射端,部分型号以一块柱透镜 校正光学系统的像差,优化成像质量,同时配合弧 形光阑、倾斜叶片组的添加,使杂散光相对强度降 低了 1~3 个数量级,高质量的光路设计,保证了仪 器优越的光谱分辨及检出能力。

核心分光光路如图 2 所示,由光纤耦合入待测 信号光束,经光阑入射到仪器内部,采用球面反射 镜作准直镜,将经反射形成的平行光束定向准直地 投射到色散元件表面。采用平面光栅作色散元件实 现衍射分光,并形成色散光束。采用球面反射镜作 聚焦镜,将色散光束按波长分别成像于线阵 CCD 探测器的接收靶面上,最终完成光谱信号的采集、 生成、接收。此结构具有良好的集成性且光路紧凑 易于实现微型化^[8-9]。

微型光纤光谱仪的线性度作为重要的性能指标,主要受 CCD 的非线性特性影响。因此,根据 CCD 图像传感器在采集成像过程中,将实际探测到 光谱图像亮度转换为数字图像灰度,并以 DN 值的 形式记录的工作原理。通过检测 DN(digital number) 值随积分时间变化的线性关系来表征 CCD 对光信 号的响应特性,并以此评判微型光纤光谱仪对光谱 响应的线性特性^[10]。本文设计了该类仪器线性响



图 2 微型光纤光谱仪光路图

应特性快速评定及数据分析处理的方法,并通过对 实测结果的处理验证方案的可行性。

- 2 测试方案与步骤
- 2.1 测试方案

线性响应评测方案设计如图 3 所示,根据所测 仪器的波段范围,采用卓立汉光 Zolix 公司型号为 LSDS-D30 的氘灯系统作为测试光源,其辐亮度高、 光通量波动小且输出光强稳定性好;采用光纤接入 信号光束并以二维升降台固定调节其与光源的相对 位置;通过 USB 数据线进行数据传输及供电;采用 计算机及 FiberSDK 微型光纤光谱仪测试程序完成 设备的连接驱动及光谱信息的采集处理。待测设备 为不同型号的微型光纤光谱仪产品共 30 台。



图 3 微型光纤光谱仪线性响应测试方案示意图

由于此款光谱仪的探测器采用东芝 Toshiba 公司型号为 TCD 1304D 的前照式线阵快门型 CCD 图像传感器,共有 3 648 个线性阵列像元,在 350~1 000 nm 光谱范围内,具有良好的光谱响应。据此, 在测试过程中,以起始设置积分时间 4 ms 为步进 值,选取 CCD 积分时间为 4~144 ms 间的 36 个采 样点,测试每组积分时间下 3 648 个像元的 DN 值, 用来表示采集到光谱的强度。每组测试重复 8 次取 平均值以精确测试结果。通过对积分时间与 DN 值 的对应关系进行标准化归一处理,评价待测设备的 光谱响应线性特性。

2.2 测试步骤

根据测试方案搭建桌面测试系统如图 4 所示, 测试过程采用 FiberSDK 程序测试并记录输出数 据,具体测试流程如图 5 所示。首先,将待测光谱 仪接入计算机并启动测试程序,将光纤的一端固定 于升降台,另一端连接光谱仪接口。将氘灯光源的 出射口对准光纤头放置,通过调整其水平及俯仰自 由度校对光路,校对过程以测试程序监测显示光谱 曲线在 144 ms 左右达到饱和状态为依据,固定测试



图 4 微型光纤光谱仪线性响应测试现场图



装置,充分预热设备及光源。待测试系统稳定对暗 背景噪声进行测量及扣除,开始测试。自积分时间 4 ms 起,依次步进 4 ms,获取并记录每组积分时间 下光谱数据,直至积分时间为 144 ms 时,显示采集 到的光谱能量达到近饱和状态,停止测试。最终获 得不同积分时间下测得的 DN 值数据,共 36 组,每 组数据含有 3 648 个像元的 DN 值。

3 分析与处理

由于线阵 CCD 图像传感器在采集光谱信号的 过程中,对光强信号强度的调制是通过调节积分时 间来实现的^[11-12]。且在理想情况下,积分时间的增 长与采集到的 DN 值的增长值成线性比例关系为

$$I_n = I_0 \cdot \frac{n}{r} \tag{1}$$

式中:x——起始积分时间, ms;

I0——积分时间为 x 时采集所得 DN 值;

n——CCD 的设置积分时间, ms;

 I_n —积分时间为n时采集的 DN 值。

按实验方案, 起始积分时间为 4 ms, 依次步进 4 ms 进行 DN 值数据采集, 则在理论上, 采集到的 DN 值表示为

$$I_n = I_4 \cdot \frac{n}{4}, \quad n = 4, 8, 12, ..., 140, 144$$
 (2)

一般采用线性拟合的方式,以回归直线的拟合 优度即 r² 为传感系统的线性度。为了更直观地表 征微型光纤光谱仪的线性响应特性,提出一种数据 处理方法:依据原始采集 DN 值数据建立相对的理 论 DN 值数组,从每台设备采集的 DN 值数据中,依 次每个积分时间下固定取样像元的实际采集 DN 值 *I*_n'与理论值 *I*_n进行标准化归一处理,根据归 一化输出结果评定设备的线性响应特性。

根据本文以 4 ms 作为起始测试积分时间下实际测得的 DN 值数据 I₄'选择一个合适的起始标准 能量 I₄ 用于标准归一化处理,根据式(2)计算得到 各积分时间下的采集理论 DN 值 I_n。所选的起始标 准能量值能够将数据处理结果映射于 [0.1, 1.1] 区 间内且浮动于 1 附近方便比较,则标准化输出

$$a = \frac{I'_n}{I_n} = \frac{I'_n}{I_0 \cdot \frac{n}{x}} = \frac{I'_n}{I_4 \cdot \frac{n}{4}} = \frac{I'_n \cdot 4}{I_4 \cdot n},$$

 $n = 4, 8, 12, \dots, 140, 144$

分别对 30 台设备重复以上方案进行测试,在 每台设备一次测试获得的 3 648 个像元的 DN 值数据 中,分别选取第 200,600,1 000,1 400,1 800,2 200, 2 600,3 000,3 400 个像元的 DN 值数据进行记录 及处理。最终,数据处理结果具有同一性。

以其中一台光谱仪的测试结果为例,在积分时 间为4,8,12,...,144 ms 时,其第600,2200,3400个 像元处的采集光谱数据如表1所示,根据在初始积 分时间为4 ms 时测得第600,2200,3400个像素 点 DN 值分别为571.625,345.875,129.125,分别选 择580,370,135作为3组数据处理的起始标准能 量 *I*₄,根据式(3)分别计算得到第600,2200,3400 个像素点的标准化输出值。将采集 DN 值的标准化 输出值与积分时间的关系表示于图6,并依此直观 评价设备的光谱响应线性度。



通过标准化输出曲线,可以直观地看到微型光 纤光谱仪采集到能量,在第 600,2 200,3 400 个像 元点的归一化输出分别在 y=0.000 000 06x+1.013、

(3)

表 1 采样积分时间下, 第 600, 2 200, 3 400 个像元处采集到的能量及标准化输出

积分时间/ms 一	第600个像元		第2 200个像元		第3 400个像元	
	DN值		 DN值	标准化输出	 	
4	571.625	0.985 560 345	345.875	0.934 797 297	129.125	0.956 481 481
8	1 170.25	1.008 836 207	718.75	0.971 283 784	258.5	0.957 407 407
12	1 753.25	1.007 614 943	1 059.75	0.954 729 73	384.655	0.949 765 432
16	2 355	1.015 086 207	1 438.25	0.971 790 541	509.5	0.943 518 519
20	2 917.625	1.006 077 586	1 765.25	0.954 189 189	645.355	0.956 081 481
24	3 525.25	1.013 002 874	2 169.625	0.977 308 559	760.125	0.938 425 926
28	4 135.75	1.018 657 635	2 508.875	0.968 677 606	901.125	0.953 571 429
32	4 705	1.014 008 621	2 921.75	0.987 077 703	1 011.875	0.936 921 296
36	5 323.125	1.019 755 747	3 277.25	0.984 159 159	1 140.375	0.938 580 247
40	5 942.25	1.024 525 862	3 636.75	0.982 905 405	1 262.575	0.935 240 741
44	6 499.125	1.018 671 63	4 034.625	0.991 308 354	1 365.5	0.919 528 62
48	7 089.5	1.018 606 322	4 369.5	0.984 121 622	1 490.5	0.920 061 728
52	7 667.25	1.016 876 658	4 721.375	0.981 574 844	1 630.25	0.928 917 379
56	8 269.625	1.018 426 724	5 113	0.987 065 637	1 755.25	0.928 703 704
60	8 880	1.020 689 655	5 465	0.984 684 685	1 882	0.929 382 716
64	9 443.125	1.017 578 125	5 818.375	0.982 833 615	2 037.875	0.943 460 648
68	10 010	1.015 212 982	6 204.375	0.986 387 122	2 122.875	0.925
72	10 648	1.019 923 372	6 562.875	0.985 416 667	2 269.75	0.934 053 498
76	11 154.875	1.012 239 111	6 936.5	0.986 699 858	2 414.625	0.941 374 269
80	11 800.375	1.017 273 707	7 268.25	0.982 195 946	2 533	0.938 148 148
84	12 349.5	1.013 916 256	7 646.25	0.984 073 359	2 642	0.931 922 399
88	12 943.875	1.014 410 266	7 987.375	0.981 25	2 736.375	0.921 338 384
92	13 494.5	1.011 581 709	8 389.125	0.985 796 122	2 889.25	0.930 515 298
96	14 169.375	1.017 914 871	8 691.875	0.978 814 752	2 993.625	0.923 958 333
100	14 722.5	1.015 344 828	9 056	0.979 0270 27	3 125.25	0.926
104	152 46.75	1.011 057 692	9 491.5	0.986 642 412	3 244	0.924 216 524
108	15 938.5	1.017 784 163	9 883	0.989 289 289	3 389.5	0.929 903 978
112	16 408.625	1.010 383 313	10 202.125	0.984 761 1	3 492.75	0.924 007 937
116	17 032.75	1.012 648 633	10 568.75	0.984 972 041	3 603.625	0.920 466 156
120	17 608.75	1.011 997 126	10 924.875	0.984 222 973	3 765	0.929 629 63
124	18 196.5	1.012 041 157	11 314	0.986 399 303	3 864.25	0.923 357 228
128	18 779.25	1.011 813 039	11 628.875	0.982 168 497	3 999.25	0.925 752 315
132	19 392.375	1.013 185 737	12 048.375	0.986 762 899	4 142.125	0.929 769 921
136	19 939.75	1.011 143 509	12 342.125	0.981 091 017	4 236.875	0.923 066 449
140	20 439.125	1.006 853 448	12 781.375	0.986 978 764	4 363	0.923 386 243
144	21 089.75	1.010 045 498	13 076.375	0.981 709 835	4 474.125	0.920 601 852

y=0.000 002x+0.969 1、y=-0.000 006x+0.947 2 附近 浮动,根据多次测试经验值,拟合趋势线的首项定 值参数位于小数点后 6 位之外,设备的光谱响应稳 定且线性度好。

此外为验证此项测试方案的可行性,对实际测 得数据进行线性拟合,如图 7 所示,在第 600,2 200, 3 400 个像元点的回归直线的拟合优度 r² 值即线性 度近似为 1,待测设备的线性度很好,且所设计的微 型光纤光谱仪线性响应测试方法准确有效。

依照以上方案对微型光纤光谱仪系列产品进行 了大量测试及数据处理分析,得出结论具有同一 性:在一定强度范围的光照条件下,微型光纤光谱 仪的光谱线性响应整体十分稳定,同时也证明了所 设计的微型光纤光谱仪线性响应测试方案的可行 性。且对比图 6 及图 7 两种拟合回归方程,传统线 性度测试方式测得 3 个像元点的线性响应特性近似 一致,本文所提出方法能够通过对比回归方程斜 率,评测 3 个采样像元点的线性度:第 600 个像元> 第 2 200 个>第 3 400 个像元,可知所设计的采用标 准化归一输出结果进行光谱仪器线性响应评测的方 法,更直观且更精确。





4 结束语

本文针对微型光纤光谱仪的光谱响应线性问 题,设计测试方案并搭建实验平台进行了大量实际 测量,针对测得实验数据提出一种简单可行的处理 方法,基于标准化归一输出结果可直观的将待测设 备的线性度表征出来,此方案较传统线性度测试方 式更精确,可用于对微型光纤光谱仪生产及研发过 程的常规检测筛查,避免在采用此设备进行实际检 测分析时,出现光谱响应不稳定,采集光谱信号失 真等现象,影响最终的检测结果。

参考文献

- [1] 程梁. 微型光纤光谱仪系统的研究及其应用 [D]. 杭州: 浙江 大学, 2008: 1-8.
- [2] 吴国安. 光谱仪器设计 [M]. 1 版. 北京: 科学出版社, 1978: 9-20.
- [3] 贾辉,姚勇.微小型光栅光谱仪光学系统的特点与光谱分辨 率的提高[J].光谱学与光谱分析,2007,27(8):1653-1656.
- [4] 安荣, 任勇峰, 李圣昆. 基于 FPGA 和 USB2.0 的数据采集系

统 [J]. 仪表技术与传感器, 2009(3): 49-51.

- [5] 肖瀚. 基于光栅色散的微小型光谱仪的设计与研究 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2013.
- [6] 褚建平. 基于 CCD 的小型化光谱仪的设计与研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2007.
- [7] KYE SUNG LEE, KEVIN P, THOMPSON, et al. Broadband astigmatism-corrected Czerny-Turner spectrometer[J]. Optics Express, 2010, 8(3): 23378-23384.
- [8] 王伟兰, 谈图, 汪磊. 基于线阵 CCD 的光谱信号高速数据采 集系统设计 [J]. 仪表技术与传感器, 2017, 11: 48-50.
- [9] 李全臣, 蒋月娟. 光谱仪器原理 [M]. 1 版. 北京: 北京理工 大学出版社, 1999: 129-131.
- [10] 刘康. 微型光谱仪关键技术及其应用研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- [11] 余钱平. 基于线阵 CCD 的微型光谱仪的设计 [D]. 长沙: 湖 南大学, 2010.
- [12] 王寒冬. 基于 FPGA 的光谱信息采集系统设计 [D]. 南京: 南京邮电大学, 2017.

(编辑:莫婕)