

doi:10.3788/gzxb20184712.1228001

空间外差信号提取中多重信号分类算法准则的影响

王新强^{1,3}, 王欢^{1,3}, 熊伟², 叶松^{1,3}, 汪杰君^{1,3}, 张文涛^{1,3}, 王方原^{1,3}, 甘永莹^{1,3}

(1 桂林电子科技大学 电子工程与自动化学院, 广西 桂林 541004)

(2 中国科学院安徽光学精密机械研究所 通用光学定标与表征技术重点实验室, 合肥 230031)

(3 广西光电信息处理重点实验室, 广西 桂林 541004)

摘 要: 基于空间外差光谱特性, 针对传统傅里叶变换算法在光谱复原中的局限性, 引入现代谱估计的多重信号分类 MUSIC 算法进行空间外差信号光谱复原, 采用自回归传递函数准则 (CAT) 对影响谱估计效果的信号空间维数值进行估计。测试结果显示 CAT 准则直接定维值与最佳结果存在偏差, 将 CAT 准则直接定维值减数值 3 作为改进后的新准则重新应用于实测数据光谱复原。改进的 CAT 准则与 MUSIC 算法配合能够很好地适用于空间外差干涉数据, 光谱复原效果优于直接傅里叶变换结果。以光谱角度匹配和均方误差作为改进 CAT 准则的 MUSIC 算法谱估计效果评价指标, 与理想光谱相比, MUSIC 算法对钾盐双谱峰信号处理后复原光谱相似度达到 0.764, 均方误差为 0.040, 对氙灯多谱峰信号和处理结果分别为 0.806 和 0.046, 复色光结果分别为 0.988 和 0.089。采用改进的 CAT 准则进行自适应定维的 MUSIC 算法对空间外差光谱复原具有一定优势, 提高了功率谱复原效果。

关键词: 遥感; 空间外差光谱仪; 多重信号分类算法; 定维

中图分类号: O433.4

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2018)12-1228001-8

Criterion Influence of Multiple Signal Classification Algorithm for Spatial Heterodyne Signal Extraction

WANG Xin-qiang^{1,3}, WANG Huan^{1,3}, XIONG Wei², YE Song^{1,3}, WANG Jie-jun^{1,3},
ZHANG Wen-tao^{1,3}, WANG Fang-yuan^{1,3}, GAN Yong-ying^{1,3}

(1 School of Electronic Engineering and Automation, Guilin University of Electronic Technology,
Guilin, Guangxi 541004, China)

(2 Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

(3 Guangxi Key Laboratory of Optoelectronic Information Processing, Guilin, Guangxi 541004, China)

Abstract: To overcome the limitations of traditional Fourier transform algorithm in spectral restoration, a modern spectral estimation method, multiple signal classification (MUSIC) algorithm, is introduced to recover spatial heterodyne signals based on the characteristics of spatial heterodyne spectroscopy. Criterion Autoregressive Transfer function (CAT) criterion is used to estimate the spatial dimension. The results show that there is a deviation between direct fixed dimension value by CAT criterion and the optimal one, while the direct fixed dimension value minus 3 can be regarded as a new improved criterion for spectral restoration. When applied to the spatial heterodyne interference data, the spectral restoration results of this improved CAT criterion as well as its related MUSIC algorithm is better than those of direct Fourier transform. Spectral Angel Mapper (SAM) and Mean-Squared Error (MSE) are used as the

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 41561079), 广西自动检测技术与仪器重点实验室基金 (Nos. YQ16105, YQ17106, YQ17108), 广西中青年教师基础能力提升项目 (No. 2017KY0192) 和桂林电子科技大学创新团队项目资助

第一作者: 王新强 (1977-), 男, 高级实验师, 硕士, 主要研究方向为光学测量和高光谱遥感等. Email: xqwang2006@126.com

通讯作者: 甘永莹 (1990-), 女, 助教, 硕士, 主要研究方向为光学测量和高光谱遥感等. Email: sugargan@163.com

收稿日期: 2018-07-12; **录用日期:** 2018-09-13

<http://www.photon.ac.cn>

performance evaluation indexes. Compared with the ideal spectrum, SAM of MUSIC algorithm restoration spectra is 0.764 and MSE is 0.040 for potassium bimodal peak signal processing. For the multi-spectrum peak signal processing of Ne lamp, SAM is 0.806 and MSE is 0.046. The results of polychromatic light are 0.988 and 0.089, respectively. Indicating that this adaptively dimensioned MUSIC algorithm with improved CAT criterion has advantages to the spatial heterodyne spectral restoration and improves the power spectrum restoration effect.

Key words: Remote sensing; Spatial heterodyne spectrometer; Multiple signal classification algorithm; Fixed dimension

OCIS Codes: 300.6300; 300.6310; 300.6190; 330.6130

0 引言

空间外差光谱技术(Spatial Heterodyne Spectroscopy, SHS)是20世纪90年代由DOHI和SUSUKI提出的一种新型空间调制型高光谱分析技术,综合了光栅和迈克尔逊干涉仪的特点,在窄频谱范围能获取极高的光谱分辨率和信噪比^[1-3].与传统干涉仪相比,空间外差光谱仪凭借超高分辨率、高通量、瞬态探测等优势,受到国内外广泛关注,同时光谱仪体型小、功耗低,符合小型化卫星载荷的需求.目前,该技术在大气微物质成分探测、大气污染探测、气象观测、卫星遥感探测等方面都具有十分重要的应用^[4-6].

空间外差光谱仪捕获到观测物质的干涉图信息,利用干涉图与复原光谱间的傅里叶变换关系提取出目标光谱信号.传统的傅里叶变换法提取的光谱存在分辨率低、估计谱线浮动剧烈、混叠误差严重等缺陷^[7-8].简小华等利用现代谱估计中的多重信号分类(Multiple Signal Classification, MUSIC)算法对传统傅里叶变换单色光谱信号进行提取,光谱复原效果很好,但在复色光谱复原方面还存在一系列问题,而且MUSIC算法对于信号空间维数 p 的取值十分敏感,虽然手工调试能获得最佳维数 p 值,但过程繁琐、耗时长,当需要处理数据量较大时,手工调试将无法完成工作^[9-15].

本文基于空间外差光谱技术的基本特性,将多重信号分类算法应用于空间外差干涉图功率谱估计,采用CAT准则对影响MUSIC算法谱估计结果的信号空间维数 p 进行自适应定维研究.结果表明改进的CAT准则结合MUSIC算法能很好地实现空间外差干涉图的光谱复原,提高光谱信噪比与复原效果.

1 空间外差光谱仪

空间外差光谱仪基于迈克尔逊干涉仪的基本构架,不同之处是光路中的两平面反射镜都替换成了同规格的闪耀光栅,光学系统结构如图1.入射光先通过分束镜的反射和透射分为射向G1、G2的两相干光,分开的两光束经过光栅后向衍射重新合束到CCD方向形成干涉条纹图,条纹方向与光栅刻线方向平行,条纹空间频率与入射光波长相关,连续光的条纹图为波段中各单色光的条纹图叠加.

空间外差光谱仪采用空间外差调制方式获取干涉图数据,当入射光强为 $B(\sigma)$ 时,干涉图为

$$I(x) = \int_{-\infty}^{\infty} B(\sigma) \{1 + \cos[2\pi(4(\sigma - \sigma_0)x \tan \theta)]\} d\sigma \quad (1)$$

式中, σ_0 、 σ 分别为零频波数(系统基频)和入射光波数,光轴与光栅法线夹角为 θ , x 为探测器像元尺寸.光谱仪获取的干涉图通常采用傅里叶变换进行光谱复原,然而以傅里叶变换为基础的光谱复原方法,虽然运算简单、速度快,但存在分辨率低、谱线起伏明显等缺陷.因此引入新的光谱复原方法以提高复原光谱精度具有实用意义.

2 多重信号分类算法

2.1 多重信号分类算法原理

MUSIC算法是现代谱估计中的一种功率谱估计方法,基本原理是对信号 T_x 进行特征分解,获取两个

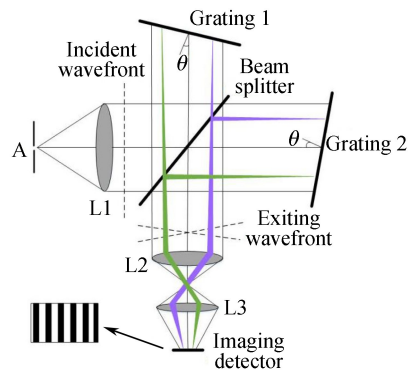


图1 空间外差光谱仪结构图
Fig.1 Schematic diagram of SHS

相互正交的子空间,分别对应信号子空间 T_s 和噪声子空间 T_n ,再利用其正交性构造出空间谱函数.过程可表示为

$$T_x = T_s + T_n \quad (2)$$

式中, $T_s = \sum_{i=1}^M \lambda_i V_i V_i^H$, $T_n = \sigma^2 \sum_{i=1}^{p+1} V_i V_i^H$. 定义 $e_i = [1, \exp(j\omega_i), \dots, \exp(j\omega_i p)]^T$, $i = 1, 2, 3, \dots, M$. 由两子空间的正交性,构造出的功率谱估计函数为

$$P_x(\omega) = \frac{1}{\sum_{k=M+1}^{p+1} a_k |e^H(\omega) V_k|^2}, M < p \quad (3)$$

式中, ω 为频率, e 代表信号矢量, M 代表干涉图数据的取样点数, p 为信号空间特征向量维数.理论上 $\omega = \omega_i$ 时, $P_x(\omega) \rightarrow \infty$,事实上误差的存在导致该值不趋于无穷,有一个凸出的峰值存在于正弦信号频率上或者其周围,对应干涉图信号的功率谱.

令 $a_k = 1, k = M+1, \dots, p+1$,可得到 MUSIC 算法的功率谱估计式,即为

$$P_{\text{MUSIC}}(\omega) = \frac{1}{e(\omega) \left(\sum_{k=M+1}^{p+1} V_k V_k^H \right) e^H(\omega)} \quad (4)$$

MUSIC 算法通过谱峰搜索进行功率谱估计时,维数 p 对功率谱估计效果有重要影响,尽管其取值范围可由实际经验法则获取,但精确定维还需进一步手动调试给出,当需处理的数据较多时,工作量很大,因此自适应定维十分必要.

2.2 定维准则

MUSIC 算法谱估计效果受维数 p 影响表现为: p 太小将导致功率谱图过于平滑,分辨能力降低,某些谐波成份无法分辨; p 过大会产生虚假峰谱,小信号峰谱容易被虚假噪声所掩盖,当信号特征峰谱数多时,可能出现光谱信号提取不完整或造成小峰谱信号缺失.因此,确定最佳维数 p 十分重要. MUSIC 算法维数 p 的确定,可用准则有 Akaike 信息论准则(Akaike Information Criterion, AIC)、最终预测误差(Final Prediction Error, FPE)、贝叶斯信息准则(Bayesian Information Criterion, BIC)、自回归传递函数准则(Criterion Autoregressive Transfer function, CAT)等.

AIC 准则

$$\text{AIC}(p) = N \ln E + 2N \quad (5)$$

FPE 准则

$$\text{FPE}(p) = \frac{N+p}{N-p} E \quad (6)$$

BIC 准则

$$\text{BIC}(p) = N \ln E + p \ln E \quad (7)$$

CAT 准则

$$\text{CAT}(p) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{\infty} E_i - E_p \quad (8)$$

式(5)~(8)中, N 为采样数据点数, E 代表干涉图数据的方差.对这四种准则分别进行测试,进而确定最佳的自适应定维方法.

3 数据处理与分析

实验使用的三组数据均由空间外差光谱仪采集,分别为多色光钾盐燃烧信号、氖灯信号及复色光积分球信号.多色光干涉图分别如图 2(a)、(b)所示,复色光如图 2(c)所示,三幅干涉图尺寸均为: 1024×1024 . 钾盐信号两个特征峰分别为 766.49 nm 和 769.896 nm,光谱分辨率 0.029 nm,波长范围: 756.8~771.7 nm; 氖灯光谱包含 6 个特征峰,波长范围: 923~954 nm; 积分球波长范围与氖灯相同.

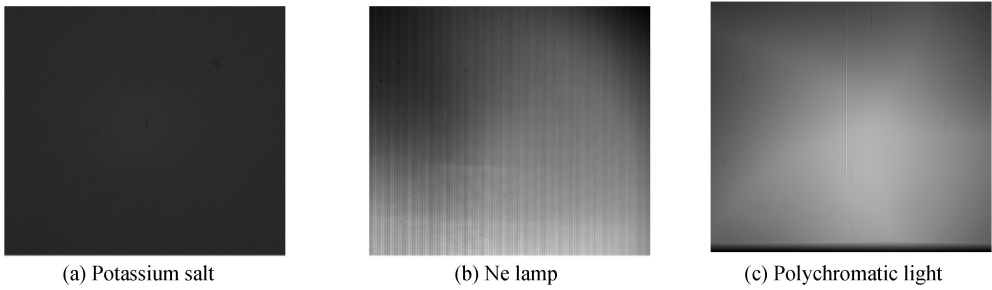


图2 二维干涉图

Fig.2 Two-dimensional interferogram

3.1 傅里叶变换光谱

任取二维干涉图中的一行数据,对其进行切趾、去基线处理后,采用傅里叶变换获取信号的一维复原光谱,并通过特征信号谱线的像元坐标和波长关系进行波长定标.为了方便比较,光谱均作了归一化处理.可以看出:图 3(a)中光谱 769.896 nm 特征峰已经被噪声覆盖,无法识别;图 3(b)中出现一些小的凸起,易被误认为信号峰谱,造成误识别.图 3(c)的积分球光谱受到随机噪声严重干扰.可见采用直接傅里叶变换得到的复原光谱包含了较多的影响因素,不利于应用.因此将现代谱估计的 MUSIC 算法引入,分析其影响因素及光谱复原效果.

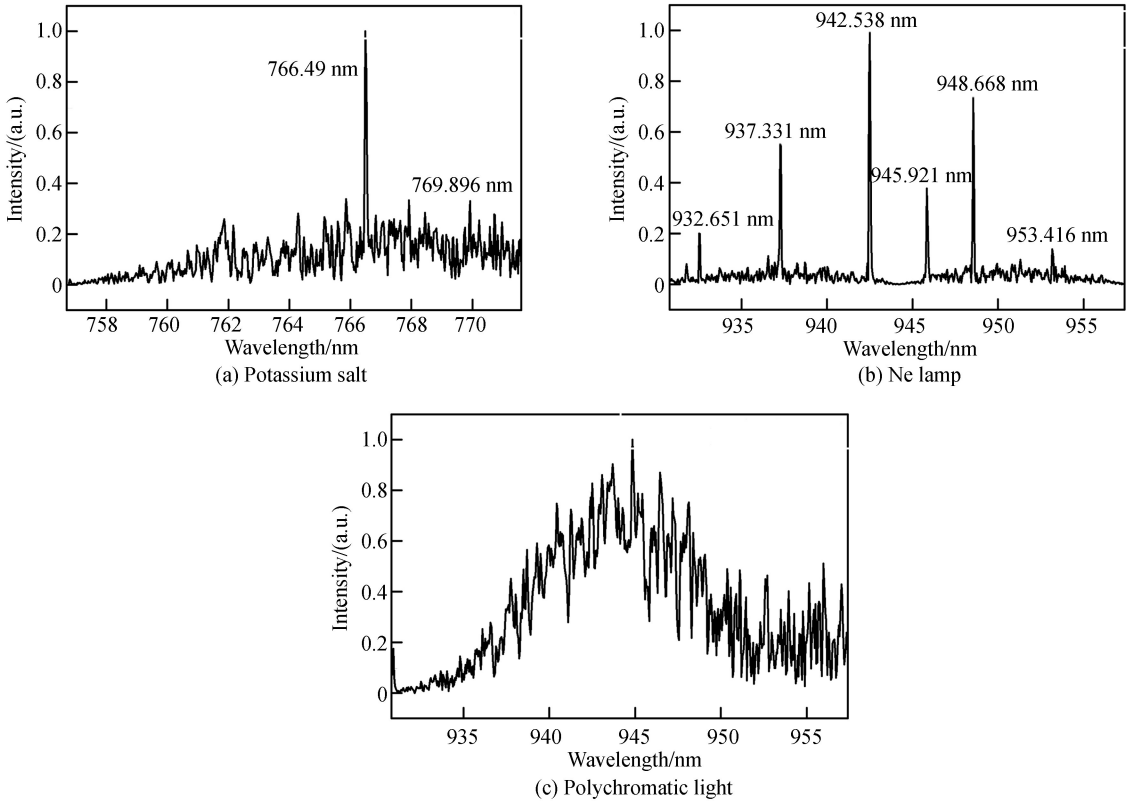


图3 FFT 变换光谱

Fig.3 FFT transform spectrum

3.2 定维测试

使用 MUSIC 算法进行光谱复原,确定最佳维数 p 是首要工作.采用上述四种准则进行定维测试,准则对应函数值取最小时对应的 p 值被认定为最佳值.图 4 为用 AIC、FPE、BIC 和 CAT 四种准则对氖灯信号定维后 MUSIC 算法的功率谱估计效果图.可以看出四种准则定维的 MUSIC 算法复原光谱对信号噪声的滤除效果都很明显,AIC、FPE、BIC 三种准则定维复原结果出现信号峰谱趋势变化大,对小信号提取不完全现象,适用性差,应予以剔除.CAT 准则直接定维后其效果相对优于其余准则,但是 CAT 准则定维对应 p 值是否最佳,有待进一步研究.

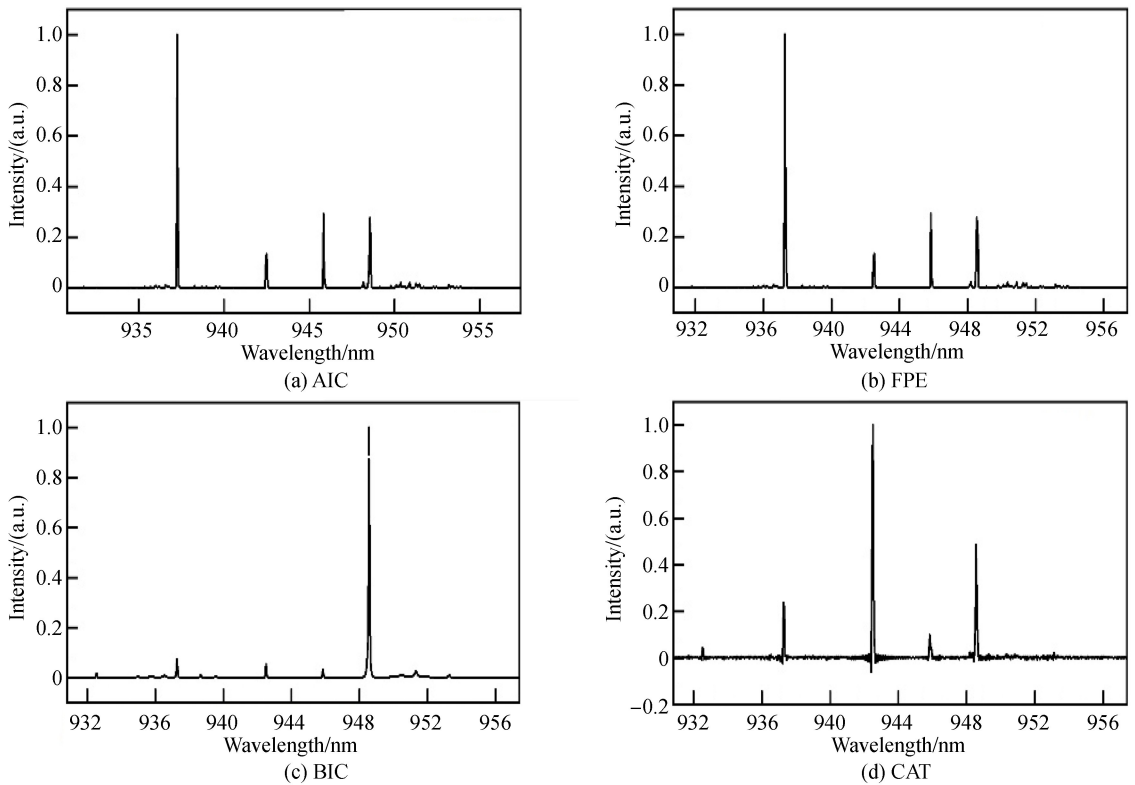


图 4 四种准则的氖灯复原光谱图

Fig.4 Ne lamp recovery spectra of four criteria

基于式(1)仿真理想单峰谱到 20 峰谱的 20 组空间外差干涉图数据,加入随机噪声得到包含噪声的干涉图数据.采用 MUSIC 算法对有噪声数据进行光谱复原,针对 CAT 准则开展自适应定维测试,分析 CAT 直接定维与手动调节定维最佳结果偏差值.CAT 准则直接定维存在过估计偏差,将 CAT 准则直接获取的维数 p 值记为 P_1 ,手动调节获取的最佳值记为 P_2 ,两者差值记为 ΔP .以仿真信号的谱峰数为横坐标,偏差 ΔP 为纵坐标作点散图,结果如图 5 所示,可以看出 CAT 直接定维与手动调节定维最佳结果偏差值基本为一水平直线,纵轴截距为 3.因此以 MUSIC 算法对空间外差干涉图进行光谱复原处理,其自适应定维准则可由 CAT 准则直接定维值减 3 后得到.

3.3 MUSIC 算法复原光谱

将改进后的 CAT 准则重新应用于 MUSIC 算法,对钾盐信号与氖灯信号进行光谱复原,结果如图 6.可以看出图 6(a)钾盐 769.896 nm 特征峰和图 6(b)氖灯 953.416 nm 特征峰信号已被有效提取,光谱噪声抑制效果明显,说明改进的 CAT 准则的 MUSIC 算法对空间外差干涉图的多光谱复原具有良好效果.

对连续光采用积分球实测数据.任取积分球干涉图中的单行数据,直接采用傅里叶变换方法获得的光谱结果如图 3(c),可以看出随机噪声对光谱线型产生了严重干扰.将改进准则 MUSIC 算法应用于同一组干涉数据,处理结果如图 7(b),可以看出该算法在实现光谱复原的基础上,同时对随机噪声进行了有效的抑制.以实测低噪声积分球光谱为参照[图 7(a)],将单行数据的 MUSIC 算法复原光谱与参考光谱对比,可以看出两者线形具有较好一致性,说明 MUSIC 算法对复色光谱复原也有效.

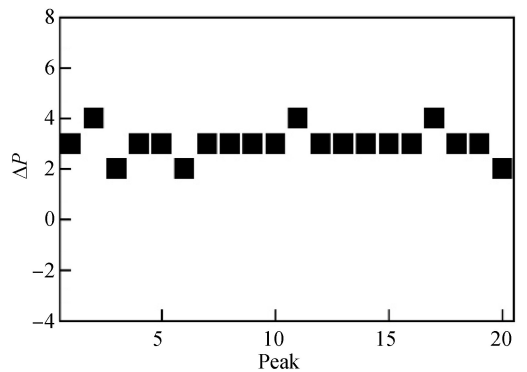


图 5 CAT 定维偏差散点图

Fig.5 CAT fixed dimensional deviation scatter chart

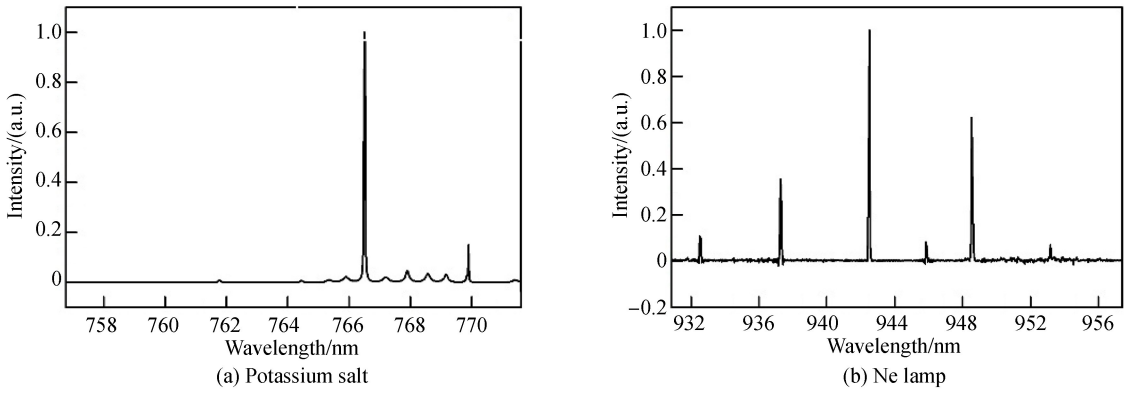


图6 维数矫正后的谱估计结果
Fig.6 Spectral estimation results after dimensionality correction

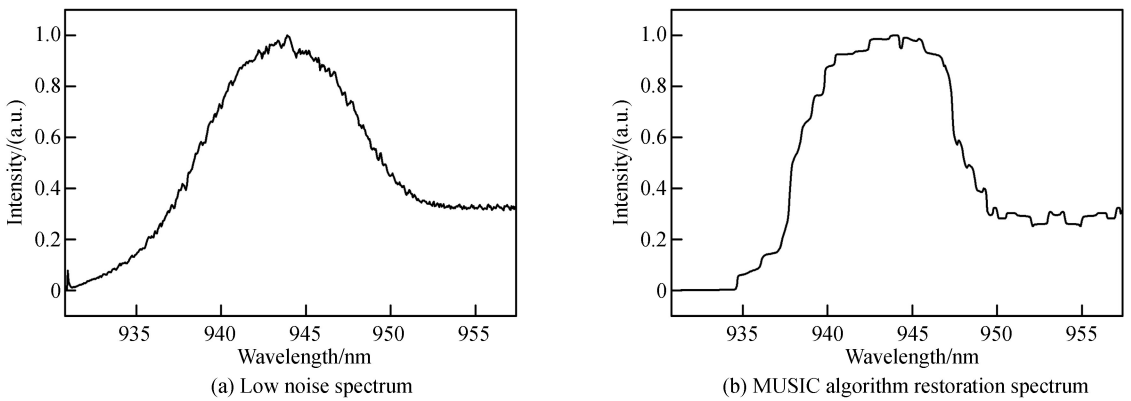


图7 复色光光谱复原结果
Fig.7 Results of polychromatic light spectral restoration

3.4 性能分析

为了定量说明改进 CAT 准则 MUSIC 算法效果,仿真理想钾盐和氖灯光谱,结果如图 8.以理想参考光谱,与改进 CAT 准则 MUSIC 算法复原光谱进行比较.定量标准分别采用光谱角度匹配(Spectral Angel Mapper, SAM)和均方误差(Mean-Squared Error, MSE).

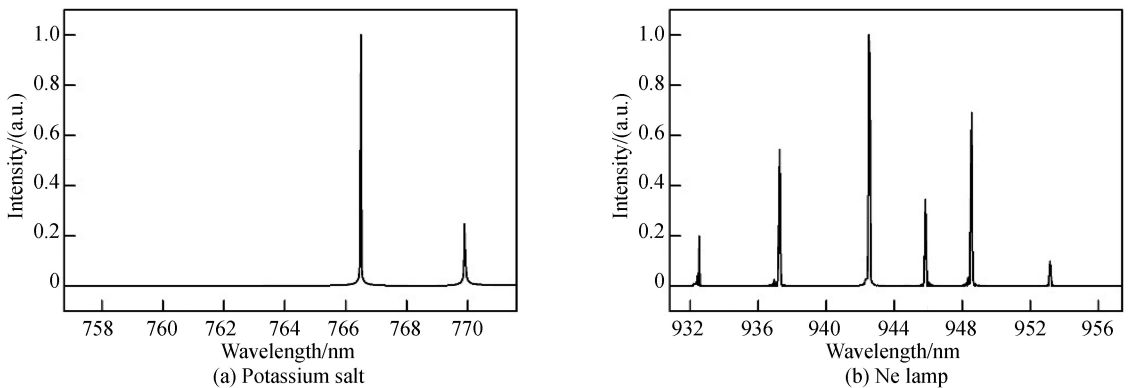


图8 仿真理想光谱
Fig.8 Simulation ideal spectrum

光谱相似角度 SAM 是通过计算目标光谱和参考光谱的广义夹角来表示其匹配程度,夹角的余弦定义为

$$\cos \theta = \frac{(A, B)}{|A| |B|} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i B_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n A_i^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n B_i^2}} \quad (9)$$

式中, A 和 B 为目标光谱和参考光谱, θ 为两光谱矢量之间的夹角, θ 越小相似度越高即 $\cos \theta$ 越接近于 1 时相似度越高.

均方误差 MSE 的表达式为

$$\text{MSE} = \sqrt{\frac{\sum (\text{Ideal} - \text{Actual})^2}{\text{lenght}(\text{Actual})}} \quad (10)$$

式中, Ideal 为理想参考信号, Actual 为实际信号. 表 1 为目标光谱和理想光谱 SAM 和 MSE 相似度对比结果, 可以看出, 改进 CAT 准则对钾盐和氖灯定维后, MUSIC 算法复原光谱相较于理想光谱, 光谱相似度 SAM 均高于 0.75, 两者均方误差小于 0.05. 复色光以低噪声测量光谱作为参考, SAM 和 MSE 结果分别为 0.988 和 0.089. 定量结果说明对空间外差干涉数据采用 MUSIC 算法进行光谱复原具有一定优势.

表 1 相似度计算结果

Table 1 The results of similarity calculation

	Potassium salt	Ne lamp	Polychromatic light
$\cos \theta$	0.764	0.806	0.988
MSE	0.040	0.046	0.089

4 结论

基于空间外差技术的大气高光谱探测是目前国内外研究的热点, 对该光谱仪所获取的干涉图数据进行光谱复原是应用的必要环节. 针对传统傅里叶变换在空间外差干涉图光谱复原中的缺陷, 将 MUSIC 算法应用于干涉图光谱复原处理. 采用 CAT 准则对影响算法谱估计效果的维数 p 进行测试, 扣除维数偏差后, 能达到自适应定维且 MUSIC 算法谱复原效果良好. 测试结果表明: 采用改进 CAT 准则定维的 MUSIC 算法对空间外差光谱进行光谱复原, 提高了信噪比和光谱复原效果. 此外该方法影响参数少, 便于实现, 与传统光谱复原方法相比, MUSIC 算法对于空间外差光谱信号提取具有独特优势.

参考文献

- [1] HARLANDER J M, ROESLER F L, CARDON J G, *et al.* SHIMMER: a spatial heterodyne spectrometer for remote sensing of earth's middle atmosphere[J]. *Applied Optics*, 2002, **41**(7): 1343-1352.
- [2] MATHIAS L, JEAN-CLAUDE D. Concerning the spatial heterodyne spectrometer[J]. *Optics Express*, 2016, **24**(2): 1829-1839.
- [3] SHEN Jing, XIONG Wei, SHI Hai-liang, *et al.* Phase detection and drift correction for Doppler asymmetric spatial heterodyne interferometer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, **46**(3): 0910003.
沈静, 熊伟, 施海亮, 等. 非对称空间外差干涉仪相位探测和漂移校正[J]. *光子学报*, 2017, **46**(3): 0910003.
- [4] HARLANDER J M, ROESLER F L, REYNOLDS R J, *et al.* Differential field-Widened spatial heterodyne spectrometer for investigations at high spectral resolution of the diffuse far- ultraviolet 1548-A emission line from the interstellar medium[C]. SPIE, 1993, **2006**: 139-148.
- [5] FOSTER M J, STOREY J, ZENTILE M. Spatial-heterodyne spectrometer for transmission-Raman observations[J]. *Optics Express*, 2017, **2**(25): 1598-1604.
- [6] YE Song, GAN Yong-ying, XIONG Wei, *et al.* Baseline correction of spatial heterodyne spectrometer using wavelet transform[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, **45**(11): 209-213.
叶松, 甘永莹, 熊伟, 等. 采用小波变换的空间外差光谱仪基线校正[J]. *红外与激光工程*, 2016, **45**(11): P209-213.
- [7] POWELL I, CHEBEN P. Modeling of the generic spatial heterodyne spectrometer and comparison with conventional spectrometer[J]. *Applied Optics*, 2006, **45**(36): 9079-9086.
- [8] ZHANG Wei-kang, WEN De-sheng, SONG Zong-xi. Spectrum reconstruction in interference spectrometer based on sparse Fourier transform[J]. *Optik*, 2018, **154**(2018): 157-164.
- [9] JIAN Xiao-hua, ZHANG Chun-min, ZHAO Bao-chang, *et al.* A new method for spectrum reproduction and interferogram processing[J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, **56**(2): 824-830.
简小华, 张淳民, 赵葆常, 等. 研究干涉图处理与光谱复原的一种新方法[J]. *物理学报*, 2007, **56**(2): 824-830.

- [10] POTTS D, TASCHE M, VOLKMER T. Efficient spectral estimation by MUSIC and ESPRIT with application to sparse FFT[J]. *Frontiers in Applied Mathematics and Statistics*, 2016, **2**: 2297-4687.
- [11] FU Zhang-fang, LIU Xue-bin. Spectrum reconstruction algorithms based on modern spectrum estimation[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(9): 1091-1096.
付占方, 刘学斌. 基于现代谱估计技术的干涉光谱复原算法[J]. 光子学报, 2013, **42**(9): 1091-1096.
- [12] FAN Xian-guang, WANG Xiu-fen, WANG Xin, *et al.* Research of the raman signal de-noising method based on feature extraction[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2016, **36**(12): 4082-4087.
范贤光, 王秀芬, 王昕, 等. 基于特征提取的低信噪比拉曼光谱去噪方法研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2016, **36**(12): 4082-4087.
- [13] POTTS D, TASCHE M, VOLKME T. Efficient spectral estimation by MUSIC and ESPRIT with application to sparse FFT[J]. *Frontiers in Applied Mathematics and Statistics*, 2016, **2**(1): 2297-4687.
- [14] AYDIN S. Determination of autoregressive model orders for seizure detection[J]. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 2010, **18**(1): 23-30.
- [15] NIKOLIĆ M, JOVANOVIĆ D P, LIM Y L, *et al.* Approach to frequency estimation in self-mixing interferometry: multiple signal classification[J]. *Applied Optics*, 2013, **52**(14): 3345-3355.

Foundation item: The National Natural Science Foundation of China(No. 14561079), the Automatic Detection Technology and Instrument Key Laboratory Foundation of Guangxi(Nos. YQ16105, YQ17106, YQ17108), the Middle and Young Teachers Basic Ability Improvement Project of Guangxi (No.2017KY0192), the Innovation Team Project of Guilin University of Electronic Technology
引用格式: WANG Xin-qiang, WANG Huan, XIONG Wei, *et al.* Criterion Influence of Multiple Signal Classification Algorithm for Spatial Heterodyne Signal Extraction[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(12): 1228001
王新强, 王欢, 熊伟, 等. 空间外差信号提取中多重信号分类算法准则的影响[J]. 光子学报, 2018, **47**(12): 1228001