

doi: 10.3788/lop47.041604

Binning 技术在光谱仪中的实验研究

周 望 沈为民 周健康 陈新华

(苏州大学现代光学技术研究所江苏现代光学技术重点实验室, 江苏 苏州 215006)

摘要 针对光谱分析实验中线阵 CCD 灵敏度较低, 提出了一种 Binning 技术可将几个相邻的像素合并一个像素, 提高线阵 CCD 的像素响应度、信噪比和 CCD 的帧速。研究包括光谱色散成像、CCD、光谱数据分析。研究表明, 通过改变 CCD 的驱动时序, 对光谱族中的敏感波段实现合并(Binning), 可获得更高的灵敏度和信噪比。对相邻像素合并造成的影响进行了讨论。

关键词 Binning; 线阵 CCD; 变参驱动; 光谱仪

中图分类号 O433 OCIS 160.2540 350.4010 文献标识码 A

Experimental Research for Binning Technique in Spectroscopy

Zhou Wang Shen Weimin Zhou Jiankang Chen Xinhua

(Jiangsu Provincial Key Laboratory of Modern Optical Technology, Institute of Modern Optical Technology, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215006, China)

Abstract A method combining several pixels into a pixel using Binning technology is proposed, considering that delicacy of linear CCD is lower in spectral analysis. Thereby several performances of linear CCD, such as responsibility, sing-noise ratio and frame speed are enhanced. The researches include discussing the sign output structure of a CCD, and capturing the spectrum family, and analyzing data of sample. They indicate that combining sensitivity sub-family of spectrum together (Binning) through changing drive sequence of CCD, can get higher sensitivity and signal-noise-ratio (SNR). The influence of Binning on near pixels is discussed.

Key words Binning; linear array CCD; variety drive; spectrum

1 引言

CCD 在光谱学上的应用, 可追溯到 1979 年 Ratzlaff 等^[1]用一个 1728 单元的线阵 CCD 进行分子吸收光谱的研究, 但当时 CCD 并未从此得到普及。在强光条件下, 与其他多道检测器相比, CCD 的优势并不明显, 主要是噪声来自强光源的波动和散粒噪声。在弱光条件下光谱测定方面, CCD 由于具有光谱响应范围宽、灵敏度高、动态响应范围宽的优势而得到了业界的重视和广泛应用。在光谱快速分析中, 样品光谱反射和发射的光经过光学色散系统变得十分微弱, 传统的光谱分析系统(摄谱方法)有照像法和光电法。前者由于采用菲林片成像, 其分析过程具有繁琐、耗时和不具有实时性等缺点, 所以主要采用光电法。该方法是采用光电倍增管对样品色散后的光谱线逐一扫描, 获取所需的光谱曲线。在机械扫描装置的配合下, 对整个波段逐个波长点地进行测定。而 CCD 的应用使光谱分析有了更快捷的方法。采用面阵或线阵 CCD 作为感光元件, 只需通过一次曝光即可获得所需的全部光谱数据。另外, 面阵或线阵 CCD 各像元间有固定的间隔尺寸, 利用这一特性来准确地设定光谱曲线的标度。样品色散后的光谱线对于量子效率并不高的 CCD 像元感光显得较为微弱, 信噪比较低。所以, 在一些特殊场合的应用中, 如空间摄影、航拍中会采用

收稿日期: 2009-04-17; 收到修改稿日期: 2009-09-09

基金项目: 江苏省重点实验室项目(KJS0632)资助课题。

作者简介: 周 望(1958—), 男, 高级工程师, 主要从事智能化光电仪器设计方面的研究。E-mail: wang58@suda.edu.cn

TDI-CCD。TDI-CCD 的工作原理是在时间上对目标进行信号的合并，以增强信号的信噪比。从理论上讲，这种工作原理就是 Binning 技术的应用范例。

2 Binning 技术与光谱分析

对于光谱分析也同样遇到了信号微弱的状况，根据 CCD 像元信号逐一输出的特点，通过改变 CCD 的驱动时序，在空间上将相邻像元进行信号合并，将色散后的光谱线或谱段按实际需求实现合并 Binning，来获取较高的信噪比和提高信号的输出速率。采用 Binning 技术，对于面阵 CCD 其信噪比大致提高为 $\sqrt{m \times n}$ 倍，其中 $m \times n$ 为 Binning 的像素数，像元中的感光电荷按照一定方式移动、合并，图 1 所示为一个 2×2 像元 Binning 过程。首先在列方向的像元在水平电荷寄存器中完成合并，然后，在输出寄存器上完成行方向的电荷合并。同理，线阵 CCD 其信噪比大致也可以提高 \sqrt{n} 倍，其中 n 为 Binning 的像素数。另一方面，理论上信号的读出速度也提高了 $m \times n$ 倍(面阵)或 n 倍(线阵)。

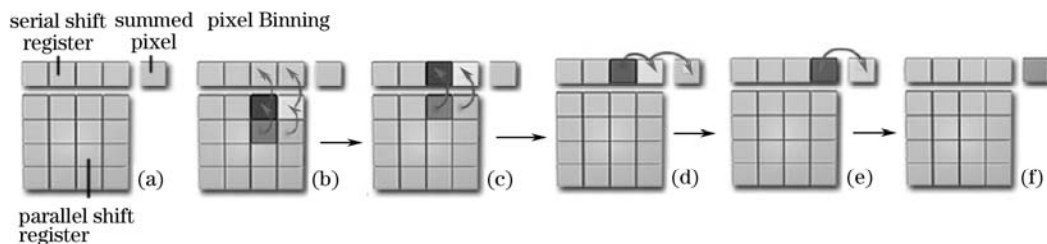


图1 面阵 CCD 的 2×2 像元 Binning 过程
Fig.1 Binning process of 2×2 pixels in an area CCD

CCD 像元 Binning 会降低图像分辨率，这对于光谱仪是以牺牲光谱分辨率为代价来提高其灵敏度和输出速率。分辨率降低对一台光谱范围为可见光 430~750 nm 光谱仪有一定影响。在有些场合，3 nm 的光谱分辨率就已经达到了实用价值。用一片 2048 像元的线阵 CCD 作为感光元件，320 nm 带宽的谱段按照 3 nm 带宽可分为 106 路，20(2048/106=20)像元 Binning 成一个单位的电荷包，线阵 CCD 的信噪比由此可提高 $\sqrt{20}$ 倍。由于每一组 n 个像元除了感光电荷信号之外，都存在随机噪声，通过 n 个像元的叠加，使得噪声在矢量叠加过程中相互削弱，信号值的平均值将趋于真值。

3 Binning 的信噪比效果分析

设用 m 个像元做 Binning，每个像元的信号为 $S(i)$ ，它的随机噪声也用一个随机函数 $n(i)$ 表示。混有随机噪声的各像元信号可表示为 $f(i)=S(i)+n(i)$ ， i 为像元的排序。经过 Binning 线性叠加平均后有

$$\sum_{i=1}^m f(i) = \sum_{i=1}^m [S(i) + n(i)] = mS + \sum_{i=1}^m n(i) \quad (1)$$

假如当 $m=10$ 时，CCD 像元的信号经叠加后增强了 10 倍，而噪声的随机信号由于其随机性应按矢量叠加，故经 m 次叠加的强度之和为 $\sqrt{\sum_{i=1}^m n^2(i)}$ 即 $\sqrt{m} n(i)$ ，所以， m 个像元叠加后的平均信噪比为

$$\frac{mS}{n\sqrt{m}} = \sqrt{m} \frac{S}{n} \quad (2)$$

所以，经过合并后信号平均提高了 m 倍，而像元信噪比提高了 \sqrt{m} 倍。实际上是将某一波段的光谱线合并成一条“粗”光谱线，信号得以增强，而损失了光谱的分辨率。

4 Binning 技术的实现

CCD 感光产生的光电荷都通过光电荷转移通道的末端输出，如图 2 所示。将电荷信号转换成电压或电流信号形式，CCD 的输出方式分为电流输出、浮置扩散放大器输出和浮置栅放大器输出 3 种类型。

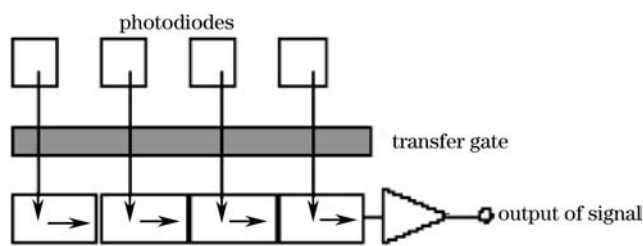


图2 CCD 光电荷转移通道的末端输出

Fig.2 Export of the transfer channel for the charge in CCD

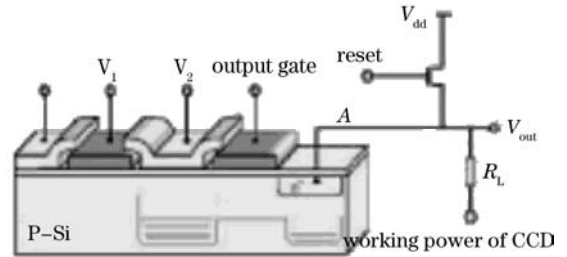


图3 电流方式输出结构

Fig.3 Export structure of the current

图3为电流方式输出结构。当信号电荷在转移脉冲的驱动下向右转移到末端电极下的势阱， V_2 电极上的电压由高变低时，造成 V_2 下方的势阱提高，信号电荷通过输出栅下的势阱进入反向偏置的二极管。由UD，电阻 R_L ，衬底P和 N^+ 区域构成的反向偏置二极管相当于一个无限深的势阱。进入反向偏置的二极管中的电荷，将产生输出电流 I_D ，而且与电阻 R_L 成反比。因此，输出电流 I_D 与注入到二极管中的电荷量成线性关系，即 $Q_S = I_D dt$ 。由于 I_D 的存在使得A点的电位发生变化， I_D 增大，A点的电位降低。所以，用A点的电位来检测二极管的输出电流 I_D ，用隔直电容将A点的电位变化取出，再通过放大器输出。图中的场效应管作为Reset的复位电子开关，它的主要功能是把上一个读出周期内输出二极管还没有来得及输出的光电荷通过复位场效应管在电源回路中泄放掉。因为，当复位场效应管的栅极正向偏置时复位场效应管道通，这时它的动态电阻远小于偏置电阻 R_L ，使得输出二极管中剩余电荷被迅速抽走，然后A点的电位恢复到起始的高电平。

图4为浮置扩散放大器的输出结构，前置放大器和CCD做在同一个硅片上，图中 T_1 为Reset复位管，紧接着4个场效应管(T_2, T_3, T_4, T_5)形成射极跟随放大电路。在 T_1 复位管下方的势阱未形成前，首先在复位管的栅极施加复位脉冲，导致复位管导通，在浮置扩散区中的剩余电荷经电源 V_{dd} 回路被泄放， T_2 的栅极为 V_{dd} 电位。然后 T_1 复位管截止，在浮置扩散区形成势阱，并收集信号的电荷产生电位来控制射极跟随放大电路。而该点电位的变化量 ΔV 与浮置扩散放大器有关的总电容 C_{FD} 有关，则有 $\Delta U = Q_s / C_{fd}$ 关系。输出的是经放大器放大 K 倍后的信号。

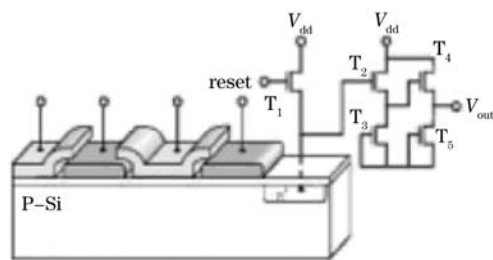


图4 浮置扩散放大器的输出结构

Fig.4 Export structure of an amplifier in floating and diffusing

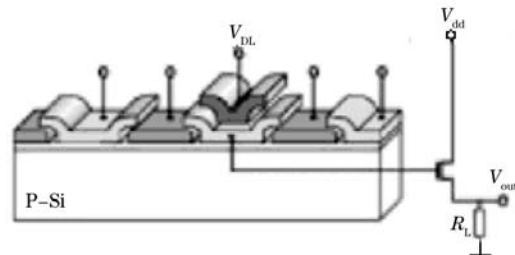


图5 浮置栅放大器输出结构

Fig.5 Export structure of an amplifier in the floating bar

图5为浮置栅放大器输出结构。输出放大器的栅极与沟道上面的浮置栅连接，而不是与信号电荷的转移沟道直接相连。所以，当信号电荷移动到浮置栅下面的沟道时，在浮置栅上感应出镜像电荷，与电荷量成正比的电位控制着输出放大器的栅极，经放大器放大获得输出信号。其优点是在传输过程中实现了一种信号非破坏性读取。

5 光谱仪的结构设计

光谱仪采用光纤导入被测光，在光纤的一端通过聚焦透镜收集被测光，而光纤的另一端将多股光纤一字排列，起到狭缝的效果，省去了狭缝元件，提高了被测光的利用率。一字排列的被测光投射到透射光栅

分光元件, 在光栅的另一侧由线阵 CCD 接收已色散的被测光。通过光纤导入被测光有利于光谱仪的小型化, 结构灵活, 并省去了狭缝元件。其结构设计如图 6 所示。

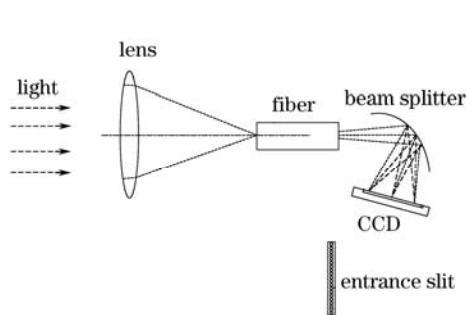


图 6 平场像差校正凹面全息光栅光纤摄谱结构
Fig.6 Structure of measure fiber based on the calm aberration corrected convave holographic grating

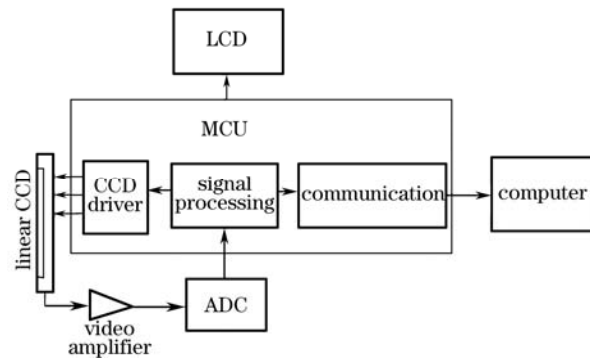


图 7 电子学设计
Fig.7 Design of electronics

采用平场像差校正凹面全息光栅, 具有色散均匀性、分辨率和光强分布均匀性等影响波长标定精度和系统测量精度等优点^[2]。在线阵 CCD 获得了色散后的被测光, CCD 中的感光元获得了与光谱线强弱相对应的光照, 转化成光生电荷。在读出时序驱动下, 光谱线信号以串行方式一一输出, 信号经过高速模/数(A/D)转换成数字信号, 每一帧信号形成一组与被测光对应的光谱族数据, 最后由数据处理计算机处理形成检测结果和光谱图。电子学设计框图如图 7 所示。所选 TCD1252 线阵 CCD 器件为 TOSHIBA 公司的高灵敏低暗电流产品^[3], 有效像元 2700 个, 像元尺寸为 $11 \mu\text{m} \times 11 \mu\text{m}$ 。

6 Binning 驱动时序的设计

在 CCD 输出原理中介绍了在每一个像元的光生电荷依次在时序脉冲序列组驱动下输出, 其中都必须施加一个 Reset 复位信号, 它的作用是将前一个像元的电荷通过电源泄放掉。由于 UD, 电阻 R_L , 衬底 P 和 N^+ 区域构成的反向偏置二极管存在着一个无限深的势阱, 可以堆积多个像元的电荷量, 所以 Binning 技术的核心内容是使 CCD 的驱动时序按照预先设计目标, 改变 Reset 信号输出时序, 可以将指定的多个像元合并成“包”后再一次性输出, 最终转化成数字信号。图 8 为传统驱动模式与 Binning 驱动模式在时序上的对照。

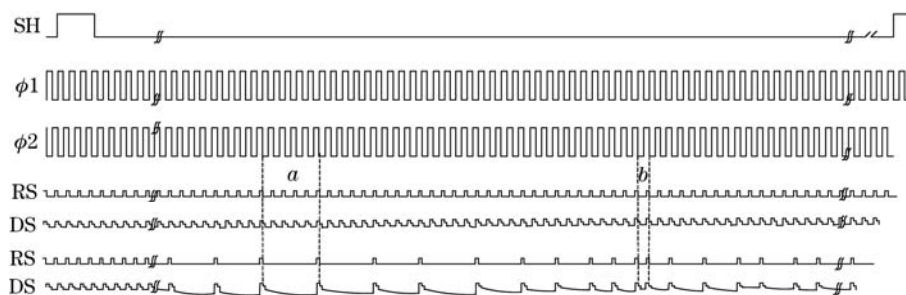


图 8 传统驱动模式与 Binning 驱动模式的时序比较
Fig.8 Comparison of driven sequence in traditional with the Binning

7 Binning 的实验

通过计算机的通讯接口向光谱仪中的控制器 MCU 传送 Binning 的设置参数, MCU 根据参数控制 RS 的输出序列。从图 8 可以看到, “a” 区段是由 6 个像元合并而成, 视频输出信号经过 6 个单元 Binning, 输出了一个逐渐增大的视频信号电压(负), 在下一个复位脉冲 RS 到来之前, 完成 A/D 转换获取视频信号的数据。而在 “b” 区段还是按照连续方式 RS 复位, 此刻的视频信号电压就较小。复位信号 RS 的时间序

列可以通过 PC 机的人机操作界面, 根据被测光谱分布的特点进行设定后, 然后经通讯接口送交给光谱仪。采用 1 个时钟/机器周期的高速 MCU 其工作频率已可提升至 40 MHz, 可获得 25 ns 脉宽的高频脉冲。

实验中的光谱仪采用了 STC 12C5A60S2 系列的 MCU^[4], 增强型 8051 内核, 速度比普通 8051 快 8~12 倍, 宽电压 3.3~5.5 V。芯片设有 FLASH-ROM 功能, 使光谱仪可在失电状态下保存当前的 Binning 工作参数。

8 结 论

带有 Binning 技术的光谱仪采用了一种高速 MCU 嵌入系统为整个仪器的数据处理及控制核心。MCU 经过通讯接口与计算机设置、传递 Binning 的运行参数和回送测试到的光谱数据。该系统的设计架构可以方便、灵活地改变驱动时钟序列的输出模式, 重定义被测光谱的敏感谱段。理论上参与 Binning 像元个数设定是不受限的, 但从 CCD 输出方式可以看到, “合并”后的像元电荷最终都会聚在反向偏置二极管形成的一个很深的势阱中, 一旦多个像元的电荷量超出该势阱的容量所能承载的极限, 会引起饱和造成信息失真。实验光谱仪结合光纤导入方法、Binning 多像元合并输出技术, 借助平场凹面光栅分光手段, 实现多通道探测器 CCD 光谱探测。实验设计能实现样品光谱的快速分析, 减小仪器体积及提高测试灵敏度。Binning 多像元合并输出技术尝试性地应用 CCD 器件功能, 将为今后研究工作提供更为丰富和有价值的信息。

参 考 文 献

- 1 Kenneth L. Ratzlaff, Steven L. Paul. Characterization of a charge-coupled device photoarray as a molecular absorption spectrophotometric detector[J]. *Appl. Spectr.*, 1979, **33**(3): 240~245
- 2 Li Hongguang, Wu Baoning, Shi Huanfang *et al.*. Design of a miniature color measuring spectro-photometer[J]. *J. Appl. Opt.*, 2005, **26**(6): 66~69
李宏光, 吴宝宁, 施浣芳 等. 一种小型光谱色彩分析仪的设计[J]. *应用光学*, 2005, **26**(6): 66~69
- 3 TOSHIBA. TCD1252AP[R]. *Datesheet*. 1997, 04
- 4 www.mcu-memory.com