

研究干涉图处理与光谱复原的一种新方法*

简小华¹⁾ 张淳民¹⁾ 赵葆常²⁾

1) 西安交通大学理学院, 西安 710049)

2) 中国科学院西安光学精密机械研究所空间光学实验室, 西安 710048)

(2006 年 4 月 4 日收到, 2006 年 8 月 2 日收到修改稿)

简要论述了自行研制的空间调制型偏振干涉成像光谱仪的工作原理及干涉图获取模式, 采用三种不同的光谱复原方法分别对干涉图进行了处理和光谱复原, 并对实验结果进行了分析比较. 将非参数模型 Music 算法引进到干涉图的光谱复原处理中, 极大的提高了复原光谱的分辨率, 为超高分辨率的光谱复原分析技术提供了较好的数学模型, 为提高光谱分辨率提供了可能的依据和新方法.

关键词: 空间调制, 偏振干涉成像光谱技术, 光谱复原, Music 算法

PACC: 4230K, 0765, 4225H

1. 引 言

空间调制干涉成像光谱技术是 20 世纪 80 年代后期发展起来的一项高新前沿科技, 它的诸多优点包括大视场、高通量、多通道、稳定性好、装置简单等使其无论是在民用还是军用方面都有很高的实用价值, 也愈来愈得到各国政府、军方及国际成像光谱界的重视. 目前国际上具有代表性的空间调制干涉成像光谱仪主要有: 基于 Sagnac 干涉仪的空间调制干涉成像光谱仪^[1]; 基于双折射晶体元件的数字阵列扫描干涉仪^[2]; 基于 Wollaston 棱镜的空间调制光谱仪^[3]等. 而目前国内比较有特色的是 2000 年以来提出的基于 Savart 偏光镜的时空混合调制的新型偏振干涉成像技术和偏振干涉成像光谱仪^[4-8]. 无论哪一种干涉成像光谱仪都需对所获取的干涉图进行处理复原, 以获取含有多种信息的光谱图, 为进一步获知探测目标的属性结构及化学组成等提供有力的科学依据. 因此获取目标像元辐射干涉图的方法和光谱复原技术就成为研究的核心问题, 它决定了干涉成像光谱仪的使用范围, 标志着干涉成像光谱仪性能的优劣和干涉成像光谱技术的高低. 而传统的光谱复原方法不但步骤繁琐而且分辨能力有限, 若要进一步提高光谱分辨率必须采用背景去除、退卷积

或建立参数模拟等复杂过程, 大大的限制了光谱复原的速度与分辨率, 且由于随机噪声的无序性以及光路调节的非线性误差使复原光谱与理想模式产生较大差距^[9]. 为此, 本文引进了信息处理技术中较为成熟的非参数模型 Music 算法, 将相关矩阵的特征向量空间分解为信号子空间和噪声子空间, 通过相关处理较方便的获得了高分辨率的光谱图, 为高分辨率的光谱复原与分析提供了较好的数学模型, 为进一步的光谱精确定标及彩色图像的合成建立了基础和提供了改进的可能.

2. 空间调制型干涉成像光谱仪基本原理及干涉图获取模式

2.1. 原 理

图 1 是我们自行研制的基于双折射晶体(Savart 偏光镜)分光器的空间调制偏振干涉成像光谱仪的光路图. 其中的 Savart 板由 2 块厚度相等的单轴正(负)晶体组成. 前板光轴在 XZ 平面内且与 X, Z 轴正向成 45°角, 后板光轴在 YZ 平面内, 并与 Y, Z 轴正向成 45°角. 光源发出的光通过狭缝后经起偏器变为沿偏振片偏振方向振动的线偏振光, 入射到 Savart 偏光镜上后发生双折射, 成为两束线偏振光: 寻常光

* 国家自然科学基金重点项目(批准号: 40537031), 国家自然科学基金(批准号: 40375010, 60278019), 陕西省科技计划攻关项目(批准号: 2005K04-G18)和西安交通大学“985”工程资助的课题.

(o 光) 和非寻常光 (e 光), o 光沿原入射方向传播, e 光则发生偏折. 而在进入 Savart 偏光镜右板时, 由于光轴方向的改变, 原 o 光变成 e 光, 原 e 光变成 o 光. 出射光变成两束有横向剪切量, 振动方向互相垂

直且平行于原入射光传播方向的线偏振光. 经分析器后两束光振动方向一致, 经成像镜后在探测器表面相遇, 由于满足相干条件(同频率、同振动方向、有固定的相位差), 最终形成干涉图样.

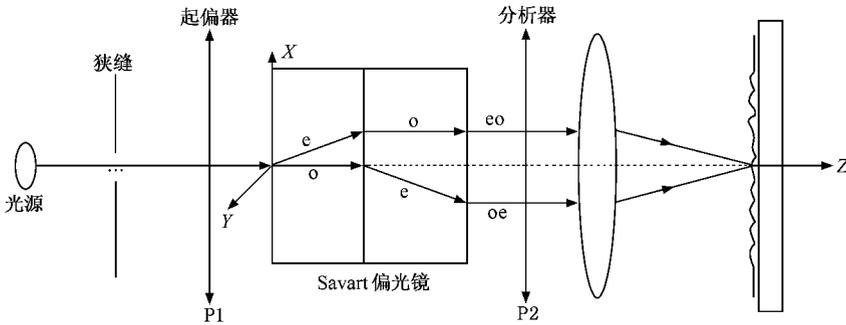


图 1 空间调制偏振干涉成像光谱仪原理图

由傅里叶变换光谱学原理知, 当双光束干涉强度即干涉图 $K(\Delta)$ 已知时, 则光源的光谱强度 $B(\sigma)$ 即为 $K(\Delta)$ 的傅里叶变化^[9]:

$$B(\sigma) = \int_{-\infty}^{+\infty} K(\Delta) e^{-i2\pi\sigma\Delta} d\Delta, \quad (1)$$

式中 Δ 代表光程差, σ 为波数, 单位为 cm^{-1} , 干涉图则为 $B(\sigma)$ 的傅里叶逆变换:

$$K(\Delta) = \int_{-\infty}^{+\infty} B(\sigma) e^{-i2\pi\sigma\Delta} d\sigma. \quad (2)$$

(1)(2) 式为干涉图与光谱图之间的变换关系式, 也是干涉成像光谱技术的基础理论和基本积分式.

2.2. 干涉图获取模式

无运动部件的空间调制型干涉成像光谱仪以面阵 CCD(电荷耦合器) 作为探测器, 探测时能同时得到视场内一列探测目标的所有干涉信息, 而不必像

时间调制型那样需动镜运行一个周期方能完成对干涉图的采样. 探测时, 探测区域各个目标的干涉信息按顺序(空间) 分别被记录在面阵探测器的一行上, 而一列探测目标的干涉数据就被记录在一幅 CCD 图片里. 当仪器视场扫过待测区域, 就可得到整个区域的干涉图. 空间调制型干涉成像光谱仪消除了时间因素的影响, 只要按空间探测的顺序, 依次对每一幅 CCD 图片进行处理, 就能得到每一列目标的干涉数据, 再将这些数据按空间顺序组合, 就可以得到被探测区域(或物体) 的干涉图^[10-13]. 这种干涉图获取模式实时性好, 后续数据处理简单, 在实验和实际应用中都有良好的应用效果.

3. 干涉图处理与光谱复原

3.1. 干涉图预处理

图 2 为用我们自行研制的空间调制偏振干涉成

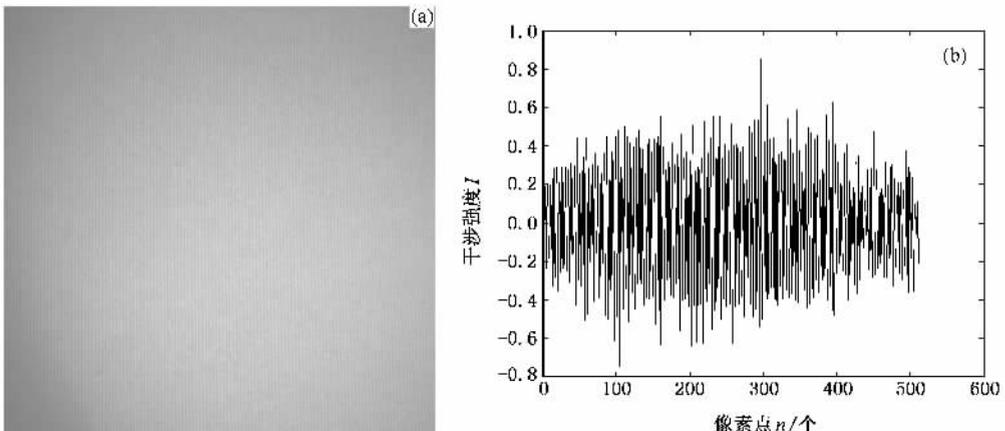


图 2 单色光干涉图 (a) 单色光原始干涉图 (b) 经滤波和去除背景后的干涉图

像光谱仪进行模拟卫星探测实验时所获取目标的干涉图,结合空间调制探测模式进行干涉数据的提取和处理,图 2(a)为单色光原始干涉图,图 2(b)为经过滤波和背景去除等处理后所获得的干涉图。(如无特殊说明,文中各图强度均已进行了归一化处理)。

3.2. 光谱复原

通过对实验所获取的干涉图进行必要的切趾、相位修正之后^[14,15],我们即可利用傅里叶变换光谱学中的基本关系进行光谱复原工作。以下是我们采用三种不同的光谱复原方法所获得的光谱图以及结果的分析比较。

3.2.1. 直接法光谱复原

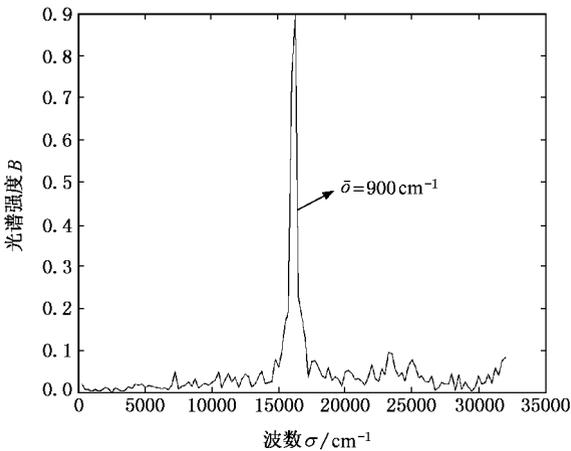


图 3 单色光直接法光谱复原图

图 3 是我们通过对实验获取的干涉图预处理后直接进行傅里叶变换获得的单色光光谱图。可以看到直接得到的光谱图虽然能够得到大致的光谱图,但光谱展宽较大,其半高宽为 900 cm^{-1} 。根据瑞利判据可知其光谱分辨率约为 20 nm ,而且有旁瓣现象,影响了峰值的强度。尤其是在复色光复原的光谱中,由于旁瓣和邻近的峰值叠加在一起,甚至会出现许

多伪峰导致光谱图形产生大的畸变,严重影响了其后的光谱分析及进一步的深入研究。若将干涉数据进行有一定交叠的分段光谱复原,再将各段的复原光谱作平均处理可改善光谱的方差性能。但这种方法对分段的交叠区域大小选取需谨慎处理:交叠的太少,相当于没有扩展干涉数据分辨率无法有效提高,但交叠得太多又很容易产生信号失真,使复原光谱不符合实际。

3.2.2. 参数模型现代谱估计法复原

从 Michelson 干涉仪得到的单色光的干涉图在理论上是向两边无限延伸的,但实际动镜的移动距离总是有限的,因而所得到的干涉图的长度也是有限的。在进行傅里叶变换时认为在取样点以外的信息都为零,这就相当于人为地加了一个窗口函数,限制了复原光谱的分辨率^[16]。如果我们采用一种数学模型,根据取样得到的信息来预测取样点以外的信息,而不是简单的认为是零,只要数学模型合理,就能消除窗口函数的影响,大大提高分辨率,这就是现代谱估计方法。

自回归(auto-regressive, AR)模型,它是一个全极点模型,以下三式为它的基本模型关系式:

$$x(n) = - \sum_{k=1}^p a_k x(n-k) + u(n), \quad (3)$$

$$H(z) = \frac{1}{A(z)} = \frac{1}{1 + \sum_{k=1}^p a_k z^{-k}}, \quad (4)$$

$$P_x(e^{j\omega}) = \frac{\sigma^2}{\left| 1 + \sum_{k=1}^p a_k e^{-j\omega k} \right|^2}, \quad (5)$$

其中 $x(n)$ 即干涉数据, a_k 为模型参数, $|H(z)|$ 为传递函数, $P_x(e^{j\omega})$ 为光谱函数, σ^2 为干涉数据函数的方差。由于 AR 模型的正则方程是一组线性方程,系数容易求得,AR 模型是被研究得最多并获得广泛应用得一种模型。正则方程描述了 AR 模型参数 a_k 和 $x(n)$ 的自相关函数的关系,其矩阵形式为

$$\begin{bmatrix} r_x(0) & r_x(1) & r_x(2) & \dots & r_x(p) \\ r_x(1) & r_x(0) & r_x(1) & \dots & r_x(p-1) \\ r_x(2) & r_x(1) & r_x(0) & \dots & r_x(p-2) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_x(p) & r_x(p-1) & r_x(p-2) & \dots & r_x(0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma^2 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

可以看出,一个 p 阶的 AR 模型有 $p+1$ 个参数,即 $a_1, \dots, a_p, \sigma^2$ 只要知道 $x(n)$ 的前 $p+1$ 个自相关函数 $r_x(0), r_x(1), \dots, r_x(p)$ 就可以求出这 $p+1$ 个参数. 系数矩阵是 Toeplitz 矩阵,一般要用 Levinson-Durbin 递推法进行求解^[7]. 经典谱估计的分辨率正比于有效信号的长度,但 AR 自回归谱估计对于给定 N 点的有限长序列,虽然估计出的自相关函数也是有限长的,但现代谱估计的一些方法隐含着数据和自相关函数的外推,使其可能的长度超过采样获取的长度,因而 AR 谱的分辨率较高.

图 4 是利用自回归模型获得单色光的光谱图,其估计谱中谱线的半高宽为 250 cm^{-1} . 比不做任何处理复原的光谱图分辨率提高一倍,更是切趾后直接复原光谱图分辨率的 4 倍. 但与此同时也大大增加了计算处理的数据量,需要花费较长时间得到复原光谱图. 在建立 AR 模型时选择阶次是一个重要的问题,阶次选得过低,谱线太平滑,反映不出谱峰;阶次选得过大,可能会产生虚假的峰值. 关于阶次的选择,主要有最终预测误差准则和信息论准则. 这些准则也只是提供了一个大体依据,在实际应用中,还是要视结果的实际情况来确定.

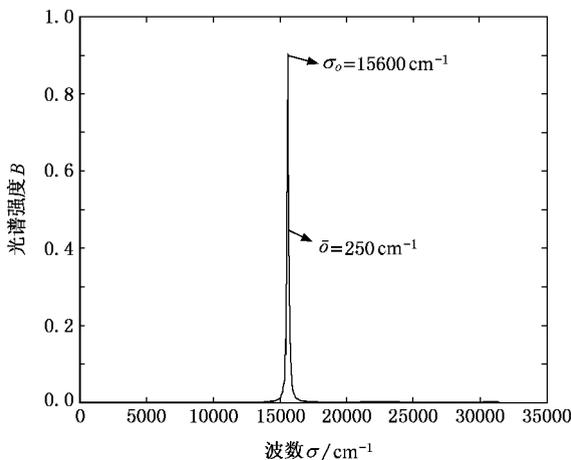


图 4 自回归模型复原的单色光光谱图 ($p=8$)

3.2.3. 非参数模型 Music 法光谱复原

基于非参数模型的功率谱估计主要是基于矩阵特征分解的功率谱估计,它将相关矩阵的特征向量空间分解为信号子空间和噪声子空间. 由此衍生出来的特征向量与 Music 算法的信号功率谱估计法均是现代谱估计法. 下面我们将着重论述 Music 算法谱估计法.

基于 Music 算法的功率谱估计主要是针对 $M <$

p 这种普遍情况,其中 M 代表干涉图中的取样点数, p 是用来指定信号空间特征向量的维数. 信号分解为各个向量都是正交的向量空间 e_i 和噪声空间 V_k , 因此它们的线性组合也是正交的,即

$$e_i^H \left(\sum_{k=M+1}^{p+1} a_k V_k \right) = 0, \quad i = 1, 2, \dots, M, \quad (7)$$

令 $\epsilon(\omega) = [1, \exp(j\omega), \dots, \exp(j\omega p)]^T$, 因此信号的功率谱可以表达为

$$\hat{P}_x(\omega) = \frac{1}{\sum_{k=M+1}^{p+1} a_k |e^H(\omega) V_k|^2}, \quad (8)$$

在 $\omega = \omega_i$ 处, $\hat{P}_x(\omega)$ 应是无穷大,但由于 V_k 是由相关矩阵分解得到的,而相关矩阵是估计得到的,因此势必会有误差,故 $\hat{P}_x(\omega)$ 成为有限值,并呈现尖的峰值,其峰值对应的频率呈现正弦信号的频率特性,因此可利用这点得到干涉图的功率谱估计,并且实验结果显示其功率谱的分辨率要好于 AR 模型. 令上式中的 $a_k = 1 (k = M+1, \dots, p+1)$, 则所得功率谱估计即为 Music 估计,即

$$\hat{P}_{\text{Music}}(\omega) = \frac{1}{e^H(\omega) \left(\sum_{k=M+1}^{p+1} V_k V_k^H \right) \epsilon(\omega)}. \quad (9)$$

由于 Music 法模拟的信号在峰值附近具有较好的干涉性,即呈正弦特性,且算法估计中的一些方法也隐含着数据和自相关函数的外推,使其可能的长度超过采样获取的长度,并且考虑了噪声的影响下使特征信号具有更贴近实际理想光谱的正弦干涉性,使其光谱分辨率比起 AR 自回归模型得到的要更高. 图 5 就是利用 Music 算法复原的单色光光谱图,光谱谱线的半高宽只有 100 cm^{-1} , 光谱分辨率可达 nm 级别,且几乎平滑了所有的噪声起伏,得到的光谱图已经十分接近理想的单色光谱估计图. 但是对于复色光,虽然光谱分辨率得到提高,却由于噪声信号与各个峰值之间无序性,干涉图的平稳特性较差,从而出现较大的畸变. 而且 Music 模型对于 p 的取值反映很敏感,尽管可由经验公式求出,但结果往往需要进一步的调试. 总之现代谱估计法在单色光复原方面有较大的优势,但对于干涉图周期性较差的复杂多光谱段复色光谱在谱估计方面仍有不足,需结合小波变换、分数傅里叶变换等方法进一步改进^[18, 19].

上面比较了各种算法的性能,而没有考虑实际的计算量. 有些方法效果虽好,却要牺牲大量的时间和设施,在计算上实用性较差,有些方法虽然效果差

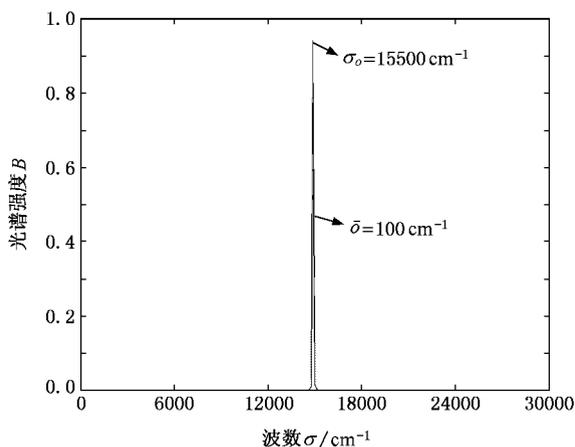


图 5 Music 算法复原的单体光光谱图 ($p = 500$)

些,但计算简单,在满足分辨率要求的情况下却不失为一种简便的好方法.表 1 给出上述各种具体算法的粗略比较(主要以分辨率为主).

表 1 算法性能比较(操作系统:Microsoft Windows XP Professional 版本 2002 + SP1;
CPU:AMD Athlon™ XP 1600+,内存 256 Mb,实验软件平台:Matlab 6.5)

算法	耗时(单点平均)/s	耗时(单幅图像 800 × 600)/min	效果比较
直接法	15.811	158.11	分辨率一般,速度极慢
FFT	0.016	0.16	分辨率一般,操作简单,速度极快
AR 模型	0.047	0.47	分辨率较好,需要动态调整阶数 p ,速度较慢
Music 模型	0.046	0.46	分辨率好,但复色光可能产生畸变,速度较慢

(3)引进光谱复原技术的 Music 算法,由于其模型在光谱复原方面考虑了噪声的影响,并有类似参数模型数据外扩的特点使得复原光谱完全接近理想脉冲模式,可以说是最接近实际的光谱复原技术,为光谱的精确定标及后期的彩色图像合成提供了良好的基础.但在复色光光谱复原方面仍需继续寻找更好的光谱复原算法.

(4)上述各种算法的比较为实际光谱复原程序算法的选择提供了评判依据.

4. 结 论

在简要论述自行研制的空间调制型偏振干涉成像光谱仪的工作原理及干涉图获取模式的基础上,采用三种不同的光谱复原方法分别进行了光谱复原,分析比较了直接法(FFT)、自回归(AR)模型和非参数模型(Music 法)光谱复原的各自特性,结合实验结果我们得到如下结论:

(1)直接法中若对干涉数据进行分段光谱复原,再将各段的复原光谱作平均处理可改善光谱的方差性能,但其对干涉数据突然截断,造成主瓣内的功率向旁瓣部分泄漏,降低了分辨率,甚至产生假峰.

(2)自回归模型法通过建立干涉数据与光谱的响应模型,对干涉数据进行预测拓展,得到远大于给定数据长度的估计值,因而具有比直接法和间接法高的分辨率.

本文研究的虽然只是针对空间调制型成像光谱仪所获取的干涉图的光谱复原技术,实际上也同样适用于时间调制型或时空混合调制型干涉成像光谱仪的光谱复原,只需在干涉图的获取和干涉数据采集方面作相应的处理即可.而这些研究工作对干涉成像光谱技术和干涉成像光谱仪的理论研究、技术创新、研制、性能改进、应用和工程化都具有理论与实践指导意义.

[1] Rafert J B, Sellar R G, Blatt J H 1995 *Appl. Opt.* **34** 7228
 [2] Matthew P D, Mohammad A K 1992 *Appl. Opt.* **31** 6096
 [3] John Otten III L, Eugene W B 1995 *SPIE* **2480** 418
 [4] Zhang C M, Zhao B C, Xiang L B 2004 *Appl. Opt.* **43** 6090
 [5] Zhang C M, Xiangli B, Zhao B C 2004 *Pure Appl. Opt.* **6** 815
 [6] Zhang C M, Xiangli B, Zhao B C 2003 *Optics Communications* **227** 221

[7] Zhang C M, Xiangli B, Zhao B C 2002 *Optics Communications* **203** 21
 [8] Zhang C M, Xiangli B, Zhao B C 2000 *SPIES* **4087** 957
 [9] Zhao B C, Li C F, Xue M Q 1988 *Acta Phys. Sin.* **37** 1499 (in Chinese) 赵葆常、李春芳、薛鸣球 1988 *物理学报* **37** 1499
 [10] Glenn S R, Boreman G D, Laurel E K 2002 *Proceeding of SPIE* 389
 [11] Robert A, Neville, Sun Lx 2003 *Proceeding of SPIE* 144
 [12] Robert A, Neville, Sun Lx, Karl Staenz 2004 *Proceeding of SPIE* 208

- [13] Cutter M A , Johns L S , Lobb D R , Williams T L 2003 *Proceeding of SPIE* 392
- [14] Robert J Be 1972 *Introductory Fourier Transform Spectroscopy* (New York :Academic) p51
- [15] Deng Y Q , Wu Z B , Chen S H , Chai L , Wang Q Y , Zhang Z G 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 3716(in Chinese) [邓玉强、吴祖斌、陈盛华、柴路、王清月、张志刚 2005 物理学报 **54** 3716]
- [16] Sheng L Y , Jia W Y 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 5574(in Chinese)
- [17] He Z Y 1983 *Theory and Application of Digital Signal Processing* (Beijing : POSTS&TELECOM PRESS) p282(in Chinese) [何振亚 1983 数字信号处理的理论与应用(北京人民邮电出版社) 第 282 页]
- [18] Cai Y , Lin Q 2004 *Chin. Phys.* **13** 1026
- [19] Wu P , Lü B D , Chen T L 2005 *Chin. Phys.* **14** 1130
- [盛利元、贾伟尧 2005 物理学报 **54** 5574]

A new method for spectrum reproduction and interferogram processing^{*}

Jian Xiao-Hua¹⁾ Zhang Chun-Min¹⁾ Zhao Bao-Chang²⁾

1)(*School of Science , Xi 'an Jiaotong University , Xi 'an 710049 , China*)

2)(*The Spatial Optics Department of Xi 'an Institute of Optics and Precision Mechanics , Academia Sinica , Xi 'an 710048 , China*)

(Received 4 April 2006 ; revised manuscript received 22 August 2006)

Abstract

On the basis of researchon the theory and mathe matics of interference data collection of the spatially modulated polarization interference imaging spectrometer designed by us , this paper mainly analyses and compares three different methods of spectrum reconstruction and interferogram processing. Specially , the authors introduce the nonparametric model of Music algorithm which is maturely used in power spectrum estimation into the spectrum reconstruction processing for the first time. This method prodigiously improves the resolution of reproduced spectrum , and provides a better math matic model for the improvement of resolving power in spectrum reproduction.

Keywords : spatial modulation , polarization interference imaging spectrometer , spectrum reproduction , Music algorithm

PACC : 4230K , 0765 , 4225H

^{*} Project supported by the State Key Program of National Natural Science of China(Grant No. 40537031) ,the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 40375010 60278019) ,the Shanxi Program of Science and Technology , China(Grant No. 2005K04-G18) and the " 985 " Project of Xi 'an Jiao Tong University .