

# 基于 Labview 的光学空间滤波远程虚拟实验\*

陈颖, 黄文达\*\*

(厦门大学 物理系, 福建 厦门 361005)

**摘 要:**提出了一种利用 Labview 实现光学空间滤波模拟的新方法, 并对经典的阿贝-波特实验设计了仿真程序. 该程序可根据用户设置的参量生成二维网格光栅作为整个物理过程的输入物, 允许用户选择多种不同的滤波方式, 如低通、高通、方向滤波等, 并可依次操纵成像的各个步骤. 程序可脱离编程环境独立运行, 具有跨平台、界面友好、易于操作等优点, 并可架设基于浏览器的远程虚拟实验.

**关键词:**空间滤波; 实验仿真; Labview; 傅里叶变换; 阿贝成像; 远程实验

**中图分类号:** O438. 2; TN911. 73 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-4213(2008)05-1071-6

## 0 引言

1873 年和 1906 年, 阿贝和波特分别用十分简朴的实验装置, 鲜明地演示了阿贝成像原理<sup>[1]</sup>, 该原理的提出开启了光学信息处理的大门. 今天, 图像的增强、识别和编码等处理技术已广泛应用于医疗、通讯、加工、安全等领域. 为了配合这门学科的教学研究工作, 近年来, 有人用 C#<sup>[2]</sup> 或 MATLAB<sup>[3-4]</sup> 为阿贝波特实验设计了仿真程序. 然而这两种方法都存在不足. 使用 C# 虽然能够作出良好的用户界面, 但需要编写大量的数学运算代码; 使用 MATLAB 虽然编程简单, 但设计出的程序往往交互性差, 实验参量固定, 而且无法脱离编译环境单独运行. Labview 是集仪器控制、数据采集、信号分析和数据显示于一体的专业虚拟仪器设计软件. 它提供的编程方式是基于数据流程图的, 只需将实际的测量流程绘制成框图即可完成编程任务, 大大降低了开发软件的周期和难度. 近两年来, 国内已有不少科研单位采用 Labview 开发出复杂的测量系统<sup>[5-6]</sup>. 本文将该工具用于空间滤波实验的仿真, 使光场分布更加逼真, 而且允许用户设置光栅和滤波器的参量, 依次操纵成像的各个步骤. 仿真程序编译完成后, 可以在不同的操作系统下作为一个独立软件运行, 并可利用 Web Publishing Tool 架设远程虚拟实验, 让学生通过浏览器操作实验面板, 体验网络学习的便利和乐趣.

## 1 光学空间滤波原理

空间滤波的核心是阿贝成像原理, 与几何光学点物成点像的观点不同, 阿贝认为物是一系列不同

空间频率的余弦光栅的集合, 成像过程分两步进行. 首先, 一束平行相干光入射在物平面上, 发生夫琅和费衍射, 在透镜的后焦面上形成一系列谱斑, 不同谱斑对应不同的物空间频率; 然后这些谱斑作为新的次波源, 发出球面波, 在像平面相干叠加而成像. 如果在透镜的后焦面上放置不同结构的光阑, 就可以提取或摒弃某些谱斑, 从而改变信号的频谱组成, 实现改造图像的目的. 这个过程和滤波电路的“分频—滤波—合成”十分类似, 只不过输入信号是空间信号而非时间信号, 所以被称为空间滤波, 滤光用的光阑也被称为空间滤波器<sup>[1]</sup>.

在空间滤波实验中, 普遍使用图 1<sup>[1]</sup> 的 4F 系统. 在这个系统中, 物被置于透镜 L<sub>1</sub> 的前焦面 O(x, y) 上, 成像于无穷远处. 为了能观察到像, 引入一个和 L<sub>1</sub> 焦距相等的透镜 L<sub>2</sub>, 使它的前焦面与 L<sub>1</sub> 的后焦面重合, 这样就可以在 L<sub>2</sub> 的后焦面上得到一个倒立的实像. 因为物面、频谱面和像面分别位于两个透镜的焦平面上, 他们的光场分布满足傅里叶变换, 这个变换分三步进行.

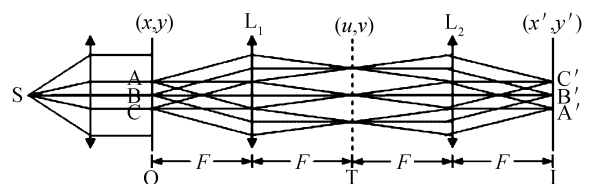


图 1 空间滤波实验中的 4F 系统图样

Fig. 1 The 4F system in spatial filtering experiments

1) 物光场  $\tilde{U}_0$ . 经透镜 L<sub>1</sub> 在频谱面 T 上实现第一次傅里叶变换, 变换后的光场分布满足

$$\tilde{U}_1(u, v) = F\{\tilde{U}_0(x, y)\} = \iint \tilde{U}_0(x, y) \cdot e^{-j2\pi(f_x \cdot x + f_y \cdot y)} dx dy \quad (1)$$

式中  $f_x$  和  $f_y$  代表物平面的空间频率, 它们和频谱面的坐标  $(u, v)$  之间满足关系

$$(u, v) = (F\lambda f_x, F\lambda f_y) \quad (2)$$

其中  $F$  为两透镜的焦距,  $\lambda$  为光源波长.

\* 福建省自然科学基金(A0310003), 福建省高等学校第二批网络课程计划(14)资助

\*\* Tel: 0592-8631858 Email: wdh Huang@xmu.edu.cn

收稿日期: 2006-10-13

2)在频谱面 T 上安置滤波器,设其透过率函数为  $\tilde{H}(u, v)$ , 则滤波后的光场分布满足

$$\tilde{U}_2(u, v) = \tilde{H}(u, v) \cdot \tilde{U}_1(u, v) \quad (3)$$

3)  $\tilde{U}_2$  经透镜  $L_2$  在像平面上实现第二次傅里叶变换, 变换后的光场分布满足

$$\tilde{U}_1(x', y') = F\{\tilde{U}_2(u, v)\} = \iint \tilde{U}_2(u, v) \cdot e^{-j2\pi(f_u \cdot u + f_v \cdot v)} dudv \quad (4)$$

式中  $f_u$  和  $f_v$  代表频谱面的空间频率, 它们和像平面的坐标  $(x', y')$  之间满足关系

$$(x', y') = (F\lambda f_u, F\lambda f_v) \quad (5)$$

联立式(1)~(5), 且令  $\tilde{H}(u, v) = 1$  可得  $\tilde{U}_1(x', y') = \tilde{U}_0(-x, -y)$ , 即像是倒立的. 若对  $\tilde{U}_2$  进行傅里叶逆变换, 可得到基于反转坐标系的像面光场分布. 本程序为了物像对比方便起见, 采用后者.

## 2 Labview 仿真程序介绍

阿贝-波特实验是将细丝网格状物用相干单色光照明, 然后在频谱面上放置不同的滤波器以观察各种成像形式. 在 Labview 平台下, 主程序和子程序都是一个个 vi, 它们由数据流和框图组成. 本文将仿真过程分解为生成光栅、分频、滤波、成像四个模块, 每个模块各由一个子 vi 实现其功能. 这四个模块通过一个事件处理结构联系在一起, 用户可通过操作程序面板上的控件, 如更改实验参量或点击按钮, 触发相应的模块, 以观察成像的各个步骤在不同条件下的结果.  $\tilde{U}_0$ 、 $\tilde{U}_1$ 、 $\tilde{U}_2$ 、 $\tilde{U}_1$  和  $\tilde{H}$  的分布均由二维矩阵表征, 网格物光栅的透过率分布矩阵  $\tilde{U}_0$  由两个一维方波列矩阵的乘积产生; 波面之间的傅里

叶正逆变换分别由 Labview 中相应的信号处理 vi 完成. 主程序的框图如图 2, 它是一个事件处理结构图, 当前页面为滤波模块页面.

程序界面如图 3. 界面的左上方是一系列可供用户设置的光栅参量, 基本参量包括光栅常量  $d$ 、光栅宽度  $B$  和透光占空比  $\tau$ .  $\tau = a/d$ ,  $a$  是一个光栅周期中可透光部分的长度, 太大的  $\tau$  值会使绝大部分的光能量集中到直流分量上, 生成的频谱图中除了零级谱斑之外其他谱斑都很暗, 不利于观察, 默认设为 10%. 为了扩展到一般的透射光栅, 程序还允许设置光栅的透过率最大值  $t_{max}$  和最小值  $t_{min}$ , 这样光栅图样的衬比度  $\gamma$  也随之改变.  $\gamma$  是图样交流分量和直流分量的比值, 满足  $\gamma = \frac{1 - t_{min}/t_{max}}{1 + t_{min}/t_{max}}$ .  $t_{min}$  默认值为 0,  $t_{max}$  默认值为 1, 这样得到的光栅图样具有理想化的最大衬比度, 显得最明锐. 采样间隔  $\Delta x$  是将  $\tilde{U}_0$  数字化的准确度, FFT. vi 规定可计算的频谱范围不超过数字化后可表征的最大频率分量. 根据香农抽样定理,  $|f_{max}| = \frac{1}{2\Delta x}$ , 因此采样间隔越大, 生成的频谱范围越小, 但谱斑可以分得较开, 有利于观察低频成分的分布. 反之若要观察频谱面的整体谱斑分布, 则应选择较小的采样间隔.

程序界面的左下方提供了有关滤波器的设置. 本文模拟的是二元振幅型滤波器, 它的屏函数只有两个取值, 0 表示完全不透光, 1 表示完全透光. 用户可以选择保留  $f_x$  频谱、 $f_y$  频谱、 $f_\theta$  频谱、小孔和小屏五种滤波方式, 方向滤波器的狭缝方向通过一个滑动条来选择, 所选滤波器的衍射屏图样也可同时

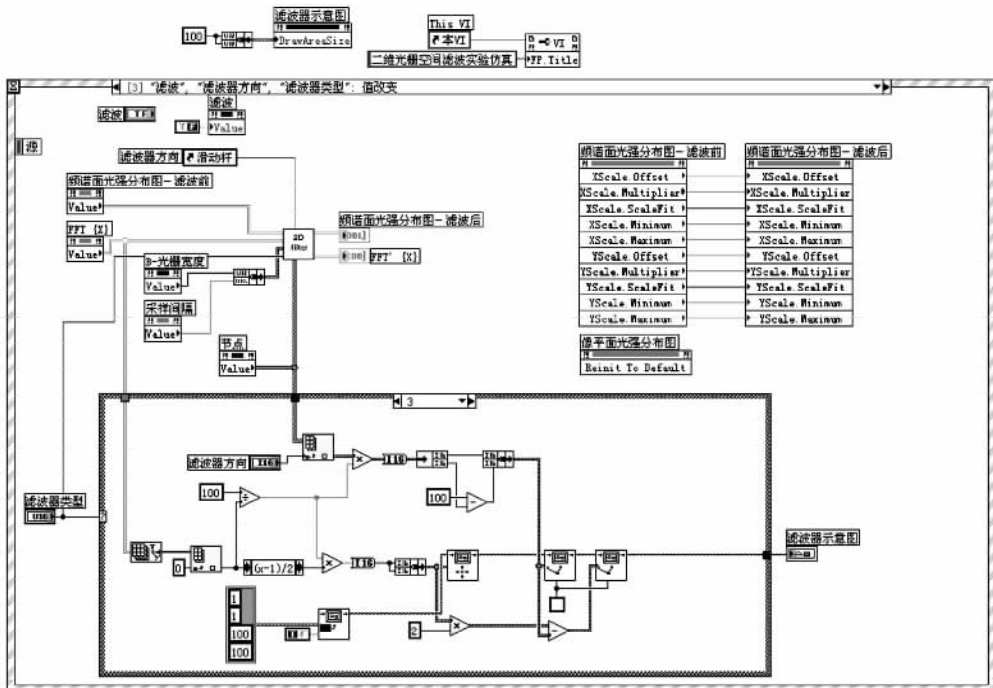


图 2 阿贝-波特实验仿真程序  
Fig. 2 Diagram of the Abbe-Porter simulation program

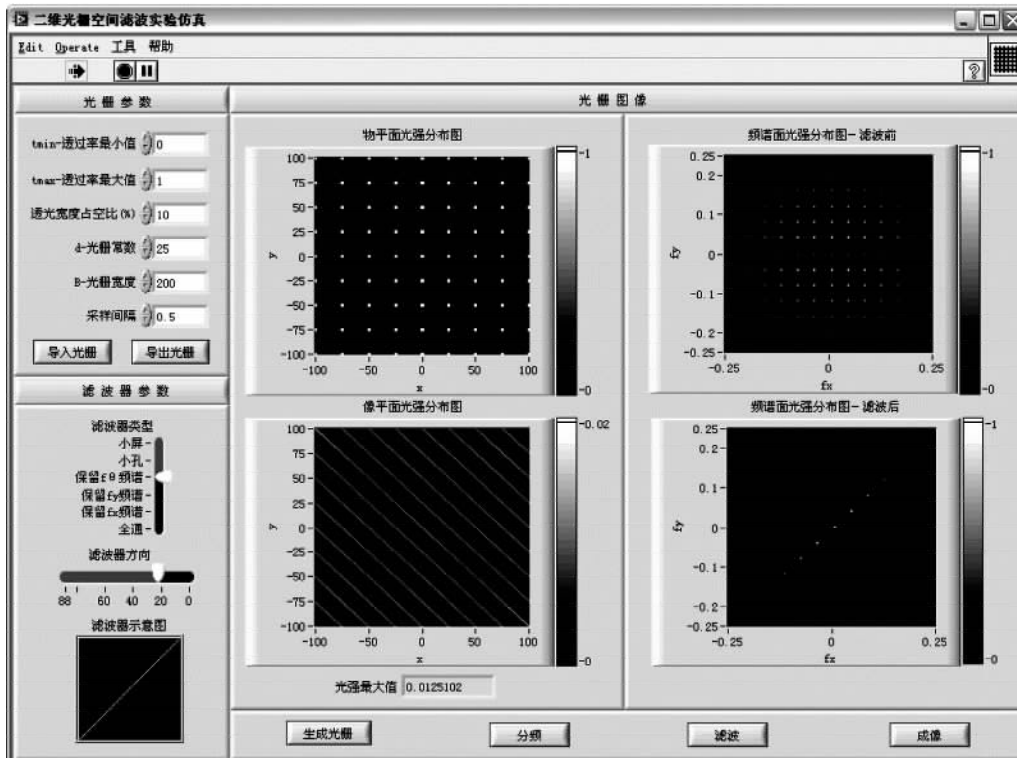


图 3 阿贝-波特实验仿真程序界面

Fig. 3 Interface of the Abbe-Porter simulation program

显示出来。

程序界面的右侧以 8 位灰度图展示各个波面的光强分布. 图上各点的灰度值和相应的光强值成线性关系, 默认将黑色对应于光强最小值 0, 白色对应于光强最大值 1. 如果滤波后像平面上的光场太暗, 用户可以参考其最大光强修改白色对应的光强值, 这样相当于在滤波后的光路中插入了一个放大器, 使像面上的图样较易于观察. 若要使模拟效果更加逼真, 可以更改作图的颜色, 使之和光源的颜色相符. 另外, 因为光栅的频谱是准离散谱, 频谱面上的能量相对集中, 最大光强远大于 1, 所以本程序对频谱面上的振幅作了归一化处理以凸显各种频率成分分布情况.

依次点击“生成光栅”、“分频”、“滤波”和“成像”四个按钮就可以观察空间滤波实验各个步骤的图样, 修改光栅和滤波器参量后这些图样就会发生变化. 为了生成带污斑的网格光栅, 可以先生成干净的光栅图, 然后点击“导出光栅”按钮, 输入文件名, 程序会将光栅图保存成 8 位的 bmp 位图, 再利用第三方绘图软件 (例如 Windows 自带的画图程序) 在图上喷一些污斑, 最后点击“导入光栅”将修改后的光栅图导入就可以了.

### 3 仿真结果举例

光栅参量设置为  $t_{min} = 0, t_{max} = 1, d = 25, B = 200, \Delta x = 1, a/d = 10\%$ . 仿真得到的物平面光强分

布及滤波前频谱面光强分布见图 4、图 5.

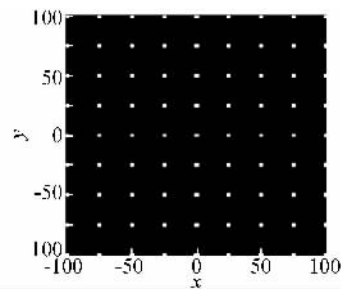


图 4 物平面光强分布

Fig. 4 Light intensity on object plane

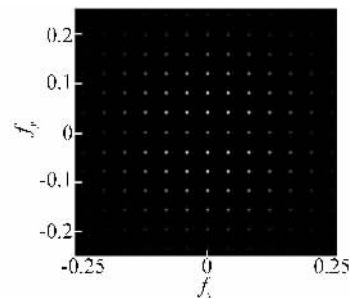


图 5 滤波前频谱面光强分布

Fig. 5 Light intensity on spectrum plane before filtering

#### 3.1 方向滤波

在频谱面中央放置一水平狭缝, 此时仅有水平方向的周期性交流信息参与成像,  $f_y \approx 0$ , 像平面上呈现一系列纵向的栅条, 垂直方向的周期性信息不见了, 见图 6. 旋转狭缝, 使其与水平方向成  $\theta$  角, 保留下来的各个频率均满足式 (6), 此时像平面上呈现一组间隔较密的斜向栅条, 见图 7. 其取向满足式 (7).

$$\frac{f_y}{f_x} = \tan \theta \tag{6}$$

$$\tan \varphi = \frac{dy}{dx} = \frac{1/f_y}{1/f_x} = \frac{f_x}{f_y} \tag{7}$$

$\theta$  和  $\varphi$  分别是狭缝和栅条与水平方向的夹角, 由式(6)、(7)可得  $\tan \theta \cdot \tan \varphi = 1$ , 所以栅条取向恰好与狭缝取向垂直.

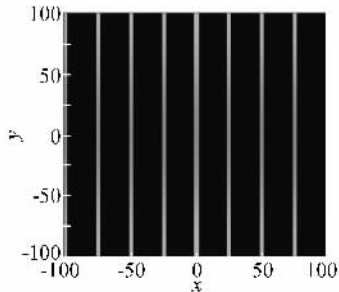


图6 保留  $f_x$  频谱后的像  
Fig. 6 Image by retaining horizontal spectrum

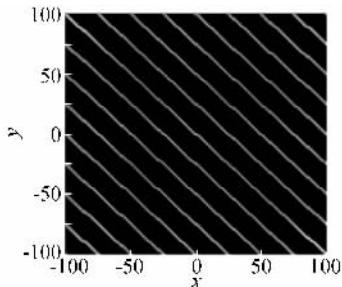


图7 保留  $f_\theta$  频谱后的像  
Fig. 7 Image by retaining directional spectrum

### 3.2 小孔(低通)滤波

在一张黑纸的中央镂一个小孔, 置于频谱面上, 挡掉包括基频在内的所有高频谱斑, 只透过零级谱斑. 这时假如网格上有些许污斑, 滤波后像面上的网格影子会变得十分模糊, 而污斑的分布却被突显出来, 见图8. 这是因为网格的频谱是按点阵分布的离散谱, 谱中的基频分量描述了网格的周期性形貌特征, 高频分量则描述其边缘特征. 经小孔滤波后这些频谱成分都被过滤了, 所以网格就不见了; 而污斑的频谱是以低频成分为主的弥漫谱, 滤波后基本被保留了下来, 所以污斑的分布被呈现在像面上, 但由于缺少高频成分, 污斑边缘显得很圆润, 见图9.

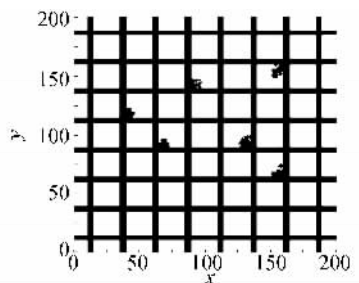


图8 带污斑的网格光栅  
Fig. 8 Grid grating with stain

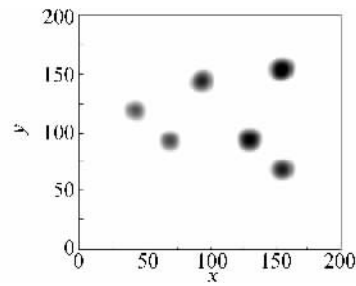


图9 小孔滤波后的像  
Fig. 9 Image by hole-like filter

### 3.3 小屏(高通)滤波

将一个光阑放置在频谱面中央, 让除零级谱斑以外的成分通通透过. 此时物像之间基本差一个直流信号, 此时物光场和像光场的振幅分布分别为

$$A_o(x) = \left[ \sum_{m=-\infty}^{\infty} \text{rect} \left( \frac{x-md}{a} \right) \text{rect} \left( \frac{x}{B} \right) \right]^2$$

$$A_I(x) = \left[ \sum_{m=-\infty}^{\infty} \text{rect} \left( \frac{x-md}{a} \right) \text{rect} \left( \frac{x}{B} \right) \right]^2 -$$

$$\left[ \frac{a}{d} \text{rect} \left( \frac{x}{B} \right) \right]^2$$

对于物光栅, 在区间  $[-a/2+md, a/2+md]$  中,  $A=1$ , 其他部分  $A=0$ ; 对于像光栅, 在区间  $[-a/2+md, a/2+md]$  中,  $A=1-(a/d)^2$ , 其他部分  $A=- (a/d)^2$ , 所以若透光占空比  $a/d > \sqrt{2}/2 \approx 70\%$ , 网格像将出现衬比度反转, 见图10. 即原来不透光的部分变得比透光的部分更亮. 对于带污斑的网格,  $a/d$  越大, 成像后污渍被擦得越淡, 见图11.

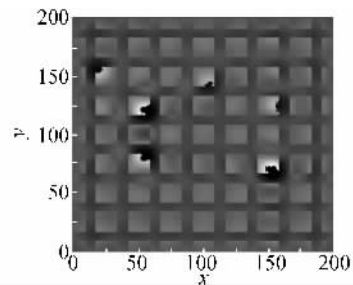


图10 小屏滤波( $a/d=70\%$ )  
Fig. 10 Image by little barrier ( $a/d=70\%$ )

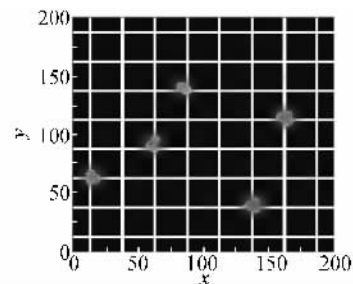


图11 小屏滤波( $a/d=90\%$ )  
Fig. 11 Image by little barrier ( $a/d=90\%$ )

## 4 远程虚拟实验的架设

利用 Labview 的 B/S 网络模型可以很方便地架设远程虚拟实验. 它是 NI 公司开发的一种远程面

板技术,类似于提供交互功能的动态网页.但是服务端无需编写 CGI 代码,只要启动 Labview 提供的 Web Server,再使用 Web Publishing Tool 将需要发布的 vi 主程序内嵌入到网页中就可以了<sup>[7]</sup>.安装了 Labview runtime engine 的客户端可以通过浏览器访问程序面板.登录实验室后,用户会浏览到当前的实验进行情况,如果想获取操作实验的权限,可以向服务端发出请求,服务端会将该请求加入队列,当前操作实验的用户释放操作权限或操作时间超过预定值之后,位于队列头的用户就可以获得操作权限.这种网络模型特别适合构建远程虚拟实验以演示仿真程序,其主要优点为:

1) 可以很简便地发布程序,添加新的实验项目,不必另外编写 CGI 脚本.

2) 客户端不管使用何种操作系统或浏览器,只要安装了 Labview runtime engine 就可以访问实验室,无需下载其他软件.

3) 服务端维护起来非常方便,可以对实验程序进行升级维护,也可以监控访问实验的用户队列.

4) 程序源代码对客户端完全不可见,充分确保代码的安全性.

图 12 为本程序发布的远程虚拟实验网页.用户可以将实验获得的光场图样复制保存到本地机,也可以用程序提供的 e-mail 工具发送到自己的信箱.程序的帮助菜单为用户提供了详细的使用说明和原理知识,以及 Flash 动画形式的操作演示,让学生学习起来更加方便.

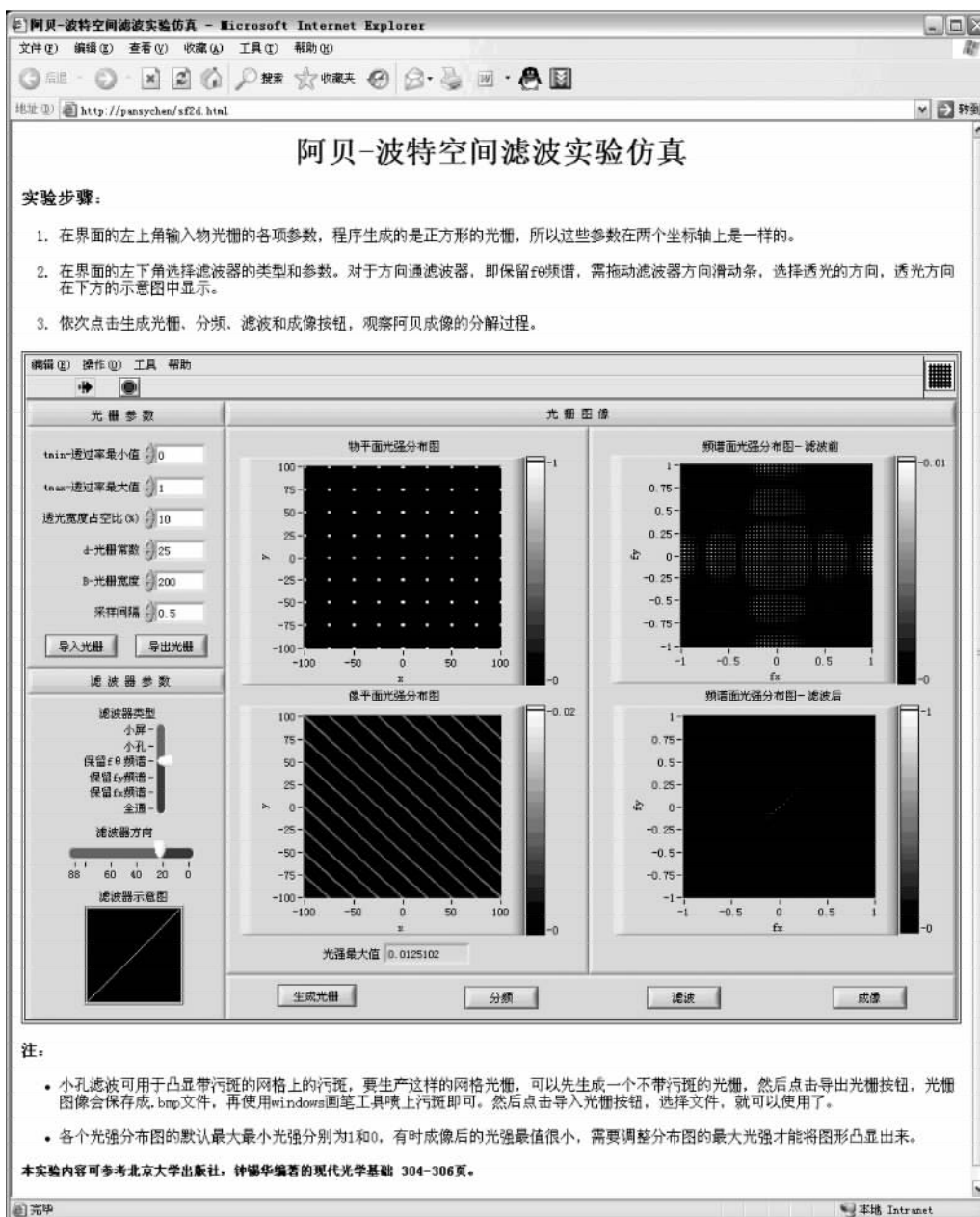


图 12 远程虚拟实验室网页

Fig. 12 Remote virtual laboratory web page

## 5 结论

本文利用 Labview 在信号处理、图形呈现及用户界面设计上的优势,提出了模拟光学空间滤波实验的一种新思路,光学信息处理的其他实验也可以用这种方法进行仿真.这种思路设计的程序界面更加友好,使用起来更加简便,并可依次观察成像的各个步骤;光栅和滤波器的参量都可调使实验的可操作性更强;应用强度图绘制光场图样使仿真结果的可视性大大提高.本方案还可以轻松构建远程虚拟实验,将计算机模拟与互联网技术紧密结合起来,因此它是设计 CAI 教学辅助软件的最佳选择.

### 参考文献

- [1] ZHONG Xi-hua. Modern fundamentals of optics[M]. Beijing: Peking University Press, 2003; 300-308.  
钟锡华. 现代光学基础[M]. 北京: 北京大学出版社, 2003; 300-308.
- [2] CHEN Cheng-zhao. Computer simulation of experiment of light spatial filtering[J]. *Journal of Hanshan Teachers College*, 2005, **26**(6): 33-36.  
陈城钊. 光学空间滤波实验的微机模拟和演示[J]. 韩山师范学院学报, 2005, **26**(6): 33-36.
- [3] XIE Jia-ning, ZHAO Jian-lin. Computer simulation of optical spatial filtering[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(7): 847-850.  
谢嘉宁, 赵建林. 光学空间滤波过程的计算机仿真[J]. 光子学报, 2002, **31**(7): 847-850.
- [4] XU Hui-liang, HE Zhen-jiang, YANG Guan-ling, *et al.* Computer simulation of Fourier optical experiments based on MATLAB[J]. *Physics*, 2004, **33**(4): 298-301.  
徐慧梁, 何振江, 杨冠玲, 等. 基于 MATLAB 的傅里叶光学实验的计算机模拟[J]. 物理, 2004, **33**(4): 298-301.
- [5] ZHANG Ying, WEN De-sheng, HAN Ya-meng, *et al.* The signal processing design of the spatial transient optical signal based on LabVIEW[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(5): 772-775.  
张颖, 汶德胜, 韩亚蒙, 等. 基于 Labview 空间瞬态光信号处理技术[J]. 光子学报, 2006, **35**(5): 772-775.
- [6] ZHANG Deng-ke, NI Xu-xiang, SHI Yan. Design of a optical spectrometer based on LabVIEW[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(6): 854-858.  
张登科, 倪旭翔, 石岩. 一种基于 Labview 的光谱仪设计[J]. 光子学报, 2006, **35**(6): 854-858.
- [7] DONG Xiang, ZHOU Guo-kui. Study on the method of remote monitoring based on Labview [J]. *Process Automation Instrumentation*, 2006, **27**(1): 6-8.  
董湘, 周国奎. 基于 Labview 的远程测控方法研究[J]. 自动化仪表, 2006, **27**(1): 6-8.

## Remote Virtual Experiment of Optical Spatial Filtering Based on Labview

CHEN Ying, HUANG Wen-da

(Department of Physics, Xiamen University, Xiamen, Fujian 361005, China)

Received date: 2006-10-13

**Abstract:** A new method of using Labview to simulate optical spatial filtering is put forward and a simulation program for classical Abbe-Porter experiment is designed. It can generate 2D grid gratings based on user's setting and take them as input objects for the whole physical process. It provides several filtering modes for users to select like low passing, high passing, and directional passing etc. Users can manipulate the imaging process step by step. The program runs independently of programming environment and operating system. It is friendly interfaced and easy to use. Furthermore, constructing a remote virtual experiment based on browsers is possible, which makes it a perfect CAI software for relevant courses.

**Key words:** Spatial filtering; experimental simulation; Labview; Fourier transform; Abbe imaging; remote experiment



**CHEN Ying** was born in 1980. She is a graduate student majoring in optics at Physics Department, Xiamen University. She is studying the application of virtual instrument and network technology in physics research and teaching, which includes measurement automation, computer simulation and remote teaching.