

# 微型光谱仪的数据噪声处理

谢印忠<sup>①</sup>

(临沂大学信息学院 山东省临沂市双岭路中段 276005)

**摘要** 原始信号的噪声处理是微型光谱仪器数据处理的重要组成部分,为了提高在弱光照射下便携式微型光谱仪的工作性能,在分析了线阵 CCD 探测器的各种噪声来源基础上,指出依靠硬件电路去除噪声在微型仪器设备应用的局限性。虽然判断一段离散数据曲线上噪声大小可以采用解析几何或者傅里叶变换得到特征频谱来判断,但是运算复杂,不利于在单片机应用中编程。通过对 Freeman 方向链码的分析,提出利用 Freeman 方向链码判断一段曲线上的噪声程度,量化后作为平滑窗口尺寸选择的依据。在处理线阵 CCD 输出信号中将该方法与固定窗口曲线平滑或者 FFT 数字滤波器进行了比较,证明了其可行性。Freeman 链码的应用简化了在单片机编程中使用数字滤波器的大模块的编程,降低了编程难度,同时使信号噪声的处理仅仅在数学运算阶段中,不引入其他的电路噪声,从而达到比前期增加电子元件处理的方法能更好地抑制噪声的目的。

**关键词** 光谱学; 信号处理; 电荷耦合器件; Freeman 链码

**中图分类号:** TH744.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-8138(2011)06-3067-06

## 1 引言

光谱仪常用来通过光谱检测和分析,以完成光谱成分、材料光学属性及物质成分的分析与鉴定等,是一种基本的光学检测仪器,广泛用于物理研究、天文观测、生物化学分析、工业自动检测等领域<sup>[1]</sup>。随着微电子技术和微加工的发展,微型光机电系统的制造技术日趋成熟;光谱仪器的微型化、便携式成为近来研究的一个热点<sup>[2-5]</sup>。

CCD(Charge Coupled Device, 电荷耦合器件)是 20 世纪 70 年代由美国贝尔实验室提出,经 30 多年发展起来的新型半导体集成光电器件,CCD 是固态图像传感器的敏感器件,具有光电转换、信号储存、转移(传输)、输出、处理以及电子快门等多种独特功能<sup>[6,7]</sup>,其中线阵 CCD 被广泛作为光电探测器应用于微型光谱仪器中,光谱仪器微型化的核心元件。

## 2 微型光谱仪结构特点

研究以线阵 CCD 为探测器的便携式光谱光度计为对象,其结构如图 1 所示,光束由狭缝进入光谱仪,经平面镜反射到准直镜转变成平行光照射到衍射光栅上,光栅射出的衍射光被聚焦镜汇聚到线阵 CCD 感光面上。线阵 CCD 可以同时接收到不同波长的狭缝的像,成带状分布,此信息被相对应光敏像元光电转换成电荷,电荷积分后送入数据采集系统被采集,由微计算机系统完成数据处理并输出到显示器和储存器件。

<sup>①</sup> 联系人,手机:(0) 15653976590;电话:(0539) 2068468;E-mail: xieyinzong@lyu.edu.cn

作者简介:谢印忠(1970—),男,山东省临沭县人,讲师,在读博士,主要从事光电精密测试技术工作。

收稿日期:2011-02-19;接受日期:2011-03-18

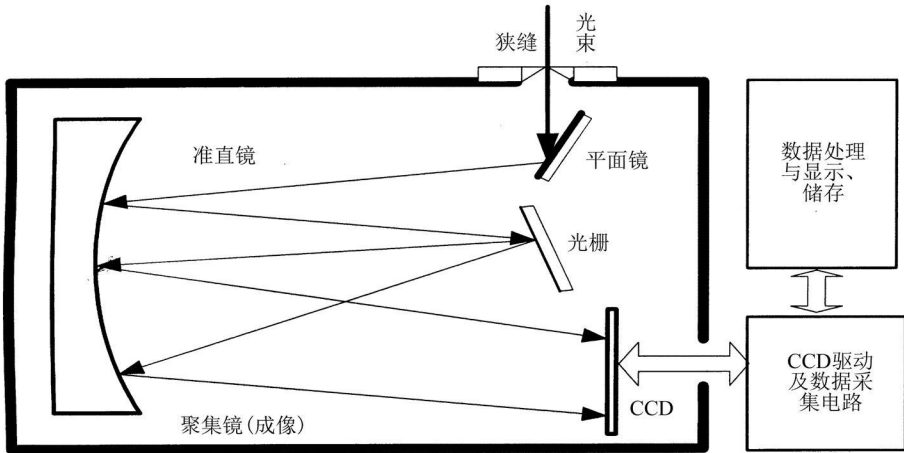


图 1 微型光谱仪的结构示意图

微光学系统设计要求尽量减少光学元件、集成化的特点,采集的数据相对大型光谱仪器具有信号较弱、噪声比例较大等特点。使用实际测量获得的带噪声信号直接绘制光谱图时,会发生大小和形状的改变,使光谱仪器的光谱分辨率和光谱辐射功率测量灵敏度降低,特别是对弱光源进行探测时,噪声对光谱信息影响很大,对探测器响应输出的原始信号进行去除噪声处理显得更加重要,对原始信号的噪声处理是微型光谱仪器系统数据处理的重要组成部分。

### 3 噪声来源分析及采集过程中噪声的处理

CCD 器件中的电注入噪声、光注入噪声、转移噪声、浮置放大器的输出噪声和其他可能产生随机闪烁的部件是产生分形噪声的主要因素<sup>[8]</sup>。

(1) 积分期间电荷注入器件的噪声:

积分期间噪声由光注入噪声和电注入噪声两部分引起<sup>[9]</sup>。

(2) 转移噪声:

电荷在 CCD 中沿势阱做定向转移,一个电荷包在转移过程中损失的电荷将使下一个电荷包的电荷数量增加,同时自身电荷量相应减少。根本原因是转移损失、界面态俘获和体态俘获。

(3) 采集时产生的噪声:

CCD 信号的输出多是采用浮置扩散型电容输出电路完成,浮置电容将 CCD 的信号电荷转换为相应的电压,参考电源滤波不足时,波动引入产生噪声信号。

(4) 暗电流噪声:

即使在完全无光的情况下,CCD 内部热运动也会产生载流子填充势阱,并在驱动脉冲的作用下从输出端输出形成电流,即暗电流。

此外信号传输过程中的环境因素和电磁干扰也会导致随机噪声的产生,具有长程相关性、自相似性及类型频谱特点的非稳定性。

根据微型光谱仪的特点,设计中要求尽量结构简单,减少元器件;单片机性能的大幅提高、FPGA (Field-Programmable Gate Array, 现场可编程逻辑门阵列) 的应用使数据的后期数字处理功能大大增强,所以在硬件设计中可以采取以下针对措施:

(1) 在电路设计中,增加直流电源的滤波,消除来自电源的干扰;缩短驱动电路与 CCD 器件的连线,降低时钟感应造成的尖峰干扰;数字地与模拟地分开,减少来自地线的干扰。

(2) 对于转移噪声,将衬底电压提高使线阵 CCD 电压倒置,可以消除界面态俘获噪声,转移噪

声,降低线阵 CCD 工作温度能使体俘获噪声明显呈指数减小,将线阵 CCD 在序列电荷取出之前放电,也可以有效减小转移噪声。

(3) 如果待测光源稳定(要求秒级),对于随机噪声(如光子注入波动噪声),采取多帧叠加取平均法,可以很好抑制。

(4) 对输出噪声的处理方法是使用截止频率为  $2f$  ( $f$  为线阵 CCD 工作脉冲频率)的低通滤波器。

(5) 暗电流处理,利用线阵 CCD 起始处的哑像元(被遮盖着不产生曝光电荷积分,但仍有暗电流产生),对其输出信号采样存储,并与后续有效像元的输出信号采样值相减以去除暗电流噪声。

## 4 数字域数学方法进行信号处理

通过对线阵 CCD 信号采集电路的低噪声设计,可以得到较为理想的数据组,但是将采集到的数据组按照随线阵 CCD 像元序号作曲线,如图 2 所示为 LED 光谱数据曲线。在光谱功率较弱时噪声引起曲线仍然很粗糙,不平滑,所以在对光谱信号分析前应对原始数据作预处理,使噪声和无用信号的影响控制到最小。

传统的数字信号处理中多用傅里叶变换或者小波变换等进行滤噪处理,利用 Matlab 数值分析库函数完成,对于本文研究的基于单片机和 FPGA 驱动的便携式微型光谱仪却不方便应用,首先函数编程较为复杂,工程量很大,另外对单片机的处理性能也是个挑战。

### 4.1 曲线平滑的基本原理

通常信号利用平滑滤波处理时,处理窗口的大小选择是十分重要的,简单方法是使用 Douglas 提出的 Split-Merge 算法<sup>[10]</sup>,通过计算曲线离散点之间的最大距离来判断对起伏点的保留策略,但这种方法没有多变曲率的分段处理,首先从两个极端情况分析:

- (1) 若平滑窗口宽度设置为整个曲线,同权重平滑结果就是一个该曲线的中点;
- (2) 若平滑窗口选择为一个点,则每个平滑中心点就是其本身,因此平滑的结果就是曲线自身。

在其他情况下,当平滑窗口从整个曲线逐渐减小,得到的平滑结果就会从一个点逐渐扩大,最后和曲线合二为一。本文需要的平滑结果既不是一个点也不是原曲线,而是能够去除噪声并能正确反映原信息的平滑曲线。对噪声水平比较均匀的信号利用固定大小的窗口即可,但如果信号水平不均匀或者信号本身频域内变化较大时,固定窗口的处理会引起信号本身的大量损失或去处噪声效果不理想,设计过程中使用自适应的可变大小窗口。

### 4.2 曲线平滑窗口的确定

如图 3a 所示,为一条带噪声的曲线,假设  $(x_2, y_2)$  为噪声点,  $(x_1, y_1)$ ,  $(x_3, y_3)$  为它的两个邻点,  $(x, y)$  是理想点,对曲线的平滑就是希望  $(x_2, y_2)$  尽可能的接近  $(x, y)$ , 设  $(x', y')$  是平滑后的点。

则  $x$  方向和  $y$  方向的误差分别为:  $\Delta x = x_2 - x$ ,  $\Delta y = y_2 - y$ ; 设  $\nabla = \Delta x + \Delta y$ , 则当  $|\Delta x|, |\Delta y| \rightarrow 0$  时,  $\nabla \rightarrow 0$  时,  $(x_2, y_2)$  将渐进于  $(x, y)$ 。

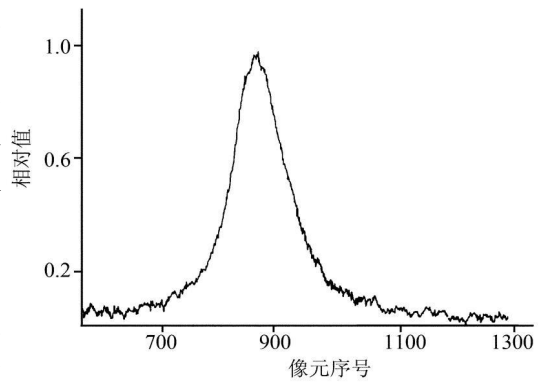


图 2 LED 原始光谱数据曲线

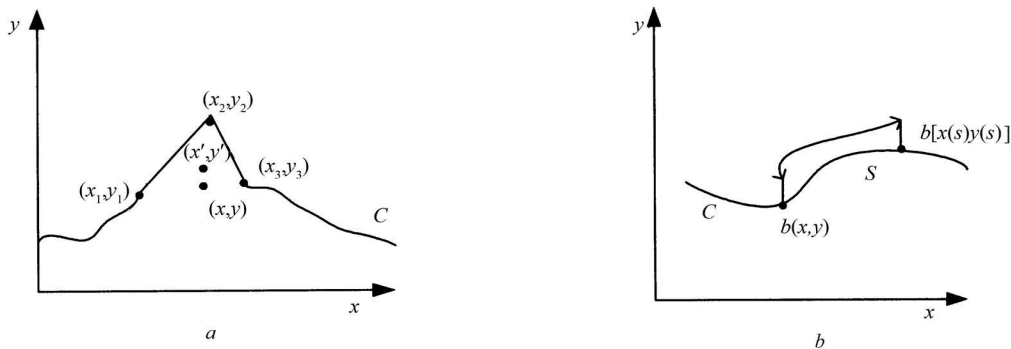


图 3 噪声曲线及弧长  
a——噪声曲线; b——噪声曲线中的弧。

如图 3b 所示, 设曲线中有一段弧  $S$  为  $b(x, y)$  到动点  $b[x(s), y(s)]$  之间的弧长, 则动点  $b[x(s), y(s)]$  既是  $x, y$  的函数, 又是弧长  $S$  的函数, 曲线的参数方程可以表示为:

$$\begin{cases} x = x(s) \\ y = y(s) \end{cases} \quad (1)$$

式 1 得到了曲线  $x$  坐标和  $y$  坐标分别沿弧长方向展开的规律函数。

一条数字化曲线某点方向可以用 Freeman 链码(方向链码)来表示, 如图 4 所示。由于 Freeman 方向链码是以方向为基础的<sup>[11, 12]</sup>, 曲线中的噪声多表现为局部领域内的链码快速变化, 噪声少表现为局部领域内链码的缓慢变化, 因此研究中可以利用统计 Freeman 方向链码的变化来判断局部领域内的噪声程度。

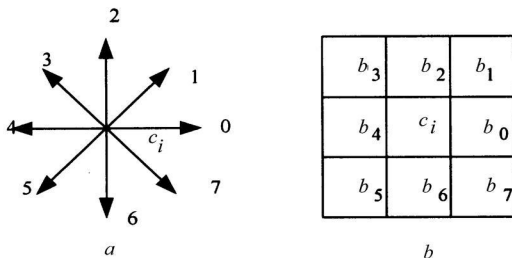


图 4 Freeman 方向链码和 8 个链码对应的邻域  
a——点的 8 个 Freeman 方向链码; b——与 8 个方向链对应的邻域。

设  $b_1, b_2, \dots, b_{n-1}$  是曲线中某一点 Freeman 方向链码,  $b_i = 0, 1, \dots, 7$ ;  $0-7$  表示 8 个方向链码对应的邻域,  $i = 1, 2, \dots, n-1$ 。点距离窗口中心点的方向变化数为:

$$k = \sum_{i=0}^k [(b_{i+k} - b_i) M_8] / k \quad (2)$$

式中:  $M_8$  为做模为 8 的运算(Freeman 方向链码数为 8 个), 除以  $k$  表示点  $k$  对窗口中心点的影响权重为  $1/k$ , 即离中心点距离越远其影响越小。

弧长为  $n$  的一段曲线所有从 0 距离方向的变化数到  $n-1$  距离方向的变化数的总和可以用来表示这段曲线的噪声程度

$$n = \sum_{k=1}^{n-1} C_k = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{i=0}^k [(b_{i+k} - b_i) M_8] / k \quad (3)$$

可以用  $n$  来反映曲线段  $c_1-c_n$  的变化速度,  $n$  越大, 该段曲线的变化率就越大, 因此找到了一种用 Freeman 方向链码来度量曲线段噪声大小的简单方法, 平滑窗口的大小也可以取决于  $n$  的大

小,  $n$  越大则窗口越大,  $n$  越小窗口相应越小。研究中用下式决定:

$$M = [(n/l) * l] \quad (4)$$

式中:  $M$  —— 窗口宽度,  $l$  —— 整条曲线长度。

#### 4.3 曲线平滑及效果

将曲线沿弧长展开和确定了平滑窗口宽度以后, 便可以根据需要选择信号处理中常用的平滑方法, 对微型光谱仪的研究中使用了平均值滤波:

$$\begin{cases} x_k = \left[ \sum_{i=k-M/2}^{k+M/2} x_i \right] / M \\ y_k = \left[ \sum_{i=k-M/2}^{k+M/2} y_i \right] / M \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $k=1, 2, \dots, M$ ,  $M$  —— 窗口宽度。

将图 5 所示光谱曲线数据分别应用 Split 为 5、40 完成以固定窗口平滑(分别对应图 5a、b), 同时应用傅里叶低通滤波器去除高频噪声, 对应图 5c, 通过编程应用本文算法对完成平滑如图 5d。

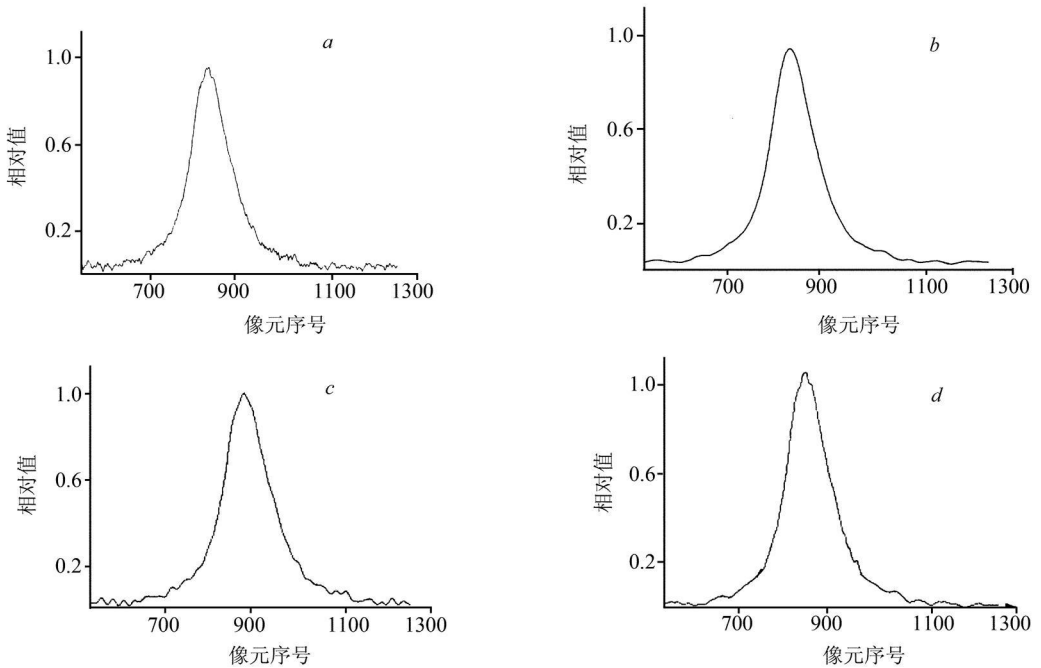


图 5 不同处理方式得到的去噪波形

a —— Split 为 5 的固定窗口平滑曲线; b —— Split 为 40 的固定窗口平滑曲线;  
c —— Fourier 滤波去噪平滑曲线; d —— 利用动态窗口去噪的平滑曲线。

从图 5 可以看出, Split 算法在阈值较大时, 平滑曲线与原信号曲线相比较有明显变形, 说明对信号损失较大, 当阈值较小时, 与信号曲线相比较变形较小, 但去噪效果不明显。利用软件中傅里叶变换低频数字滤波器去掉高频信号的效果不错, 本文所提出的在噪声大的部分取大窗口, 噪声小的地方取小窗口的曲线平滑去噪从图中可以看出, 噪声大的地方, 平滑效果很好, 噪声小的地方信号损失较小, 能达到设计的去噪平滑要求。

## 5 结论

对所研制的便携式微型光谱仪信号噪声进行分析的基础上,针对其特点从硬件到软件对作为探测器的线阵 CCD 输出信号噪声进行了处理,并通过将 Freeman 方向链码的深入研究,应用到噪声大小判断,给出离散数据曲线平滑窗口大小的公式,软件系统的算法和模型工具的通用性、择优性有较大选择,使在数字域对信号处理更具有灵活性和实时性,简化了编程的复杂程度,对便携式仪器仪表的研究有较强的指导意义。

## 参考文献

- [1] 郝允祥,陈遐举,张保洲.光度学[M].北京:中国计量出版社,2010.
- [2] Wapelhorst E, Hauschild J P, Muller J. Complex MEMS: a Fully Integrated TOF Micro Mass Spectrometer[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2007, **138**(1): 22—27.
- [3] Kong S H, Wolfenbuttel R F. Spectral Performance of a Micro Machined Infrared Spectrum Analyzer in Silicon[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2005, **54**(1): 264—267.
- [4] Day D R, Butler M A, Smith M C *et al.* Diffractive-MEMS Implementation of a Hadamard Near-Infrared Spectrometer[J]. *Actuators and Microsystems*, 2005, **13**(2): 1246—1249.
- [5] 赵淑莉,廖宁放,谭博能.微型测色分光光谱仪的总体设计及数据采集系统研究[J]. *光学技术*, 2010, **36**(6): 848—851.
- [6] 胡渝,荣建. CCD 的发展现状及展望[J]. *仪器仪表学报*, 2005, **26**(8): 718—720.
- [7] 马天波,郭永飞,李云飞.科学级 TDICCD 相机的行频精度[J]. *光学精密工程*, 2010, **18**(9): 2028—2035.
- [8] Opkinson G, Lumb D. Noise Reduction Techniques for CCD Image Sensors[J]. *Phys. E: Sci. Instrum.*, 1999, **15**(2): 25—30.
- [9] 范德惹尔 A. 固体器件及电路中的噪声[M]. 彭毅译. 成都:成都电讯工程学院出版社,1988.
- [10] Merigot A. Revisiting Image Pitting[A]. *Proceedings of IEEE International Conference on Computer Vision*[C]. Columbia, Canada: IEEE Computer Society, 2001. 517—524.
- [11] Liu M Y, Pi Y G. The Mapping Knowledge of Basic Element in the Chinese Character Intelligent Formation[A]. Kang L S, Cai Z H, Yan X S *et al.* *The Third International Symposium on Intelligence Computation and Applications*[C]. Wuhan, China: Theoretical Computer Science and General Issues, 2008.
- [12] 汪剑,皮佑国,刘明友.基于 Freeman 链码的汉字图像轮廓曲线拐角点检测方法[J]. *自动化技术与应用*, 2009, **28**(1): 88—92.

## Signal Processing Research of Noisy Data in Micro Spectrometer

XIE Yin-Zhong

(School of Informatics, Linyi University, Linyi, Shandong 276005, P. R. China)

**Abstract** The original signal noise treatment is an important part of data processing in miniature spectral instrument. In order to improve the performance of the portable spectrometer at low light levels, and the linear CCD detectors were analyzed based on all kinds of noise sources, and pointed out the application limitations that relied on hardware circuit for removing noise in the micro instrument equipment. Although noise level of a discrete data curve base on characteristics from analytic geometry or Fourier transform were judged, but the operations are too complex to make program with single chip computer. Based on the analysis of the Freeman chain direction code, a Freeman direction chain code for a curve of judgment was proposed, quantization noise level as smooth window after size selection basis. In dealing with linear CCD output signal, the new method and fixed window curve smooth or FFT digital filters were compared, and feasibility was proved. The application of Freeman chain code simplified the use of digital filter programming of big modules, and reduced the programming difficulty in single chip computer, and also made the signal noise treatment only in the mathematical operation stage, no longer imported other circuit noise, thus reached better noise restraining purpose than previous increasing electronic components in signal processing.

**Key words** Spectroscopy; Signal Processing; CCD; Freeman Chain Code