

基于 LabVIEW 空间瞬态光信号处理技术

张 颖^{1,2} 汶德胜¹ 韩亚蒙^{1,2} 李 涛^{1,2} 郭 瑞^{1,2}

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710068)

(2 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘 要 分析了待探测的瞬态光信号、背景光信号和低频干扰信号频率的特性, 利用 LabVIEW 软件平台设计虚拟仪器, 进行信号处理和分析. 设计了数字滤波器, 对采集到的信号进行数字滤波, 对滤波后的目标信号进行谱估计, 得到功率谱密度. 试验结果表明, 该方法设计简单, 运行可靠, 滤波效果显著.

关键词 虚拟仪器; 瞬态光信号; 数字滤波器; 谱估计

中图分类号 TP311.1 **文献标识码** A

0 引言

空间瞬态光信号主要包括雷电信号, 超级闪电信号, 各种空间辐射, 宇宙射线, 核爆炸等. 美国防御气象卫星计划 (DMSP: Defense Meteorological Satellite Program)、全球定位系统 (GPS: Global Positioning System) 和瞬变事件快速在轨记录 (FORTE: Fast On-Orbit Recording of Transient Event) 等系统卫星上更是装载了各种光学成像传感器 (光学瞬变探测器和闪电成像传感器) 在低地球轨道上运行, 直接用于探测各种空间瞬态光辐射信号^[1,2]. 而国内空间瞬态光信号探测技术尚未成熟, 所要探测的空间瞬态光信号数据资料缺乏, 所以开展对空间瞬态光探测器的研制, 将会对国家安全防御, 气象预报等提供强有力的技术保障.

虚拟仪器是计算机技术和测试技术相结合的产物, 实际上是利用计算机的显示功能来模拟传统仪器的控制面板, 以多种形式输出检测结果, 利用计算机强大的软件功能实现信号分析与处理, 利用标准 I/O 接口设备完成信号采集. 而 LabVIEW 是 NI 公司 (National Instrument Company) 推出的一种虚拟仪器软件开发工具, 是一种基于数据流图的图形化编程语言, 提供了丰富的信号分析处理和数学运算相关程序, 可以快速、准确分析所采集到的目标信号的时域, 频域特性^[3]. 尤其是在试验调试过程中, LabVIEW 功能强大、编程灵活, 操作简单, 极大的提高了试验的速度和准确性^[3,4].

空间瞬态光信号探测系统根据采集的目标信号数据, 绘制出时域波形, 研究目标信号的能量大小, 频谱分布等各种特征参量^[5,6]. 在进行地面试验时, 基于 LabVIEW 6.1 软件平台设计虚拟仪器, 来完成

对空间瞬态光信号的采集和处理, 从处理结果分析瞬态光信号的能量分布.

1 系统组成和设计原理

1.1 基于 LabVIEW 的系统组成

设计思想: 在试验阶段, 利用 LabVIEW 提供的丰富的信号处理子程序、图形显示子程序完成目标信号的处理和分析. 在 LabVIEW 平台下利用 RS232 串口把采集到的原始数据传送到 PC 机, 原始数据经过转换及运算得到信号的时域波形, 此波形表征瞬态光信号强度大小. 采集到的原始数据包含有背景信号和各种高频干扰信号, 所要探测的目标信号可能淹没在这些噪音中, 通过设计数字滤波器, 滤除各种噪音, 提取出探测的目标信号波形. 通过分析滤波前后波形的功率谱, 可以分析信号光能量在频谱上的分布系统组成.

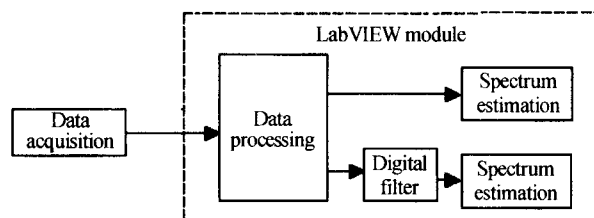


图 1 LabVIEW 系统结构

Fig. 1 The structure framework of the LabVIEW System

1.2 数字滤波器的设计

1.2.1 目标信号频谱特性分析

所要探测的空间瞬态光信号是一个变化速度快、动态范围大、持续时间短的信号. 根据经验数据, 对于小能量的瞬态光信号, 变化速度很快, 高频分量较多, 其最高频率可达到 300 Hz; 对于大能量的信号能量主要分布在低频部分, 最低频率可达到 10 Hz. 所以用小能量信号的最高频率来确定瞬态光信号的频率上限, 使用大能量信号低频来确定频率下限.

1.2.2 背景信号和干扰信号特性分析

在空间瞬态光信号探测系统中,地表反射的太阳光辐射是目标信号探测的主要背景. 尤其是在强太阳光背景下,目标信号可能淹没在背景光信号中. 目标信号变化速度快,持续时间短,在较短的时间内(几秒钟内),太阳光可近似地看作直流信号.

空间背景下目标信号检测最主要的干扰信号是闪电信号,闪电信号主峰频率多数情况下大于 950 Hz,相比于要探测的光信号,闪电信号持续时间很短,属于频繁发生的高频干扰.

由以上分析,在设计滤波器时,为了给测量留有一定的余量所以采用通带为 7~320 Hz 的带通滤波器. 基本上可以滤除近似直流的太阳光背景和大部分的高频闪电光信号.

1.2.3 LabVIEW 滤波器设计

数字滤波器包含有限冲击响应滤波器(finite impulse response, FIR)和无限冲击响应滤波器(infinite impulse response, IIR). IIR 滤波器的设计源于传统的模拟滤波器设计,先把所要设计的数字滤波器的参量指标转化成与之相应可作为“样本”的模拟滤波器的性能参量,根据此要求设计出模拟低通滤波器,然后用两种方法转化成各类型的数字滤波器. 一种是模拟低通滤波器经模拟频带变换成所需要类型(如带通,高通,带阻)的模拟滤波器,然后数字化成所需类型的数字滤波器. 另一种方法,首先将模拟低通滤波器数字化成数字低通滤波器,然后利用数字频带变换法,将他转化成所需要的各类(如带通,高通,带阻)的数字滤波器^[4]. 这两种方法,过程复杂,计算量大. 而在 LabVIEW 环境下设计 IIR 滤波器时,只需输入相应的数字滤波器参量指标(如截止频率,滤波器类型,阶数等)就可以了,所有的计算和转换工作在模块内部自动完成^[3]. 在试验调试时还可以方便地修改输入参量,从而得到最好的滤波效果.

Butterworth 滤波器是一种常用的 IIR 滤波器,它拥有最平滑的频率响应,在通带中是理想的单位响应,在截止频率以外频率响应单调下降,在截止频率处有 3dB 衰减. 过渡带的陡峭程度正比于滤波器的阶数^[4].

空间瞬态光信号对相位变化不敏感,不要求有线性相位响应,所以选择 IIR 数字滤波器. 但是信号幅度是表征光信号能量大小的重要参量,所以要求滤波器幅度特性要好. 由于 Butterworth 滤波器通带内是理想的单位响应,所以选择 Butterworth 滤波器比较合适. 由于空间瞬态光信号需要窄的过渡带,所以采用高阶 Butterworth 带通滤波器.

在 LabVIEW 程序设计中采用以 Butterworth 为模拟原型的 IIR 滤波器的参量指标为:滤波器类型:带通滤波器;滤波器阶数:8;低截止频率(f_L): 7 Hz;高截止频率(f_H): 320 Hz. 图 2(a)为上述参量设置下的滤波器幅频响应图,其在 6 Hz 处的衰减 12 dB,340 Hz 处衰减 13 dB;图 2(b)为 LabVIEW 程序设计流程图.

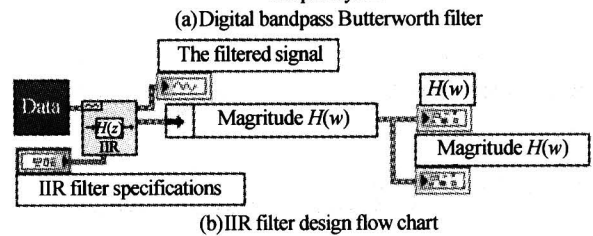
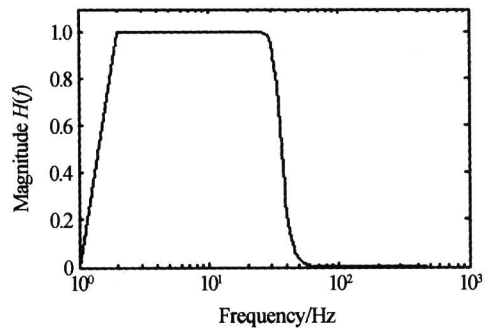


图 2 IIR 滤波器设计
Fig. 2 IIR filter design

1.3 频谱分析

1.3.1 频谱估计基本原理

一个信号可以从时域描述,也可以从频域来描述,这两种描述是相互唯一对应的. 频谱是指信号的某些特征随频率的分布,如幅度谱,相位谱,功率谱. 频谱分析是把各种动态信号通过傅里叶(Fourier)变换,在频域上进行分析. 在实际应用中,由于只能获得测量信号的有限个观察序列,因此只能用所得到的有限长序列来估计信号的功率谱,这就产生了谱估计. 直接法谱估计又称周期图法^[5].

用一个样本序列的有限个数据 $x(0), x(1), \dots, x(N-1)$ 来估计自相关函数和功率谱密度^[5]

$$\hat{\phi}_{xx} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n)x(n+m) = \frac{1}{N} \sum_{n=-\infty}^{\infty} x_N(n)x_N(n+m) \tag{1}$$

$$\hat{P}_{xx}(\omega) = \sum_m \hat{\phi}_{xx}(m) e^{-j\omega m} \tag{2}$$

这里

$$x_N = R_N(n)x(n) \tag{3}$$

$$x_N(n+m) = R_N(n+m)x(n+m)$$

式中 R_N 为矩形函数

$$R_N = \begin{cases} 1 & 0 \leq n \leq N \\ 0 & n < 0 \text{ 且 } n \geq N \end{cases} \tag{4}$$

或写为

$$\hat{P}_{xx}(\omega) = \frac{1}{N} \left| \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j\omega n} \right|^2 = \frac{1}{N} |X_N(\omega)|^2 \quad (5)$$

这里 $X_N(\omega)$ 是有限长序列 $x_N(n=0, 1, \dots, N-1)$ 的傅里叶变换, 在 LabVIEW 中可以通过 FFT 求出. 使用窗口处理法对周期图进行平滑可以得到一致的谱估计. 需要注意的是 LabVIEW 中使用的功率谱计算公式为^[3]

$$\hat{P}_{xx}(\omega) = \frac{1}{N^2} |X_N(\omega)|^2 \quad (6)$$

1.3.2 瞬态光信号频谱分析

瞬态光信号属于随机信号, 对于一个随机信号来讲, 它本身的傅氏变换是不存在的, 可用功率谱密度来表征它的统计平均特性. 从功率谱密度可以分析瞬态光信号能量在频率上的分布状况. 程序中使用 Power Spectrum. vi 计算信号的功率谱. 该子 VI 位于 Function/Analyze/Signal Processing/Frequency Domain 模块中, 其计算的是双边功率谱, 应用中转换成单边功率谱.

2 试验数据和结果分析

在试验阶段, 根据目标信号特性和噪音特性仿真了 1 s 的信号波形, 该模拟波形中加入高频白噪音, 噪音幅度 100; 加入了接近直流的背景信号, 幅度 100, 所要探测的瞬态光信号淹没在背景和低频干扰中, 如图 3(a). LabVIEW 串口子 VI 通过 RS-232 把信号数据采集过来. Butterworth 带通滤波器参量设置: 低截止频率 f_L 为 7 Hz, 高截止频率 f_H 为 320 Hz, 阶数 8, 采样频率 10 kHz. 图 3(b) 为经过带通滤波器后的信号时域波形, 已经把高频干扰和背景滤除掉. 可以看出该信号的变化趋势, 第一个脉冲峰值大, 变化速度很快, 相对频率高; 第二个小脉冲变化缓慢, 幅度小, 相对频率低; 两波峰间有一个波谷, 此时光强度最小. 由于第一个脉冲持续时间只有几个 ms, 而第二个脉冲持续时间是几十个 ms, 为了突出两个脉冲, 图中信号时域波形的时间轴以 log 模式显示.

在 LabVIEW 设计中分别对含有背景和低频干扰的原始信号和滤波后的目标信号进行频谱分析, 输出为单边功率谱, 然后加 Hamming 窗平滑处理, 加窗是为了满足谱估计的一致性. 图 4(a) 为原始信号的功率谱, 从中可以发现其能量主要集中在直流成分附近, 幅度 2550. 图 4(b) 为滤波后信号功率谱, 经滤波后信号能量主要集中在低频部分, 在 10 Hz 处幅度最大 2.8, 其后在 20 Hz 处幅度 1.3, 频率越高幅度越小, 在 300 Hz 以后几乎为 0. 也可以在求功率

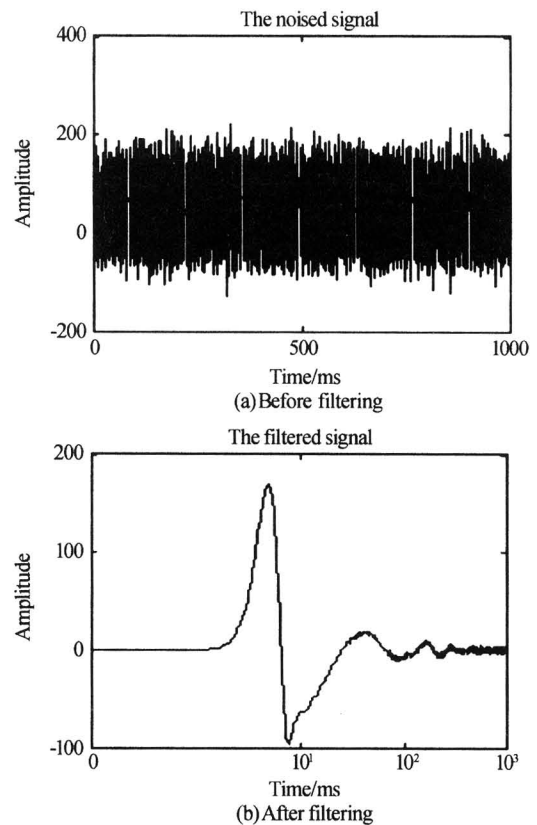


图 3 滤波前后信号

Fig. 3 The signal and the power spectrum before and after filtering

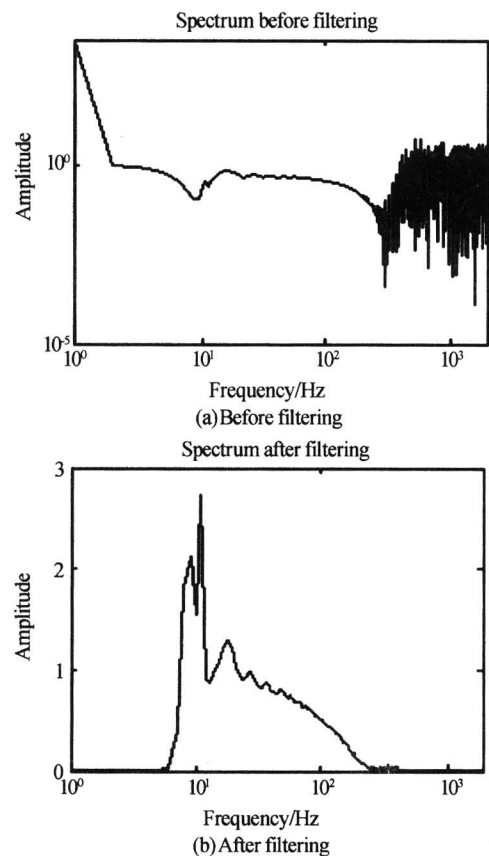


图 4 滤波前后信号的功率谱

Fig. 4 The power spectrum before and after filtering

谱之前对信号进行归一化处理,以 dB 模式显示.

3 结论

针对空间瞬态光信号特性,在 LabVIEW 环境下设计了相应的数字滤波器,滤除了高频干扰和背景干扰,并计算滤波后信号的功率谱密度. 尤其是在试验调试过程中,可以针对不同当量的信号,对滤波器参量和谱估计参量进行调整,得到最佳效果,对于时域信号波形可以设置移动光标来读取其幅值和发生时刻. 试验结果表明,基于 LabVIEW 的虚拟仪器编程简单,直观,高效,同时降低了系统的开发成本和开发周期. 虚拟仪器技术作为测试技术和仪器产业发展的一个重要方向,有着极大的发展空间和发展潜力,已引起了越来越多的重视.

参考文献

- Christian H J, Blakeslee R J, Goodrnan S J, 等. 地球静止轨道闪电探测. 气象科技, 2001, **29**(1): 42~48
Christian H J, Blakeslee R J, Goodrnan S J, *et al.* *Meteorological Science and Technology*, 2001, **29**(1): 42~48
- 刘代志,王仁明,慕晓冬. 天基核爆信号识别处理系统技术方案研究. 核电子学与探测技术, 2003, **23**(4): 292~295
Liu D Z, Wang R M, Mu X D. *Nuclear Electronics & Detection Technology*, 2003, **23**(4): 292~295
- 杨乐平,李海涛,赵勇,等. LabVIEW 高级程序设计. 北京:清华大学出版社, 2003. 286~359
Yang L P, Li H T, Zhao Y, *et al.* *LabVIEW Advanced Programming Design*. Beijing: Tsinghua University Press, 2003. 286~359
- 李鹏宇,刘松秋,雷武虎,等. 虚拟技术在核谱仿真与处理系统中的应用. 核电子学与探测技术, 2004, **24**(5): 514~517
Li P Y, Liu S Q, Lei W H, *et al.* *Nuclear Electronics & Detection Technology*, 2004, **24**(5): 514~517
- 吴兆熊. 数字信号处理. 西安:西安交通大学出版社, 2002. 78~104
Wu Z X. *Digital Signal Processing*. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2002. 78~104
- 程佩青. 数字信号处理教程. 北京:清华大学出版社, 1995. 121~183
Cheng P Q. *Digital Signal Processing Tutorial*. Beijing: Tsinghua University Press, 1995. 121~183
- 袁慧晶,王涌天. 一种抗干扰的弱小目标检测方法. 光子学报, 2004, **33**(5): 609~612
Yuan H J, Wang Y T. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(5): 609~612
- 达选福,张伯珩,边川平. 高速 CCD 图像数据存储技术. 光子学报, 2003, **32**(11): 1393~1395
Da X F, Zhang B H, Bian C P. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(11): 1393~1395
- 王华,汶德胜,李相国,等. 无压缩多路数字视频光纤传输系统的研制. 光子学报, 2005, **34**(1): 150~153
Wang H, Wen D S, Li X G, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(1): 150~153

The Signal Processing Design of the Spacial Transient Optical Signal Based on LabVIEW

Zhang Ying^{1,2}, Wen Desheng¹, Han Yameng^{1,2}, Li Tao^{1,2}, Guo Rui^{1,2}

¹ Xian Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xian 710068

² Graduate school of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039

Received date: 2005-03-07

Abstract The frequency features of the optical transient signal, the background signal and high frequency noise are analyzed, and the virtual instruments of signal processing are given based on LabVIEW. The design of the digital filter is introduced and the original signal is filtered, and then the spectrum estimation of the filtered signal gives the power spectrum density. The test result shows that the new method is simple, reliability and effective.

Keywords Virtual Instrument; Optical Transient Signal; Digital Filter; Spectrum Estimation



Zhang Ying was born in 1979. She is studying for her M. S. degree in Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS, and majors in Communication and Information System. Her research jobs include digital image processing etc.