

干涉图采样和数据处理的仿真研究

Study on Simulation Model of Interferogram Sampling and Data Processing

(1.中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 2.中国科学院研究生院)吴娜^{1,2} 向阳¹

WU NA XIANG YANG

摘要:结合静态干涉成像光谱仪工作原理,建立了干涉图空间采样的数学模型,利用 Matlab 软件实现了干涉图采样和数据处理的计算机仿真研究。该仿真平台可比较不同采样过程和不同数据处理方法对复原光谱的影响,对静态干涉成像光谱仪的设计和性能分析有一定指导意义。

关键词:干涉成像光谱仪;干涉图;数据处理;仿真

中图分类号:TH744

文献标识码:A

Abstract: A mathematical model for the detector array sampling the interferogram was built based on the principle of static interferometric imagers. And with Matlab, the simulation study for interferogram sampling and data processing was implemented. The system can be used to compare the recovered spectrum of different sampling ways and different data processing methods, which is helpful to the design and analysis for static interferometric imagers.

Key words: Interferometric imagers; Interferogram; Data processing; Simulation

1 引言

干涉成像光谱仪由光学系统、电子学系统和数据处理系统等部分组成,它利用目标像元辐射光谱与其干涉图之间的傅里叶变换关系,将成像与双光束干涉相结合,通过对测得干涉图傅里叶变换获得目标的光谱信息。

本文根据静态干涉成像光谱仪的工作原理,结合 Matlab 的强大信号处理功能,对光谱仪的干涉图采样过程和复原光谱获取过程进行了仿真研究,得到了良好的实验结果。

2 静态干涉成像光谱仪工作原理

静态干涉成像光谱仪多采用狭缝扫描,利用偏振干涉方法或三角共路干涉方法,在面阵探测器平行狭缝方向上得到被观测面的一维空间狭缝像,在垂直与狭缝方向上产生物面像元辐射的整个空间序列干涉条纹。干涉条纹的强度分布 $I_0(\alpha)$ 可表示为:

$$I_0(\alpha) = \int_{-\infty}^{\infty} 2B(\sigma)[1 + \cos(2\pi\sigma\alpha)]d\sigma \quad (1)$$

其中, α 为双光束间的光程差, σ 为波数, $B(\sigma) = C(\sigma)B_0(\sigma)$, $C(\sigma)$ 为系统光谱函数, $B_0(\sigma)$ 是入射光谱。

略去式(1)中的常数项,得到通常所说的干涉图函数:

$$\begin{aligned} I(\alpha) &= \int_{-\infty}^{\infty} 2B(\sigma)\cos(2\pi\sigma\alpha)d\sigma \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} B(\sigma)\exp(i2\pi\sigma\alpha)d\sigma \end{aligned} \quad (2)$$

对式(2)进行傅里叶变换,得到复原光谱:

$$B(\sigma) = \int_{-\infty}^{\infty} I(\alpha)\exp(-i2\pi\sigma\alpha)d\alpha \quad (3)$$

3 干涉图采样模型与数据处理步骤

静态干涉成像光谱仪的直接测量结果为探测器阵列获取的离散干涉图,采样中零光程差的确定精度及探测器阵列的象

元参数将影响干涉图采样结果,因此实践中要经过切趾、相位校正、傅里叶变换等数据处理过程方可获取目标的光谱信息。

3.1 干涉图采样模型

设探测器象元光敏单元宽 w , 相邻单元中心间距 d , 探测器行长 $D=Nd$, N 为探测器阵列沿干涉图方向上的光敏单元总数。由于静态干涉成像光谱仪中,空间坐标 x 与光程差 α 之间存在着一种线性关系:

$$\alpha = Ax \quad (4)$$

式中 A 为常数,由此可知:单个光敏单元对应的光程差采样范围为 $W_{\text{opt}}=Aw$, 相邻光敏单元的光程差间距为 $d_{\text{opt}}=Ad$, 单行探测器对干涉图采样所覆盖的光程差范围为 $D_{\text{opt}}=AD$ 。静态干涉成像光谱仪的干涉图空间采样过程如图 1 所示。

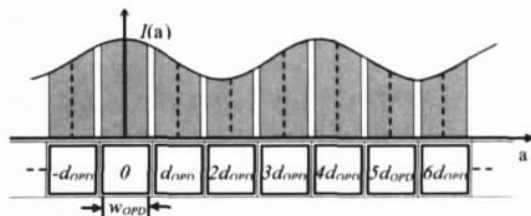


图 1 干涉图空间采样示意图

单个探测器象元采样过程相当于干涉图与象元光敏单元的卷积,因此单行探测器采样得到的干涉图函数为:

$$I_w(\alpha) = [I(\alpha) * \text{rect}(\frac{\alpha}{w_{\text{opt}}})] \text{comb}(\frac{\alpha}{d_{\text{opt}}}) \text{rect}(\frac{\alpha}{D_{\text{opt}}}) \quad (5)$$

式中 $*$ 表示卷积运算。

3.2 切趾

对空间调制干涉成像光谱仪而言,由于探测器阵列象元数目有限,测得干涉图函数会在最大光程差处突然截止,这将引起傅里叶变换所得的谱线函数变宽并出现旁瓣振荡。数据处理中采用渐变的权重函数去乘干涉图,以缓和最大光程差附近干涉图的尖锐不连续性,从而抑制旁瓣效应,这个过程称为切趾。

吴娜: 博士生

基金资助: 国家自然科学基金 (60538020)

用选定的切趾函数 $A(\cdot)$ 乘以干涉图, 则得到的调制光谱为原始光谱与切趾函数的傅里叶变换后函数 $\bar{A}(\cdot)$ 的卷积。因此 $A(\cdot)$ 的形状决定仪器函数和分辨率。

表 1 给出了几种常用切趾函数对单色复原光谱的影响。总体上来讲滤波越强, 仪器函数的半宽度值越大, 旁瓣抑制效果越显著。相对而言, 三角形函数和 Happ-Genzel 函数的切趾滤波综合效果较好。

表 1 几种常用切趾函数特性

函数名称	表达式	半高线宽	第一旁瓣相对主峰的高度
矩形函数	$rect(\alpha/\alpha_{max})$	$0.603/\alpha_{max}$	22%
三角形函数	$1- \alpha /\alpha_{max}$	$0.886/\alpha_{max}$	4.7%
余弦函数	$\cos(\pi\alpha/2\alpha_{max})$	$0.820/\alpha_{max}$	7.1%
Happ-Genzel 函数	$0.54 + 0.46\cos[\pi\alpha/\alpha_{max}]$	$0.908/\alpha_{max}$	0.6%

3.3 相位校正

探测器测得干涉图是一系列位于 $[-\alpha_{max}, +\alpha_{max}]$ 之间的测量值, 其中 α_{max} 为最大光程差, 取决于仪器需要满足的波数分辨率, α_{max} 则决定于仪器设计。当 $\alpha_{min}=\alpha_{max}$ 时, 采样称为双边采样; 当 $\alpha_{min} \gg \alpha_{max}$ 时, 采样称为过零采样。理论上讲干涉图具有对称性, 为减少计算量可采用单边采样即 $\alpha_{min}=0$, 这要求精确找到零光程差点, 而干涉图测量过程中确定的零光程差点位置往往存在着误差, 这种找错原点引起的复原光谱的误差称为相位误差。另外, 由于光学系统装调不精确、探测器光谱响应不均匀都会产生相位误差。相位误差将使复原光谱发生畸变, 实际光谱仪设计中为了校正相位误差, 常采用过零采样。

干涉图相位校正主要有两种方法。1966 年 Forman 提出的卷积法: 先在零点附近取短程的双边干涉图计算相位误差函数, 然后与整个干涉图卷积从而获得对称的干涉图; 1967 年 Mertz 提出的乘积法: 利用小范围双边干涉图实现相位误差的估计, 经插值后再在频域上完成对全干涉图的相位误差校正。对比而言, Mertz 法计算简单, 容易实现, 但其精度相对较低; Forman 法计算精度较高, 但由于采用卷积操作, 所以过程复杂, 运算时间长。

3.4 傅里叶变换

为了由测得的离散干涉图快速获取目标光谱信息, 干涉图数据处理过程中采用快速傅里叶变换算法。快速傅里叶变换算法的基本思想是将一个长度为 N 的序列的离散傅里叶变换逐次分解为较短的离散傅里叶变换来计算, 从而缩短计算时间, 减少计算所需存储容量。

4 仿真实验

Matlab 具有强大的数值运算和图形可视化功能, 结合上述模型及算法, 建立了一套静态干涉成像光谱仪的干涉图采样及数据处理的仿真软件。软件采用模块化编程结构, 可根据输入参数不同, 模拟不同采样方式 (单边采样、双边采样、过零采样)、不同切趾函数和不同相位校正方法对应的复原光谱输出结果。

图 2 给出了单色光、复色光入射情况下, 仿真系统得到的干涉条纹和复原光谱。

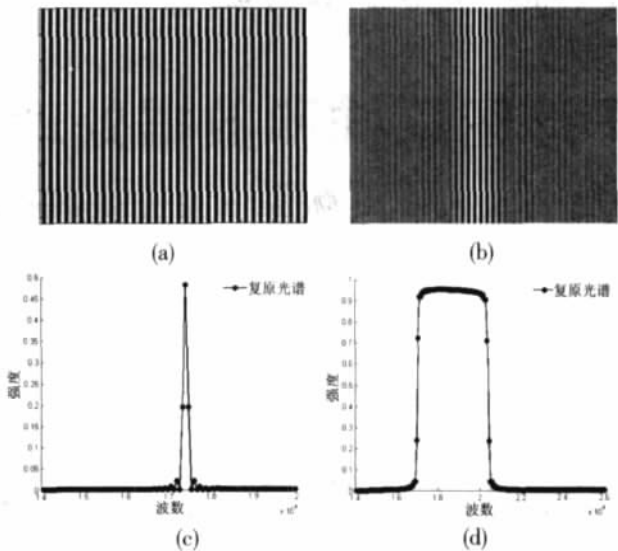


图 2 (a)理想准直单色谱线对应的干涉条纹;(b)矩形光谱带对应的干涉条纹;(c)、(d)分别为(a)、(b)对应的复原光谱

5 结论

本文结合静态干涉成像光谱仪的工作原理建立了数学模型, 根据数学表达式编写 Matlab 程序, 形成了干涉图采样的计算机仿真模型和数据处理软件。实验表明该仿真系统结构合理, 功能相对完善。仿真结果与实际情况基本一致, 具备较好的实用性。

本文创新:建立了干涉图空间采样和数据处理的完整算法, 仿真软件功能强大, 可靠性好。

参考文献

[1]Takayuki Okamoto, Satoshi Kawata, and Shigeo Minami, "Fourier transform spectrometer with a self-scanning photodiode array," Applied Optics.1984, 23(2): 269.
[2]Jonathan V. Sweedler. Spatially Encode Fourier Transform Spectroscopy in the Ultraviolet to Near-Infrared. Applied Spectroscopy. 1989, 43(8): 1378.
[3]Marja-Leena Junttila. Stationary Fourier-transform spectrometer. Applied Optics.1992, 31(21): 4106.
[4]G.GUELACHVILI 著,张知廉编译.傅里叶变换光谱.北京大学出版社,1990.
[5]吴瑾光.近代傅里叶变换红外光谱技术及应用(上卷).科学技术文献出版社,1994.3- 15.
[6]吴智量,黄日华等.光强数据采集系统[J]微计算机信息.2004.20(8)
作者简介:吴娜,女,汉族,1977.6.博士生,主要研究方向:干涉成像光谱技术、光电信号处理。
Biography:Wu Na, 1977, studies in Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Majoring in the technology of interferometric imaging spectroscopy and signal processing.
(130033 长春 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所) 吴娜 向阳
(100039 北京 中国科学院研究生院)吴娜
通讯地址:(130033 长春 长春市东南湖大路 16 号中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室)吴娜
(收稿日期:2008.1.5)(修稿日期:2008.3.5)