

微型光谱仪增益及读出噪声的测量方法

夏 果¹, 黄 禅¹, 吴 骥¹, 金施群¹, 邢金玉²

¹合肥工业大学光电技术研究院特种显示技术教育部重点实验室, 特种显示技术国家工程实验室,
现代显示技术省部共建国家重点实验室, 安徽 合肥 230009;
²合肥工业大学仪器科学与光电工程学院, 安徽 合肥 230009

摘要 精确地测量增益及读出噪声对微型光谱仪性能评价及光谱数据处理十分重要。基于微型光谱仪的噪声原理, 推导出输出信号与噪声的函数关系, 从而提出了一种测量微型光谱仪增益及读出噪声的方法, 并以此搭建了测量系统。对自主研制的微型光谱仪进行了测量, 得到其增益为 $2.02 e^-/ADU$, 读出噪声为 $68.92 e^-$ 。与光子转移曲线法和暗光谱法测得的实验数据进行对比, 进一步验证了该方法的可行性和有效性。该方法理论推导过程严谨, 操作过程简单, 可广泛应用于各型号微型光谱仪增益及读出噪声的测量。

关键词 测量; CCD; 微型光谱仪; 增益; 读出噪声

中图分类号 TH744 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201737.0112001

Method of Measuring Gain and Readout Noise of Miniature Spectrometer

Xia Guo¹, Huang Chan¹, Wu Su¹, Jin Shiqun¹, Xing Jinyu²

¹Key Laboratory of Special Display Technology of the Ministry of Education, National Engineering
Laboratory of Special Display Technology, National Key Laboratory of Advanced Display
Technology, Academy of Photoelectric Technology, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China;
²School of Instrument Science and Opto-Electronics Engineering, Hefei University
of Technology, Hefei, Anhui 230009, China

Abstract Accurate measurement of the gain and readout noise is very important for the miniature spectrometer performance evaluation and the spectrum data processing. Based on the noise principle of miniature spectrometers, the function between the output signal and the noise is deduced, and a method of measuring the gain and the readout noise of the miniature spectrometer is proposed. The measurement system is built according to the method. The gain of the self-developed miniature spectrometer is $2.02 e^-/ADU$, and the readout noise is $68.92 e^-$. Compared with the experimental results of the photon-transfer curve method and the measuring dark spectrum method, feasibility and effectiveness of the proposed method is further verified. The derivation process of this method is rigorous, and its operation process is simple. The method can be widely used in the measurement of gain and readout noise of the miniature spectrometer.

Key words measurement; CCD; miniature spectrometer; gain; readout noise

OCIS codes 120.4640; 120.6200; 300.6190; 040.1520

1 引 言

光谱仪通过对光谱的检测与分析, 完成对光谱成分、物质属性的测量, 是一种基本的光学检测器。现已广泛应用于天文、生化、物理、医学、食品安全等众多领域, 受到广大研究人员的青睐。然而, 传统光谱仪通常具有体积庞大、结构复杂、成本昂贵、使用环境受限等一系列的缺点。近年来, 随着微电子技术与微加工技术的日益成熟, 微型化已经成为光谱仪发展的主要趋势。微型光谱仪相比较于传统光谱仪, 具有结构紧凑、体

收稿日期: 2016-07-11; 收到修改稿日期: 2016-08-15

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项(2013YQ220749)、中央高校基本科研业务费专项资金(JZ2016HGBZ0754)

作者简介: 夏 果(1983—), 男, 博士, 讲师, 主要从事光电检测技术方面的研究。E-mail: xiaguo@hfut.edu.cn

积小、重量轻、耗耗材少、性能稳定、寿命长、价格低廉且便于批量生产等优点^[1]。微型光谱仪同时也满足了现场检测与实时检测的需求。

增益与读出噪声是评价微型光谱仪性能的重要参数,其结果会直接影响光谱仪整体的动态范围以及信噪比。其中增益被描述为电荷耦合元件(CCD)输出的光电子模拟量与转换系统输出的数字量之比^[2]。读出噪声指的是无光照无积分时间时,器件输出信号的均方根起伏^[2]。因此,对微型光谱仪的增益以及读出噪声进行精确的测量就显得极其重要,目前国内并不存在一套完整的测量光谱仪相关参数的具体方法。

近年来,国内外对于微型光谱仪噪声分析及参数测量的研究已有多处报导。Galbán等^[3]通过对海洋光学公司 USB4000 型号的微型光谱仪的研究,指出了微型光谱仪的噪声现象,但未对噪声进行分类;Zonios等^[4]考虑了微型光谱仪暗噪声及固定模式噪声的影响,对海洋光学公司 USB2000 型号的微型光谱仪的噪声进行了分类;在不同温度及光源的条件下,Davenport等^[5]分析了微型光谱仪的噪声现象;张闻文等^[6]基于改进的光子转移技术,提出了 EMCCD(电子倍增 CCD)性能参数的测试方法;李载峰等^[7]提出了 CCD 相机电子学增益的测试方法。本文基于微型光谱仪的噪声原理,推导出微型光谱仪平均信号强度与总体噪声的函数关系。由此提出了一种测量微型光谱仪增益以及读出噪声的方法。并搭建测量系统对自主研发的一款微型光谱仪的增益及读出噪声进行测试分析。实验结果表明了该方法的可行性和有效性。该方法的提出,为光谱仪性能评价方法提供了一定的参考价值。

2 微型光谱仪概述

微型光谱仪的光学结构如图 1 所示。设计采用的是交叉非对称型的 Czerny-Turner 光路结构^[8],相比 M 型结构而言,交叉非对称型 Czerny-Turner 光路具有结构紧凑的优点^[9]。在设计中选取两片焦距不同的球面反射镜,用以构成非对称结构,这样可以增加光学系统的可变参量,对系统进行更多的优化从而改善系统的结构尺寸。光束从狭缝入射到准直镜上,准直后的平行光入射到平面衍射光栅上,经过光栅分光作用后的衍射光入射到聚焦镜上,经过聚焦镜聚焦后入射到探测器 CCD 上成像^[10]。

如图 2 所示,微型光谱仪的数据采集部分通过现场可编程门阵列(FPGA)为线阵 CCD 及模数转换(AD)芯片提供时序驱动信号并控制 USB 芯片采用先入先出(FIFO)的传输模式^[11-12]。线阵 CCD 接收光学分光部分输出的光信号,通过光电效应生成模拟信号并输出至 AD 芯片。AD 芯片将模拟信号转换为数字信号输出至 FPGA。最后 FPGA 将数字信号通过采用 Slave FIFO 模式的 USB2.0 接口上传至上位机并由上位机对信号进行处理、分析。同时,上位机对光谱仪的指令也通过 USB2.0 接口传递给微型光谱仪。

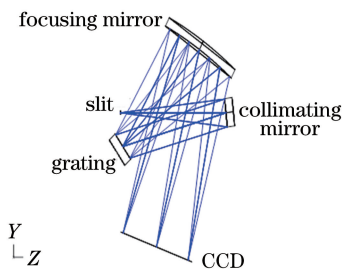


图 1 交叉非对称式 Czerny-Turner 光学结构

Fig. 1 Crossed-asymmetric Czerny-Turner optical structure

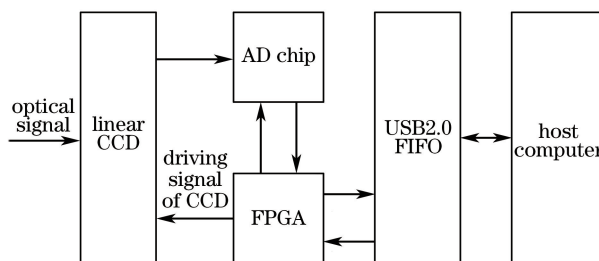


图 2 数据采集部分结构

Fig. 2 Block diagram of the data acquisition part

3 微型光谱仪的噪声分析

微型光谱仪以电子数为单位表示的总噪声 N_{e^-} 主要由读出噪声 R_{e^-} 、光电子噪声 N_{se^-} 、暗电流噪声 N_{De^-} 及固定模式噪声 N_{FPNe^-} 构成,各种噪声是相互独立的^[13]。所以,微型光谱仪的总噪声与各种噪声的关系满足^[4,14]

$$N_{e^-}^2 = R_{e^-}^2 + N_{se^-}^2 + N_{De^-}^2 + N_{FPNe^-}^2 \quad (1)$$

微型光谱仪的输出信号可以以电子数(e^-)为单位表示为 S_{e^-} ,也可以以模数转换单位(ADU)表示为 S_{ADU} 。 S_{e^-} 与 S_{ADU} 满足

$$S_{e^-} = g \times S_{ADU}, \quad (2)$$

式中 g 表示微型光谱仪仪器系统的增益。微型光谱仪的噪声也满足相应的关系

$$N_{e^-} = g \times N_{ADU}。 \quad (3)$$

在不考虑暗电流与固定模式噪声的影响下,微型光谱仪的输出信号可以表示为

$$S_{ADU} = S_{bias} + \frac{1}{g} \times n_{e^-}, \quad (4)$$

式中 S_{bias} 是电路的偏置信号, n_{e^-} 是 CCD 光电效应所产生的所有电子数量。

在信号较弱的情况下,为了使输出信号的特征更为明显或者为了更加有效地测量相应数据,通常会对所得到的信号进行放大,放大的系数用倍增增益 G 表示。放大之后的信号为 $G \times S_{ADU}$ 。结合(2)式可以得到放大后以电子数为单位表示的信号

$$G \times S_{e^-} = g \times G \times S_{ADU}。 \quad (5)$$

噪声是由信号的标准差表示的。所以,噪声与信号满足

$$N_{e^-}^2 = \text{var}(G \times S_{e^-})。 \quad (6)$$

式中 $\text{var}()$ 表示变量的方差。将(4)式及(5)式代入(6)式,对 $G \times S_{e^-}$ 进行分解,

$$N_{e^-}^2 = G^2 \times \text{var}(g \times S_{bias}) + G^2 \times \text{var}(n_{e^-}), \quad (7)$$

式中 $g \times S_{bias}$ 是以电子数为单位的偏置信号。所以, $\text{var}(g \times S_{bias}) = R_{e^-}^2$; n_{e^-} 是 CCD 通过光电效应产生的所有电子的数目,服从泊松分布。根据泊松分布的定义, $\text{var}(n_{e^-}) = n_{e^-}$, (7)式可化简为

$$N_{e^-}^2 = G^2 \times R_{e^-}^2 + G^2 \times n_{e^-}。 \quad (8)$$

由(3)式可以得到以不同单位表示的读出噪声的转换关系为

$$R_{e^-} = g \times R_{ADU}。 \quad (9)$$

将(3)式以及(9)式代入(8)式

$$g^2 \times N_{ADU}^2 = G^2 \times g^2 \times R_{ADU}^2 + G^2 \times n_{e^-}, \quad (10)$$

将(4)式代入(10)式消去 n_{e^-} ,可以得到总噪声与信号的关系为

$$N_{ADU}^2 = G^2 \times R_{ADU}^2 + \frac{G^2}{g} (S_{ADU} - S_{bias})。 \quad (11)$$

综上所述,(11)式描述了总噪声、读出噪声、增益、输出信号及偏置信号的关系。与(1)式相比,(11)式中将总噪声分为读出噪声及光电子噪声,而不存在暗电流噪声与固定模式噪声。这是因为在分析噪声时,没有考虑暗电流与各像素对光照响应不同所产生的影响。

4 增益及读出噪声的测量方法

微型光谱仪增益及读出噪声的测量方法的理论依据来自第3节微型光谱仪的噪声分析。首先确定信号放大系数 $G, G^2/g$ 与 $G^2 \times R_{ADU}^2$ 为定值;进一步由(11)式可以得到 $S_{ADU} - S_{bias}$ 的变化量与 N_{ADU}^2 的变化量成正比;然后通过改变入射光强度,测量出多组 $S_{ADU} - S_{bias}$ 与 N_{ADU}^2 的数据并进行线性拟合;最后从拟合直线的参数即可得出微型光谱仪的增益及读出噪声。下文具体介绍测量系统的搭建及测量方法。

4.1 测量系统的搭建

测量系统的构成如图3所示,包括放置在积分球内的稳定光源、电压控制器、计算机及需测量的微型光谱仪四个部分。积分球内的稳定光源可以在测量时提供稳定且均匀的光信号;电压控制器通过改变光源电路的输入电压从而改变光源的光强度;计算机用于采集微型光谱仪输出的信号,对采集信号进行数据处理、分析等。

4.2 测量方法

测量方法的具体流程如图4所示。在测量之前,首先要确定信号的倍增增益 G ,如果本次测量时信号没有放大,则倍增增益 G 为1。为了排除暗噪声及固定模式噪声的影响,采用以下的做法:在相同的人射光强及相等的较短积分时间的条件下,采集两个信号,记为 S_A 及 S_B 。采集的信号减去偏置信号并去除暗电流噪声的影响。计算经处理后的 S_A 以及 S_B 的平均信号强度,记为 \bar{S}_A 及 \bar{S}_B ,并计算平均信号强度比 $r = \bar{S}_A / \bar{S}_B$ 。将 S_B 乘以 r ,记为 S_C 。用 S_A 减去 S_C ,得到 CCD 每个像素的信号的差值,计算该数据的方差。因

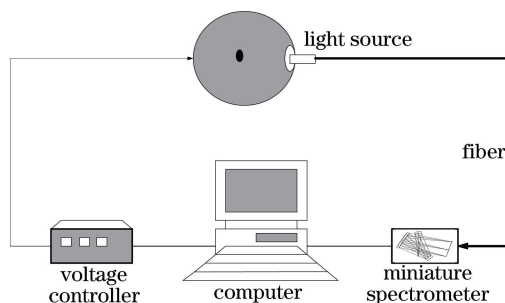


图 3 增益及读出噪声测量系统

Fig. 3 Measuring system for gain and readout noise of the spectrometer

为 S_A 及 S_C 由于噪声的随机性而相互独立, 所以求出的 S_A 与 S_C 差值的方差就是在平均信号强度 \bar{S}_A 下, 两倍的总噪声平方 N_{ADU}^2 。进一步即可得到光谱仪在平均信号强度为 \bar{S}_A 条件下的总噪声的平方 N_{ADU}^2 , 记录该组数据。这样得到的平均信号强度所对应的总噪声就排除了固定模式噪声的影响。改变入射光强度, 得到多组平均信号强度 \bar{S}_A 与在此平均信号强度下的总噪声的平方 N_{ADU}^2 的数据。将这些数据通过最小二乘法线性拟合得到一条连续的曲线。由曲线的斜率 k 及曲线在纵轴上的截距 b , 可以得到微型光谱仪的增益 G^2/k 及读出噪声 \sqrt{b}/G 。

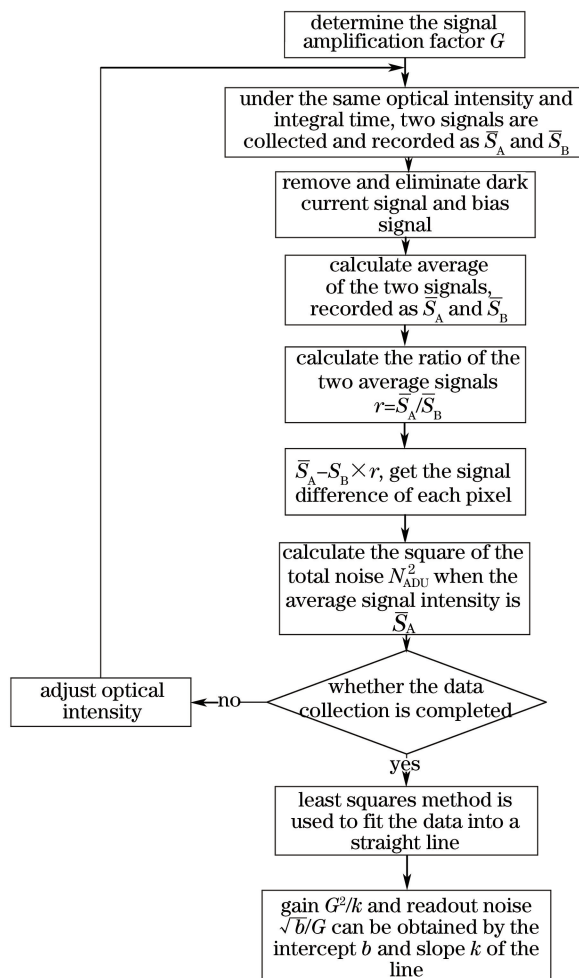


图 4 测量方法具体流程

Fig. 4 Measuring method flow

5 测试结果

利用上述测量方法,对一款自主研制的微型光谱仪进行测量。测量系统置于暗室消除环境光干扰且环境温度保持在 25 ℃,拟合出的直线如图 5 所示。

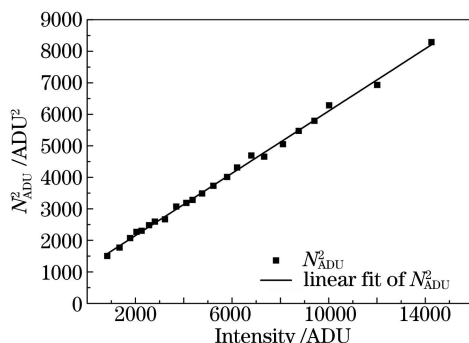


图 5 平均信号强度-噪声平方拟合曲线

Fig. 5 Average signal intensity-noise square fitting curve

图 5 中横轴表示入射光的平均信号强度,纵轴表示微型光谱仪总噪声的平方。图中离散点为采集数据时平均信号强度对应的总噪声平方的大小,从拟合曲线可以得到相关系数为 0.99741,斜率为 0.494,在纵轴上的截距为 1164.3784。测量时未将信号放大,则 $G = 1$ 。由此可以得出:该微型光谱仪的增益 g 为 $2.02 e^- / ADU$,读出噪声 R_{ADU} 为 34.12 ADU,即 R_{e^-} 为 $68.92 e^-$ 。

为了验证该方法的准确性,将该方法测量出的增益及读出噪声与采用光子转移曲线法测得的增益及暗光谱法测出的读出噪声的数值进行对比^[6]。光子转移曲线表示 CCD 在不同强度的均匀光照下噪声的响应情况。随着光强的逐渐增加,信号的光电子噪声超过读出噪声而占据主导地位。光电子噪声服从泊松分布,采用对数坐标,光电子噪声被特征化为一条斜率为 1/2 的直线。光子转移曲线法就是利用光子转移曲线的这个性质,将光电子噪声区域的数据进行拟合,其拟合直线在 X 轴的截距就是光谱仪的成像系统增益。暗光谱法是采集相同短积分时间下的两张暗光谱并将它们相减,计算出相减后光谱的标准差。

分别采用不同方法对微型光谱仪进行多次测量,结果如表 1 所示。

表 1 不同方法测量参数的对比

Table 1 Comparison of different methods for measuring parameters

Measuring No.	Modified method		Method of	Method of
	Gain / (e^- / ADU)	Readout noise / ADU	photon-transfer curves	measuring dark spectrum
1	2.02	34.12	2.23	33.27
2	1.99	34.26	2.18	33.26
3	2.01	33.42	2.24	32.53
4	2.04	32.50	2.26	34.20
5	2.02	33.68	2.24	32.09

采用光子转移曲线法测出的光谱仪增益比采用本文方法测出的增益略大。这是因为光子转移曲线法是拟合光电子噪声主导区域内的数据,如果要忽略读出噪声进入光电子噪声主导的区域,平均信号强度必须远远大于 1000 ADU,否则拟合曲线会受到读出噪声的影响,从而使测试结果略微偏大。可以看出,在测量读出噪声较大或者动态范围较小的仪器时,本文方法比光子转移曲线法能得到更准确的结果。采用暗光谱法测出的读出噪声与采用本文方法测出的读出噪声的大小基本相同,偏差在测量误差允许范围以内。

6 结 论

虽然微型光谱仪的发展日趋成熟,但仍然缺乏一套比较完整的参数测量系统。基于微型光谱仪的噪声原理,推导出微型光谱仪输出信号、增益、读出噪声及总噪声的函数关系,由此提出了一种测量微型光谱仪增益及读出噪声的方法。基于此方法,通过搭建测量系统,得到被测微型光谱仪的增益为 $2.02 e^- / ADU$,读出

噪声为 $68.92 e^-$ 。与传统的光子曲线转移法测出的增益以及通过暗光谱法测出的读出噪声进行对比,验证了该方法的准确性。该方法理论推导严谨,测量系统易于搭建,实验操作过程简便,测量结果精确,为光谱仪性能评价方法提供了一定的参考。

参 考 文 献

- [1] Shi Junfeng, Hui Mei, Wang Dongsheng, *et al.* Micromation and applications of spectrometers[J]. Optical Technique, 2003, 29(1): 13-16.
史俊峰, 惠梅, 王冬生, 等. 光谱仪的微型化及其应用[J]. 光学技术, 2003, 29(1): 13-16.
- [2] Liu Yaxia. Research on the calibration technique of the TDI CCD remote sensing camera[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2005.
刘亚侠. TDI CCD 遥感相机标定技术的研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2005.
- [3] Galbán J, de Marcos S, Sanz I, *et al.* CCD detectors for molecular absorption spectrophotometry. A theoretical and experimental study on characteristics and performance[J]. Analyst, 2010, 135(3): 564-569.
- [4] Zonios G. Noise and stray light characterization of a compact CCD spectrophotometer used in biomedical applications [J]. Applied Optics, 2010, 49(2): 163-169.
- [5] Davenport J J, Hodgkinson J, Saffell J R, *et al.* Noise analysis for CCD-based ultraviolet and visible spectrophotometry [J]. Applied Optics, 2015, 54(27): 8135-8144.
- [6] Zhang Wenwen, Qian Yuehong, Chen Qian, *et al.* Performance parameters test of electron multiplying CCD [J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(12): 3390-3395.
张闻文, 钱月红, 陈钱, 等. 电子倍增 CCD 性能参数测试方法研究 [J]. 红外与激光工程, 2013, 42(12): 3390-3395.
- [7] Li Zaifeng, Li Junlin, Lan Taiji. Research of the CCD camera's electronics gain test method [J]. Electronic Measurement Technology, 2014, 37(12): 49-52.
李载峰, 李俊霖, 兰太吉. CCD 相机电子学增益测试方法研究 [J]. 电子测量技术, 2014, 37(12): 49-52.
- [8] Xia G, Qu B X, Liu P, *et al.* Astigmatism-corrected miniature Czerny-Turner spectrometer with freeform cylindrical lens[J]. Chinese Optics Letters, 2012, 10(8): 081201.
- [9] Qu B X, Xia G, Yu F H. Optimization of freeform cylindrical lens in Czerny-Turner spectrometer system to correct the astigmatism by using user defined error function[C]. SPIE, 2012, 8416: 841611.
- [10] An Yan, Liu Ying, Sun Qiang, *et al.* Design and development of optical system for portable Raman spectrometer[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(3): 0330001.
安岩, 刘英, 孙强, 等. 便携式拉曼光谱仪的光学系统设计与研制[J]. 光学学报, 2013, 33(3): 0330001.
- [11] Wang Bo, Bai Yonglin, Ouyang Xian, *et al.* Spectrum data acquisition system based on linear CCD[J]. Acta Photonica Sinica, 2010, 39(3): 441-445.
王博, 白永林, 欧阳娴, 等. 基于线阵 CCD 的高速光谱信息采集系统的研究[J]. 光子学报, 2010, 39(3): 441-445.
- [12] Wang Weilan, Tan Tu, Wang Lei, *et al.* Development of micro-spectrometer based on linear CCD chip[J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2011, 6(4): 299-304.
王伟兰, 谈图, 汪磊, 等. 基于线阵 CCD 的微型光谱仪的研制[J]. 大气与环境光学学报, 2011, 6(4): 299-304.
- [13] Davenport J J, Hodgkinson J, Saffell J R, *et al.* Noise analysis of a CCD based ultra-violet spectrometry system[C]. SPIE, 2012, 8439: 84391P.
- [14] Li Yunfei, Si Guoliang, Guo Yongfei. Noise analyzing and processing for scientific grade CCD camera[J]. Optics and Precision Engineering, 2005, 13(s1): 158-163.
李云飞, 司国良, 郭永飞. 科学级 CCD 相机的噪声分析及处理技术[J]. 光学精密工程, 2005, 13(s1): 158-163.