

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2012.12.022

散射测量中的相关检测算法

高爱华, 沈雁华, 张伟

(西安工业大学光电微系统研究所, 西安 710032)

摘要: 为了提高系统的集成度, 降低测量成本, 用 LabVIEW 软件代替测量系统中的硬件锁相放大器, 进而实现超光滑光学表面光散射参数的高性价比的准确测量。设计一种用于检测微弱散射光信号的测量系统, 该测量系统由光路、光电探测、数据采集与控制、相关检测算法软件等部分组成。在分析测量系统原理的基础上, 研究基于 LabVIEW 软件平台的锁相算法, 提出在微弱光电信号检测中利用软件实现锁相检测的技术, 并对其进行仿真实验分析。结果表明: 当被测信号频率为 0.2 kHz, 幅值为 1.0 V, 噪声幅值为 0.5 V 时, 测量误差为 0.1%; 证明该方法可有效实现对被调制微弱光电信号的检测。

关键词: 微弱散射光信号; 锁相放大器; 调制频率; 虚拟仪器; 相关检测

中图分类号: TP306 **文献标志码:** A

Related Detection Algorithm in Scattering Measurement

Gao Aihua, Shen Yanhua, Zhang Wei

(Research Institute of Micro-Optoelectronic System, Xi'an Technological University, Xi'an 710032, China)

Abstract: In order to improve the integrated level of system and reduce the cost of measure, a high cost-effective and accurate measurement for the light scattering parameters of the super smooth optical surface is realized by using LabVIEW software to replace the hardware lock-in amplifier of measuring system. A photoelectric check system used for measuring light scattering are designed, the system is made up of light path, photoelectric detector, data acquisition and control system, the software for correlation detection algorithm etc. On that basis, the phase lock algorithm based on LabVIEW software platform is studied mainly in this paper. The technique for phase locked detection realized by software in the weak photoelectric signal detection is raised, and the technique is simulated. When measured signal frequency is 0.2 kHz, amplitude is 1.0 V and the noise amplitude is 0.5 V, the measurement error is 0.1%. The simulation result shows that the detection for the modulated weak photoelectric signal can be realized effectively by this method.

Key words: weak scattering light signals; lock-in amplifier; modulating frequency; virtual instrument; correlation detection

0 引言

随着光学技术的飞速发展及其应用领域的不断扩大, 超光滑光学表面引起的光散射越来越受到人们的关注, 已经成为研究光学元件散射特性的基础和关键问题之一。例如, 具有高反射性质的棱镜既可以用在激光陀螺中, 又可以用于空间光学领域如天文卫星、M 光望远镜等。然而, 光散射率作为一种低损耗参数, 其信号非常微弱甚至比噪声小几个数量级, 或者说信噪比远远小于 $1^{[1-2]}$, 这使得传统检测方法的测量精度远远达不到要求, 因此研究强噪声背景下的微弱光信号检测方法就十分有意义。锁相放大器 (lock-in Amplifier, LIA) 作为众多微弱信号检测技术中最有效的检测工具, 广泛应用于科研及工程中。基于数字相关检测的锁相放大器, 其微弱信号检测理论成熟、效果好, 得到了广泛的应用^[3]。但是硬件锁相放大器是精密仪器, 体积较大,

价格昂贵, 而且不便于扩展使用; 因此, 笔者利用 LabVIEW 软件代替测量系统中的硬件锁相放大器进行相关检测, 进而实现低损耗参数的高性价比的精密测量。

1 测量系统原理

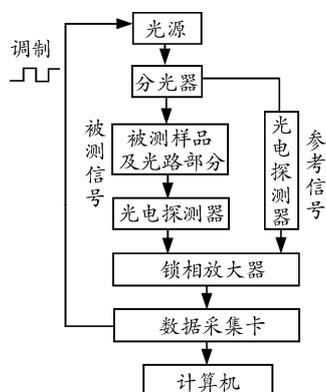
根据相关检测原理, 传统的测量系统结构如图 1(a)所示, 由锁相放大器进行相关检测处理, 提取出微弱散射光信号, 再由采集卡采集到计算机里。最后通过 LabVIEW 软件对采集到的信号进行分析与处理, 并保存测量结果。笔者设计的微弱散射光信号测量系统如图 1(b)所示, 光源经调制形成具有一定周期的交流光信号, 再经分光器形成两路微弱光信号: 其中一路信号为被测信号, 该信号经过光路系统入射到样品上, 携带有被测样品信息的散射光信号由光电探测器接收进而转换成电压信号送入同步数据采集卡; 另一路信号从分光器出来后, 直

收稿日期: 2012-07-19; 修回日期: 2012-08-21

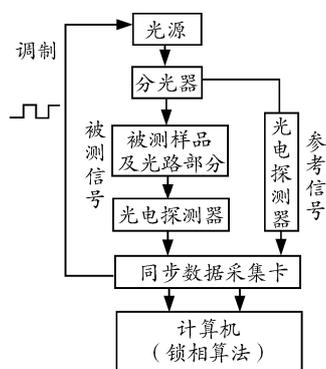
基金项目: 陕西省教育厅科研计划项目资助(11JS040)

作者简介: 高爱华(1967—), 女, 湖北人, 工学硕士, 教授, 从事光电测试技术、信号处理研究。

接被光电探测器接收, 将其作为参考信号同样送入同步数据采集卡, 最后同步数据采集卡将两路信号送入计算机由 LabVIEW 软件对其进行相关检测, 提取所需信号。



(a) 传统的测量系统框图



(b) 文中设计的微弱散射光信号测量系统框图

图 1 测量系统原理

由图 1(a)中可以看出, 相关检测是由硬件锁相放大器实现的, 数据采集卡采集锁相放大器输出的信号, 再将其送入计算机进行后续数据处理; 图 1(b)是笔者要实现的系统框图, 从图中可以看出, 设计时直接将锁放集成在计算机中, 通过同步数据采集卡将采集到的两路信号直接送入计算机进行相关运算及数据处理。通过比较可以发现, 用软件实现锁相算法, 不仅节约了成本, 还提高了系统的集成度。

2 锁相算法设计与实现

2.1 锁相算法原理

锁相放大器是一种利用相关检测技术对交流信号进行相敏检波的仪器, 它利用和被测信号有相同频率的参考信号作为比较基准, 只对被测信号本身和那些与参考信号同频的噪声分量有响应, 而那些与参考信号同频的噪声分量终归只占白噪声的极小部分, 因此能大幅度抑制无用噪声^[4-5]。图 2 为锁相

放大器原理图, 它利用 2 个相关器, 对参考信号进行移相, 形成双通道相关检测, 从而去除噪声信号。

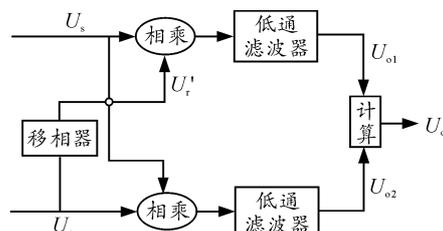


图 2 锁相放大原理

以软件为核心的锁相算法介绍如下:

设被测信号为 U_s , 噪声信号为 $n(t)$, 参考信号分别为 U_r 和 U_r' , 其中 U_r' 是经过移相器的参考信号。在图 2 中:

$$U_s = A \sin(\omega t + \alpha) + n(t) \quad (1)$$

$$U_r = B \sin(\omega t + \beta) \quad (2)$$

$$U_r' = B \sin(\omega t + \beta + \frac{\pi}{2}) \quad (3)$$

则:

$$\begin{aligned} U_{o1} &= U_s U_r' = \\ &[A \sin(\omega t + \alpha) + n(t)]B \sin(\omega t + \beta) = \\ &\frac{1}{2} AB \cos(\alpha - \beta) - \frac{1}{2} AB \cos(2\omega t + \alpha + \beta) + \\ &n(t)B \sin(\omega t + \beta) \end{aligned} \quad (4)$$

式 (4) 中: 第一项为直流成分, 其大小与两信号幅值及相位差的余弦成正比; 第二项为被测信号的 2 倍频信号; 第三项为噪声与参考信号相乘, 其结果几乎都是交流信号。再经过一个通带很窄的低通滤波器, 被测信号的 2 倍频信号和噪声与参考信号相乘的结果都被滤掉, 最后输出结果为一直流信号, 即:

$$U_{o1} = \frac{1}{2} AB \cos(\alpha - \beta) \quad (5)$$

同理:

$$U_{o2} = \frac{1}{2} AB \sin(\alpha - \beta) \quad (6)$$

于是, 最后的输出结果为

$$\begin{aligned} U_o &= \sqrt{U_{o1}^2 + U_{o2}^2} = \\ &\sqrt{\left[\frac{1}{2} AB \cos(\alpha - \beta)\right]^2 + \left[\frac{1}{2} AB \sin(\alpha - \beta)\right]^2} = \frac{1}{2} AB \quad (7) \end{aligned}$$

从式 (7) 可以看出, 最终输出的结果 U_o 不受相位的影响, 只要得到参考信号的振幅 B , 就可以直接计算出被测信号的幅值 A ^[6-7]。式 (7) 是锁相放大器的算法原理, 笔者的设计基于图 1(b)的通用硬

件环境，利用计算机强大的运算功能实现以软件为核心的锁相算法，从而实现从噪声背景中提取微弱信号的目的。

2.2 锁相算法的仿真实现

LabVIEW 作为当前最为流行的虚拟仪器开发平台，功能强大、应用广泛；因此，本系统采用它进行设计。基于 LabVIEW 的锁相放大器软件程序流程图如图 3 所示，该软件包含产生仿真数据、波形整形等多个虚拟仪器子程序功能模块(子 VI)。

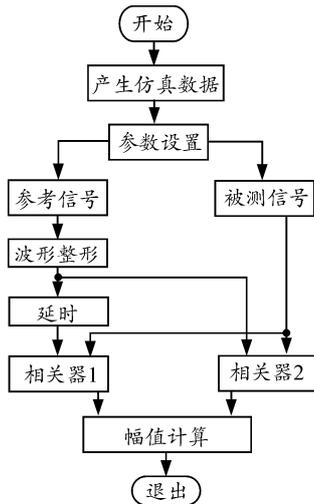


图 3 基于 LabVIEW 的锁相算法程序流程

开始测量时，产生仿真数据模块产生参考信号和被测信号，被测信号分别与参考信号及其相位延时 90°后的参考信号进行相关运算，再经幅值运算得出所需要的值，然后退出，完成一次测量。

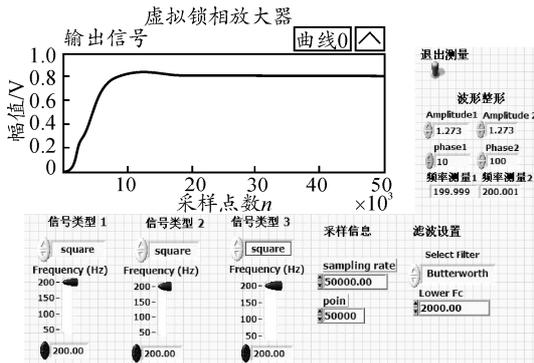


图 4 虚拟锁相放大器前面板

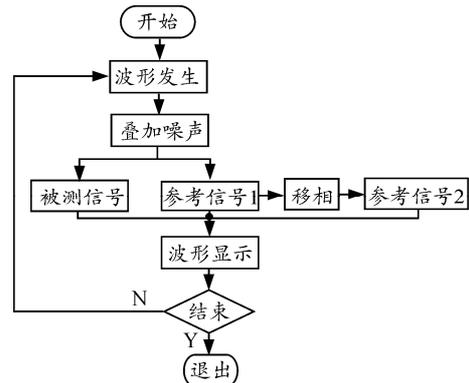
通过对各子功能模块的调用，实现虚拟锁相放大器前面板的设计，其前面板如图 4 所示。测量时，通过对前面板上的各控制按钮进行操作，完成测试参数的设置，如波形整形参数的设置，设参考方波信号的幅值为 1 V，则经过傅里叶展开后，取其基频，得到的参考信号为标准正弦波，其幅值为 1.273 V；信号测试频率的设置，可以选择 0.2 kHz、0.4 kHz

等 1 kHz 以内的频率进行测试；滤波器参数设置，采用巴特沃斯滤波器，其中低截止频率的大小与信号频率相关。通过对以上参数的设置，获得理想的测试效果。

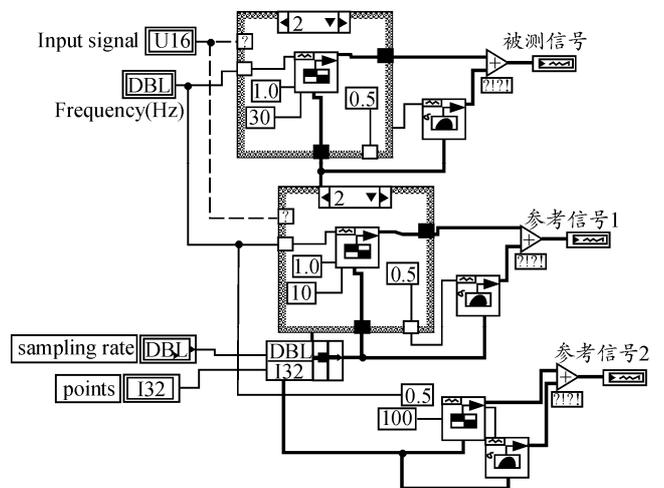
在实际测量中，同步数据采集卡的采样频率一般是信号频率的 10 倍以上，才能得到不失真的波形，且采样频率的大小与采样点数有关。

2.2.1 产生仿真数据模块

根据仿真实验要求，该仿真模块需要产生一路被测信号和两路与之同频的参考信号，且两路参考信号相位差为 90°。图 5(a)为产生仿真数据的程序流程图。开始测量时，为了使其更加接近实际测量的信号，给仿真信号叠加一个噪声，分别得到被测信号、参考信号 1 和参考信号 2，然后显示其波形，结束测量。图 5(b)是产生仿真数据程序图，该程序通过应用一个条件结构，实现了方波、正弦波等不同波形的产生，再对其进行参数设置就可以得到仿真所需要的不同频率、幅值和相位的波形。



(a) 产生仿真数据的程序流程



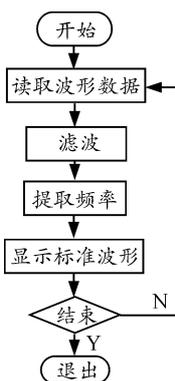
(b) 产生仿真数据程序

图 5 仿真数据产生程序

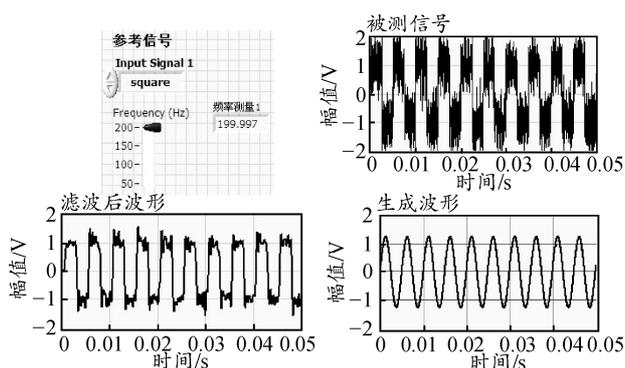
2.2.2 波形整形模块

由于参考信号是从分光器出来, 是被光电探测器转换成电信号后才被采集卡采集的, 所以此时的参考信号并不是一个标准的波形, 而是带有一定噪声的信号。因此需要对参考信号进行处理, 通过波形整形子模块就可以滤除噪声, 得到一个标准的波形。波形整形的程序流程图如图 6(a)所示。开始测量时, 读取含有噪声的方波波形数据, 然后对其进行滤波, 由于噪声包含有很多频率的分量, 所以滤波后的信号仍然含有一定的噪声; 因此, 要对滤波后的信号进行频率提取, 使生成一个同频的标准正弦波。

图 6(b)为波形整形前面板。笔者以方波为例进行了仿真, 设方波的振幅为 1 V, 频率为 200 Hz, 同时给它叠加一个振幅为 0.5 V 的高斯白噪声, 经过波形整形的处理, 得到一个标准的正弦波, 该程序可以处理 1 kHz 以内的信号。



(a) 波形整形的程序流程



(b) 波形整形前面板

图 6 波形整形程序框图及前面板

值得注意的是: 由于方波信号是由一系列的正弦波叠加而成, 包含有多次谐波, 对测量造成影响。例如, 峰峰值为 2 V 的方波的傅里叶展开为:

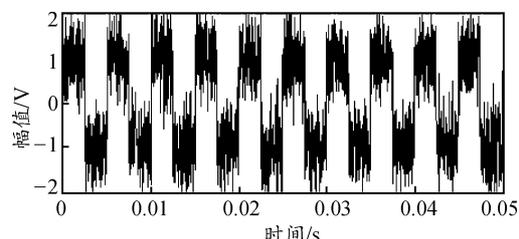
$$f(t) = \frac{4}{\pi} \left[\sin(\omega t) + \frac{1}{3} \sin(3\omega t) + \frac{1}{5} \sin(5\omega t) + \dots \right] \quad (8)$$

在用方波进行相关检测时, 要将方波展开成傅里叶级数进行计算, 由于高次谐波所占的频率分量很小, 在实际测量中可以忽略不计; 所以, 在用 LabVIEW 软件实现正交相关检测时, 为了减小测量误差, 只取其基波(即正弦波)进行计算。

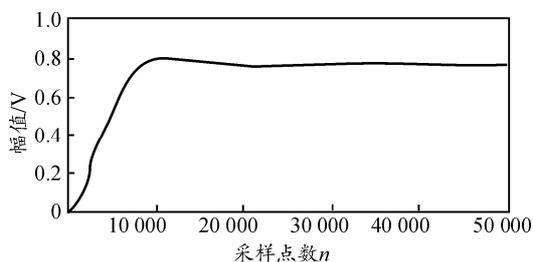
3 仿真实验及结果分析

通过产生仿真数据子 VI 来产生参考信号和待测信号, 并用其实现数字正交相关检测, 待测信号分别与两路参考信号进行相关运算(两路参考信号频率相同, 相位相差 90°), 经过数据处理, 得到输出信号。

图 7(a)为模拟产生的频率为 1 kHz、幅值为 1 V, 且有随机噪声干扰的被测信号的波形图, 随机噪声的幅值为被测信号幅值的 1/2。图 7(b)为实验输出信号的波形图, 其采样点数为 5×10^4 , 输出信号初始部分有一定波动, 随着采样点数的增加, 波动越来越小, 说明软件去噪能力随之增强。笔者对信号幅值为 1 V, 频率为 0.2 kHz 的信号进行了仿真实验, 并对其结果进行数据分析, 表 1 为噪声幅值为 0.5 V 时的实验数据及误差分析, 表 2 为噪声幅值为 1 V 时的实验数据及误差分析。



(a) 随机噪声干扰的被测信号



(b) 输出信号

图 7 仿真被测信号及测量结果

表 1 实验数据及误差分析

被测信号频率 f/kHz	被测信号幅值 A/V	采样点数 n	噪声幅值 B/V	波动误差/%
0.2	1.0	5×10^4	0.5	1.2
		1×10^5	0.5	0.6
		5×10^5	0.5	0.2
		1×10^6	0.5	0.1

表 2 实验数据及误差分析

被测信号频率 f/kHz	被测信号幅值 A/V	采样点数 n	噪声幅值 B/V	波动误差/%
0.2	1.0	5×10^4	1.0	1.9
		1×10^5	1.0	1.3
		5×10^5	1.0	0.5
		1×10^6	1.0	0.3
		2×10^6	1.0	0.1

通过对实验数据的误差分析可以得到以下结论:

1) 在相同频率和幅值的情况下,随着采样点数的不断增加,输出直流信号的波动越来越小;在噪声幅值为 0.5 V 时,当采样点达到 1×10^6 ,波动误差可达到 0.1%。

2) 在相同频率和幅值的情况下,随着噪声信号幅值的不断增大,输出直流信号的波动也增大,但可以通过增加采样点数来减小波动误差;在噪声幅值为 1.0 V 时,当采样点数达到 2×10^6 ,波动误差可达到 0.1%。

4 结论

仿真实验结果证明,通过 LabVIEW 软件实现数字正交相关检测技术是完全可行的。针对频率在 1 kHz 以内微弱光信号进行检测时,该方法能够滤除被测信号中的噪声,从测量信号中提取出被测量信号幅值,并且随着采样点数的增加,测量误差会越来越小。当被测信号的频率为 0.2 kHz,幅值为 1 V

时:若噪声幅值为 0.5 V,采样点数为 1×10^6 ,则测量误差为 0.1%;若噪声幅值也为 1 V,采样点数为 1×10^6 ,则测量误差最小为 0.3%;当采样点数增加至 2×10^6 时,测量误差减小到 0.1%。因此在实际测量中,由于背景光等噪声比较大,可以通过增加采样点数来减小测量误差。仿真结果表明,该设计可以实现对低损耗参数(如光散射率)的准确测量。

参考文献:

- [1] 江文杰,曾学文,施建华. 光电技术[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 315-322.
- [2] 李飞. 基于数字相关的弱信号检测方法的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2007(2): 1-17.
- [3] 高爱华,孙金荣,秦文罡. 微弱激光信号的数字相关检测技术[J]. 西安工业大学学报, 2010, 30(1): 6-8.
- [4] 孙秀桂,张洪斌,孙江波. 一种基于虚拟仪器技术的双锁相放大器的设计[J]. 测控技术, 2011, 30(8): 14-18.
- [5] 向英,吴先球. 锁相放大器的软件实现与参数测量[J]. 计算机与现代化, 2007(2): 19-21.
- [6] Moe. A. E, Marx. S. R, Bhinderwala. I, et al. A miniaturized lock-in amplifier design suitable for impedance measurements in cells[J]. Proceedings Sensors of IEEE, 2004, 1(10): 215-218.
- [7] Wu D Y, Wang C, Sun H J. A novel digital Lock-in amplifier with dual channels[C]. Proceedings of the 2009 International Asia Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics, Bangkok. IEEE Conference Publications: 2009: 464-468.

(上接第 84 页)

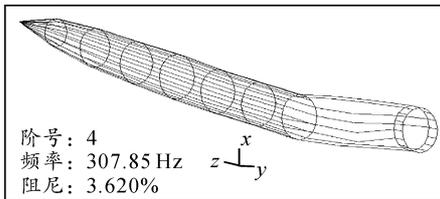


图 8 发射环境下末制导炮弹测试振型



图 9 再现末制导炮弹外压发动机堵头漏气现象

4 结论

缺乏弹药发射安全性评估理论与检测装置,导致无法揭示膛炸、早炸、解体机理,难以进行弹药发射安全性设计、试验、评估,是导致发射不安全

的根源。南京理工大学发射动力学研究所建立的发射装药发射安全性评估理论、炸药装药发射安全性评估理论、引信发射安全性评估理论以及助推发动机弹体发射安全性评估理论已经为多项武器系统解决了膛炸、早炸、解体等发射安全性问题,应将发射安全性评估检测标准贯穿于武器装备设计、研制、鉴定、使用的各个环节,以大幅提升弹药发射安全性水平。

参考文献:

- [1] Horst A W, May I W, Clarke E V. The missing link between pressure waves and breech blows[S]. AD-A058 354/2GA, 1978.
- [2] 芮筱亭,负来峰,王国平,等. 弹药发射安全性导论[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.
- [3] 芮筱亭,负来峰,等. 发射装药发射安全性评定技术的研究进展[J]. 兵工学报, 2005, 26(5): 690-696.
- [4] 邱沛蓉,董健年. 装药射击安全性模拟检测方法研究[J]. 弹道学报. 1995, 7(1): 17-23.
- [5] 芮筱亭,负来峰,陆毓琪,等. 多体系统传递矩阵法及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [6] 芮筱亭,等. 多体系统发射动力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995.