

doi: 10.3788/gzxb20124105.0623

静态双增益阿达玛光谱仪光谱的重叠错位分析与校正

郝鹏, 吴一辉

(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, 长春 130033)

摘要:为平衡光栅色散型光谱仪光通量、系统信噪比和光谱分辨率之间的矛盾,介绍了一种基于微狭缝阵列的静态双增益阿达玛光谱仪.在分析其实现静态双增益工作原理的基础上,阐述了由于阿达玛编码模板多狭缝阵列引起的光谱重叠的原因.为实现静态双增益阿达玛光谱仪光谱重叠校正,理论推导了光谱偏移量与阿达玛编码模板狭缝空间位置之间的关系,以及分光后某波长空间错位量与码元(狭缝)空间位置、波长之间的关系.仿真实验验证了此方法简单有效,无需复杂计算,修正速度快,易于编程实现.

关键词:光谱仪;阿达玛变换;狭缝阵列;光谱混叠

中图分类号: O433.4

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2012)05-0623-4

0 引言

对于光栅色散型光谱仪,入射狭缝为系统的入射孔径,系统的光谱分辨率与通光量成反比.系统的信噪比因狭缝通光量有限而受到很大的限制,同时在给定光通量和系统噪声的情况下,系统信噪比受限,也得不到进一步的优化^[1-2].基于类似于傅里叶变换光谱多通道光谱调制技术的阿达玛光谱仪,使用编码的入射狭缝来代替传统的狭缝,对扩展的入射面进行编码,消除了传统狭缝对光谱系统的限制,信号的多通道同时检测,提高了其入射光通量、仪器的信噪比,可实现光通量、信噪比和分辨率两种增益^[3-5].

目前所研制的阿达玛成像光谱仪,一般将阿达玛模板作为一个宽狭缝对待,视参与编码的各空间分量为一个整体,近似认为 CCD 各列所对应的各空间分量谱段的一致性,常常忽略狭缝阵列空间错位造成的光谱重叠影响. Tang H W 等为了减小这种影响,对于尺寸较大的模板,采取在模板与分光装置之间放置柱面透镜的做法,对模板与目标像进行压缩^[6].这种方法不但增加了仪器的复杂度,而且未能从根本上解决光谱重叠问题.而对于静态双增益阿达玛光谱仪,狭缝阵列空间错位造成的光谱重叠直接影响其光谱分辨率,采用上述方法并不能解决问题.本文通过推导光谱偏移量与阿达玛编码模板狭

缝空间位置之间的关系,校正静态双增益阿达玛光谱仪由于阿达玛模板狭缝阵列带来的光谱重叠.

1 静态双增益阿达玛光谱仪工作原理

静态双增益阿达玛光谱仪是在传统的光谱仪中,用编码模板代替入射狭缝,由阿达玛编码模板(多狭缝阵列)、分光系统和数据采集系统构成,其工作原理如图 1.阿达玛模板代替了常规光栅分光装置的入射狭缝,经模板编码的各狭缝的像经准直反射镜准直、光栅分光后,聚焦反射镜聚焦于面阵探测器的靶面上.

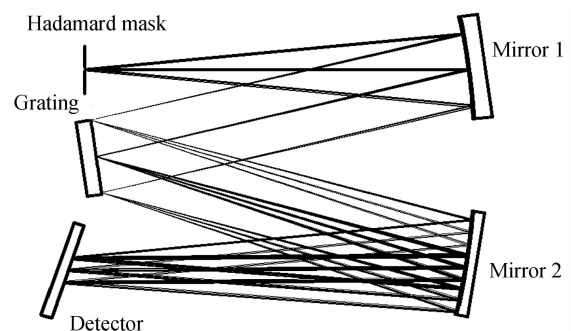


图 1 静态双增益阿达玛光谱仪原理

Fig. 1 Principle chart of static double-gain Hadamard spectrometer

对于传统单狭缝光谱仪来说,光通量、系统信噪比和光谱分辨率三个关键参量相互制约,增大狭缝的尺寸,以及增加狭缝数目即增加系统的光通道,都

基金项目:国家自然科学基金(No. 60971025, No. 11034007, No. 61102023)、国家高技术研究发展计划(No. 2012AA040503)和中科院知识创新工程重要方向(No. KJ9X2-YW-H18, No. KGCX2-YW-913-1)资助

第一作者:郝鹏(1982—),男,副研究员,博士,主要研究方向为集成微光机电系统. Email: hp312@126.com

通讯作者:吴一辉(1965—),女,研究员,博士,主要研究方向为集成微光机电系统. Email: yihuiwu@ciomp.ac.cn

收稿日期:2011-06-08; **修回日期:**2011-07-14

可以提高系统的光通量和信噪比^[7]. 狭缝的尺寸的增加将直接导致分辨率的下降. 单独在光谱维上增加狭缝的数目, 如图 2(a), 各狭缝对应的成像光谱没有保留任何表征其原始空间位置的信息, 且其本身也不具有独立性, 所以无法根据叠加后的光谱还原各狭缝对应的原始光谱信息, 说明这种基于均匀狭缝系统的成像光谱叠加是不可逆的, 系统分辨率不可避免的恶化. 静态双增益阿达玛光谱仪的阿达玛编码模板为多个微狭缝的阵列, 如图 2(b)为最简单的三阶阿达玛编码模板, x 方向(光谱维方向)为模板的行向, y 方向(垂直于光谱维的方向)为模板的列向. 此时每个狭缝都具有不同的列方向的编码形式, 后端狭缝的成像光谱保留了其具有独立性的空间位置信息, 这样就可以通过阿达玛逆运算, 从叠加的光谱信息中还原每个狭缝所对应的光谱信息. 通过单波长标定获得各个列狭缝的空间信息, 最终剔除其空间影响, 将各个狭缝的光谱信息进行综合处理获得真正的光谱信息(如图 3).

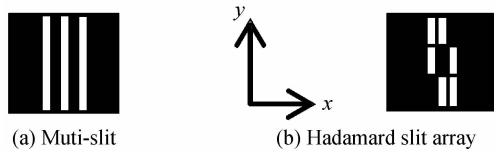


图 2 两狭缝模板
Fig. 2 Two slit mask

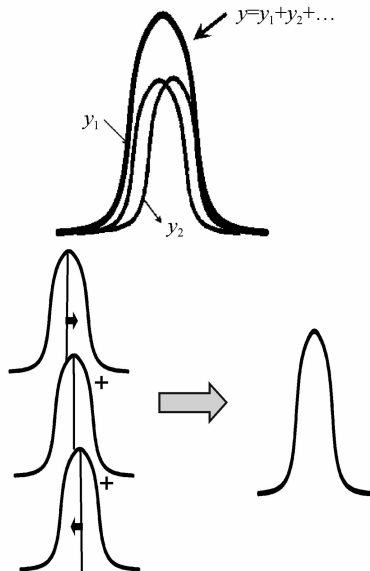


图 3 阿达玛光谱仪的光谱还原原理
Fig. 3 Principle of Hadamard inversion transforms

从数学上讲, 阿达玛变换实际上是统计学中的称量设计在光学中的应用, 它的理论模型是法国数学家 Hadamard 提出的一种 n 阶矩阵方程^[8]. 静态双增益阿达玛光谱仪的阿达玛编码矩阵为 S , 后端探测器垂直于光谱维方向上相对应编码矩阵的行同样分成几行, 一一对应编码矩阵的各行, 其各个像元

测得的信号 y 可以写成

$$y_i = \sum_{j=1}^n S_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

式中 y_i 为第 i 行某一象元经阿达玛编码模板调制后获得的信号, x_j 为阿达玛编码模板第 i 行 j 列微狭缝处的入射信号, 当阿达玛编码模板第 i 行列处狭缝打开时 S_{ij} 为 1, 否则为 0. 写成矩阵形式为

$$Y = SX \quad (2)$$

求解式(2)可得

$$X = S^{-1}Y \quad (3)$$

2 光谱的错位及混叠

被分析的光谱信号入射到静态双增益阿达玛光谱仪阿达玛编码模板不同位置时, 被不同的码元即不同位置的狭缝所调制, 对于除模板中心位置处码元外的其它码元来说, 皆偏离了光轴, 由光栅方程^[9-10]

$$d(\sin \alpha + \sin \beta) = m\lambda \quad (4)$$

(α, β 分别为入射角和衍射角, d 为光栅常量, m 为衍射级次, λ 为 CCD 某列像元获得的该码元的光谱波长)可知, 偏离光轴处码元(狭缝)入射的光谱, 入射角发生 $\Delta\alpha$ 的偏移, 经光栅分光后, 衍射角也将发生偏移, 这样就将导致 CCD 上同一列像元上接收到的信号为 $\lambda - \Delta\lambda, \lambda, \lambda + \Delta\lambda$ 三者的叠加. 假定模板每个码元(狭缝)的宽度为 X , 准直镜的焦距为 f_1 , 取码元的中心, 偏离光轴的第 i 个码元对准直镜的偏角 $\Delta\alpha$ 为

$$\Delta\alpha = X(2i-1)/2f_1 \quad (5)$$

对于 CCD 上同一列象元其光栅方程为

$$d[\sin(\alpha + \Delta\alpha) + \sin \beta] = m(\lambda + \Delta\lambda_i) \quad (6)$$

联立式(4)和(5), 解可得

$$\Delta\lambda_i = dX(2i-1)\cos \alpha / 2mf_1 \quad (7)$$

即光谱偏移量与码元偏移中心码元的距离和光栅常量 d 成正比, 与光谱级次 m 和准直镜的焦距 f_1 成反比. 由式(7)可以看出偏离模板中心处的码元产生光谱偏移, 其中一端波长变短, 另一端波长变长, 光谱偏移量对称模板中心分布.

对于单一波长来说, 偏离光轴处码元(狭缝)同样经过光谱仪整个光学系统后仍然偏离光轴, 假定 CCD 每个像元的宽度为 Y , CCD 某列像元获得的模板中心位置码元的光谱波长为 λ , 在该波长处偏离光轴的第 i 个码元对应的 CCD 列偏移了 J 个像元, 聚焦镜的焦距为 f_2 , 则衍射角的偏移为

$$\Delta\beta \approx YJ / f_2 \quad (8)$$

其光栅方程为

$$d(\sin(\alpha + \Delta\alpha) + \sin(\beta - \Delta\beta)) = m\lambda \quad (9)$$

与式(4)和(5)联立,由于 $\Delta\alpha \ll 1, \Delta\beta \ll 1$, 可得

$$J = \frac{\cos \alpha}{\sqrt{1 - (m\lambda/d - \sin \alpha)^2}} \frac{f_2 X_i}{f_1 Y} \quad (10)$$

对于给定的光谱仪,其光栅入射角 α 是一定的. 因此,对于某指定波长,被模板不同位置码元调制的各空间偏移量,偏离理想 CCD 列像元的位置可很容易由式(10)求出,进行空间信息的剔除.

3 光谱修正

由前文分析可知,虽然各空间分量间产生光谱偏移,但就各空间分量本身而言,它的光谱分辨率和空间分辨率并未受到较大影响,其分辨率损失主要是由于所对应的编码码元偏离光轴中心所引起.

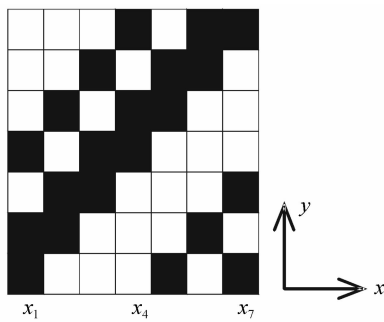


图 4 7 阶阿达玛模板
Fig. 4 Seventh-order Hadamard masking

以 7 阶阿达玛模板为例, x_4 为中心码元列与光轴重合, $x_1, x_2, x_3, x_5, x_6, x_7$ 为偏离光轴各列码元,光谱信号经各码元调制,后端光路准直、分光、聚焦后, $y_1 \sim y_7$ 为垂直于光谱维方向上 CCD 同一列像元获得的信号,由于光谱重叠则实际得到的信号与测试波长之间的关系可用式(11)表示为

$$\begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \\ y_5 \\ y_6 \\ y_7 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \lambda_{x_1} + \Delta\lambda_{x_1} \\ \lambda_{x_2} + \Delta\lambda_{x_2} \\ \lambda_{x_3} + \Delta\lambda_{x_3} \\ x_4 \\ \lambda_{x_5} - \Delta\lambda_{x_5} \\ \lambda_{x_6} - \Delta\lambda_{x_6} \\ \lambda_{x_7} - \Delta\lambda_{x_7} \end{pmatrix} \quad (11)$$

通过阿达玛逆变换对信号进行提取还原,分别得到七条光谱曲线,对应 $x_1, x_2, x_3, x_5, x_6, x_7$ 解得到的光谱曲线上所有波长偏移 $\Delta\lambda_{x_1}, \Delta\lambda_{x_2}, \Delta\lambda_{x_3}, 0, -\Delta\lambda_{x_5}, -\Delta\lambda_{x_6}, -\Delta\lambda_{x_7}$, 其偏移量可由上述公式(7)求得,给定的光谱仪,其光栅入射角 α 是一定的,根据偏移量的大小,可以对偏移的谱线进行回移校正. 然后,剔除由式(10)求出各个波长的空间信息,进行谱线的空间修正. 最终,将回移校正,空间修正后的, CCD 同一列所对应的光谱幅值进行相加,获得最终

的光谱曲线.

为验证本修正方法的可行性和有效性,进行计算机仿真实验. 假设模板尺寸与准直镜物方焦距之比为 0.001, 准直镜与聚焦镜焦距之比为 1:1, 光栅刻线为 600 线/mm, 入射角为 8° , 衍射级次 m 取为 1, 对于波长为 577 nm 的光谱来说,则码元在 CCD 上最大会产生 1.65 nm 的光谱偏移,模板宽度为 140 μm , 像元尺寸为 8 μm 时,模板尺寸变宽产生的光谱空间错位为 9 个像元. 汞灯特征波长 576.96 nm, 579.07 nm, 如未经过光谱重叠校正,将不能分辨出两波长,经过上述方法校正后,则可完全分辨出,如图 5.

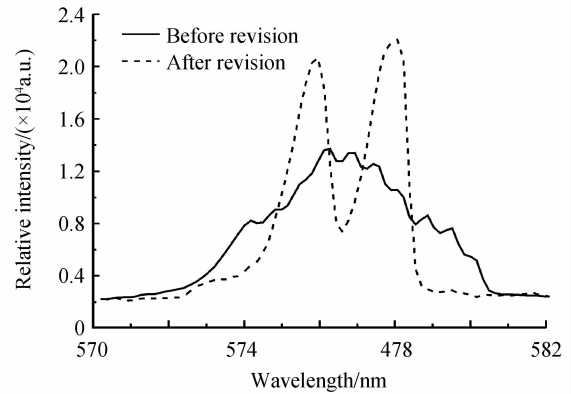


图 5 阿达玛光谱仪校正前后波长曲线对比
Fig. 5 Difference between the before and after revision spectrums

另外,光谱仪的光谱分辨率除狭缝宽度影响外,还与光谱仪光学系统像差和光栅光谱分辨率有关. 多阶阿达玛光谱仪相对于单狭缝光谱仪来说,入射模板的宽度增加,偏离光轴越远处的码元(狭缝)产生的光学系统像差越大,从而其光谱分辨率也就越差. 即使通过剔除空间信息,通过光谱重叠校正,阿达玛光谱仪的光谱分辨率相对于单狭缝光谱仪,光谱分辨率也会变差,由最远处码元(狭缝)的光谱分辨率所决定. 从而可以得出,阿达玛模板阶数的增加,虽然可以提高系统的光通量、信噪比,但同时也给其光学分辨率带来了不好的影响.

4 结论

传统阿达玛变换光谱成像技术将编码模板作为宽狭缝对待,忽略了编码模板尺寸造成的光谱混叠问题. 本文针对编码模板码元偏离光轴带来的光谱波长移动和单波长的空间位移问题,从理论上导出了光谱波长偏移公式和单波长空间位移公式,提出了光谱修正方法,对光谱的回移和空间信息的剔除建立了理论依据,并计算机仿真结果表明了该方法可行且有效. 该方法无需复杂计算,修正速度快,易于编程实现,对阿达玛变换光谱技术具有普遍

意义.

参考文献

- [1] HANF M, SCHAPORIN A, HAHN R, *et al.* Novel Hadamard transform spectrometer realized using a dynamically driven micro-mirror array as light modulator [C]. *SPIE*, 2005, **5717**: 117-126.
- [2] ZHAO Bao-chang, LI Chun-fang, ZHAO Zhong-wei. A spectroscopic technique by multiple-slit diffraction[J]. *Acta Photonica Sinica*, 1992, **21**(4):300-309.
赵葆常,李春芳,赵忠伟. 多缝衍射光谱技术[J]. 光子学报, 1992,**21**(4):300-309.
- [3] LOVE S P. Programmable matched filter and Hadamard transform hyperspectral imagers based on micro-mirror arrays [C]. *SPIE*, 2009, **7210**: 7210071-15.
- [4] HARWIT M, SLOANE N J A. Hadamard transform optics [M]. New York: Academic Press, 1979: 62-81.
- [5] DONG Ying, XIANG-LI Bin, ZHAO Bao-chang. Theoretical study on Fourier self-deconvolution(FSD) of Fourier transform spectrum[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(7):841-846.
- [6] TANG H W, CHEN G Q, ZHOU J S, *et al.* Hadamard transform fluorescence image microscopy using onedimensional movable mask[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2002, **24**(8):27-34.
- [7] GOLAY M T E. Multi-Slit spectrometry[J]. *JOSA*,1949, **39**(6): 437-444.
- [8] WEHLBURG C M, WEHLBURG J C, GENTRY S M, *et al.* Optimization and characterization of an imaging Hadamard spectrometer[C]. *SPIE*, 2001, **4381**:506-515.
- [9] ZHOU Jin-song, LU Qun-bo, XIANG-LI Bin. Analysis and revision on spectra aliasing of hadanmard transform spectral imager[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(10): 1518-1521.
周锦松,吕群波,相里斌. 阿达玛变换光谱成像仪光谱混叠分析及修正[J]. 光子学报, 2005, **34**(10):1518-1521.
- [10] 郁道银,谈恒英. 工程光学[M]. 北京:机械工业出版社,2003: 358-364.

Analysis and Revision on the Static Double-gain Hadamard Spectrometer

HAO Peng, WU Yi-hui

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: To obtain both high sensitivity and high throughput when measuring at the same time, a static double-gain Hadamard spectrometer is introduced, based on micro-slit array. The principle and instrument structure of static double-gain Hadamard spectrometer are described, and spectra aliasing caused by Hadamard encoding mask is investigated. The relationship between spectral offset and the spatial offset of incident slit is obtained. For a given wavelength spectrum, the spatial offset caused by the spatial offset of incident slit is also calculated in theory. The simulation results show that this method has no complex computation, with fast correction, and is easy in program realization.

Key words: Spectrometer; Hadamard transform; Slit array; Spectra aliasing