

光纤成像光谱仪中谱线畸变对调制传递函数的影响

程欣^{1,2}, 王晶^{1*}, 张葆¹, 洪永丰¹

1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033
2. 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘要 将光纤传像束应用到色散型成像光谱仪中取代其狭缝, 链接望远系统和光谱仪组成光纤成像光谱仪。它是二重采样系统, 光谱仪的谱线畸变使光纤束采样像元的像与探测器像元之间产生对准偏差, 从而对第二次采样过程产生影响, 导致调制传递函数(MTF)下降。从线扩散函数角度出发推导出采样过程光学传递函数, 分析了谱线畸变对系统MTF的影响, 建立了一套评价光纤成像光谱仪MTF的模型。该模型比狭缝型成像光谱仪MTF计算模型多了一项光纤积分MTF因子和一项由谱线畸变引起的对准偏差MTF因子, 最后用该模型评价了某机载可见近红外波段光纤成像光谱仪MTF。MTF计算模型的推导和建立方法对计算二重采样系统光学传递函数有参考意义, 能指导光纤成像光谱仪的设计。

关键词 成像光谱仪; 调制传递函数; 光纤传像束; 谱线畸变

中图分类号: O433 文献标识码: A DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2011)10-2861-04

引言

成像光谱仪是一种能同时对目标物体进行空间维和光谱维成像的光学遥感器, 它主要由前置望远系统和光谱成像系统组成, 狭缝作为视场光阑将两者有机的结合在一起。这种结合方式是刚性的、直线型或空间折线型的, 不利于结构的小型化和复杂化。光纤束的出现打破了这种局面, 作为传光器件很快被应用到光谱仪中, 组成光纤光谱仪。用光纤束取代狭缝, 使得采样方式和光谱接收方式多样化, 易于操作和使用; 体积小, 结构灵活, 易于复杂化和模块化^[1]。将线列光纤传像束作为传像器件应用于成像光谱仪中, 取代狭缝链接望远系统和光谱成像系统, 组成光纤成像光谱仪, 利用它柔软可弯曲的特点实现结构小型化和复杂化。

光纤传像束是一种可随意弯曲的无源图像传输器件。线列光纤传像束是将许多根一定长度的极细光纤按直线方式, 在两端按一一对应的关系紧密排列组成。与传统光学成像器件相比, 它具有柔软、质量轻、摆放自由度大、易实现复杂空间结构等特点, 被广泛应用于医学、工业检测、空间遥感等众多领域。它是一种采样器件, 光纤束中单根光纤作为采样单元对耦合进来的物体像进行采样并传输到另一端, 实现中继传输。在光纤成像光谱仪中, 线列光纤传像束取代狭缝

对望远镜耦合进来的像采样后传输至光谱仪, 光谱仪对其分光再成像到探测器上, 得到目标物体不同波长的光谱像, 所以它是一种二重采样系统。由于光纤传像束本质属性的限制, 在输出图像背景中附加了传像束的网格结构, 导致图像质量下降。国内外不少专家已经对采样系统的MTF做了详尽的分析, 提出了积分法, 统计法等不同计算方法^[2], 它们将单个采样器件作为研究对象, 没有形成系统MTF计算模型。张勇和陈自宽等以CCD光电成像系统为例, 以点扩散函数(PSF)为出发点, 得出了整个系统的光学传递函数^[3]。但对于同时存在圆形采样像元和矩形采样像元的二重采样系统而言, 这种计算方法太复杂。

对地观测型成像光谱仪狭缝像的宽度通常是探测器像元尺寸的整数倍, 大多数情况下是尺寸相等的匹配关系, 在无像差的光纤成像光谱仪中体现为光纤像与探测器像元一一对应相互匹配。实际上由于光谱仪存在畸变, 光纤束的像在CCD靶面上空间维和光谱维方向上均与像元出现对准偏差, 导致第二次采样出现混乱, 使MTF下降。本文以线扩散函数(LSF)为切入点, 对整个系统建立了一套MTF计算模型, 该方法简单快捷, 对评价二重采样系统的MTF有参考意义。最后用该模型计算某机载光纤成像光谱仪的MTF, 将其与狭缝型成像光谱仪比较分析了由畸变引起的MTF的下降, 可指导光纤成像光谱仪的设计。

收稿日期: 2010-12-10, 修订日期: 2011-04-08

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2008AA121803)资助

作者简介: 程欣, 1984年生, 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所博士研究生 e-mail: chengxin0301214@163.com

* 通讯联系人 e-mail: wangjingYX1@sina.com

1 光纤成像光谱仪 MTF 计算模型

光纤成像光谱仪由前置望远系统、线列光纤传像束和光谱成像系统组成,典型的可见近红外波段机载光纤成像光谱仪如图 1 所示。光谱仪系统采用 Offner 凸面光栅结构,将光纤束按 1:1 放大率成像到 CCD 靶面上。光纤束单根光纤直径与 CCD 像元大小相等。在无像差情况下,线列光纤束不同波长光谱像的大小和排列方式与 CCD 一致,成一匹配关系。实际上光谱像在空间维和光谱维方向均有畸变,分别称为色畸变和谱线弯曲。色畸变是由于光谱仪对狭缝各波长成像放大率不同引起的,谱线弯曲是狭缝不同波长的弯曲图像与直线的偏离量。所以光纤束的像与 CCD 像元之间对出现对准偏差,某波长的光纤像与 CCD 像元的对准状态如图 2 所示。此时,除中心视场附近的光纤像与 CCD 像元对准外,其余视场都存在对准偏差,且畸变越大,偏离程度越严重。这种对准偏差打乱了 CCD 像元与光纤的同步采样,使采样中心点与输入信号间产生额外相位差,导致 MTF 下降。

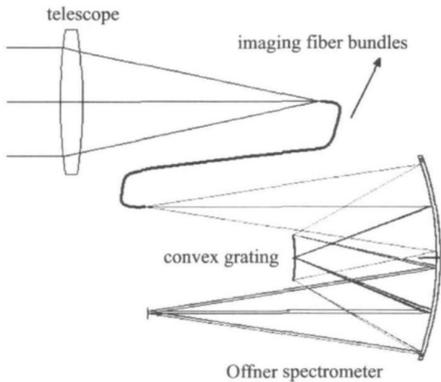


Fig. 1 Structure sketch of imaging fiber-optic spectrometer

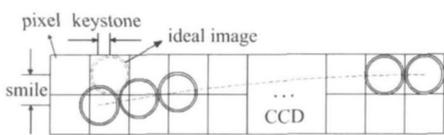


Fig. 2 Scheme of misalignment between image of fiber-optic and CCD pixels

1.1 二重采样过程的光学传递函数

光谱仪在两个方向均存在畸变,对两个方向的采样过程都产生影响。为简便起见,只考虑一维方向,其结果可扩展到二维方向。设第 i 组光纤和 CCD 像元的对准偏差如图 3 所示,光纤的中心坐标为 $C(x_i, 0)$,半径为 R ,纤芯半径为 r ,CCD 像元中坐标为 $c(x'_i, 0)$,采样间隔和像元大小同为 $2R$ 。它们之间的距离即为色畸变,设其大小为 k_i 。光纤和 CCD 像元的面型函数可分别用孔径函数表示

$$p(x - x_i, y) = \text{circ} \left[\frac{\sqrt{(x - x_i)^2 + y^2}}{r} \right] = \begin{cases} 1 & \sqrt{(x - x_i)^2 + y^2} \leq r \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

$$p(x' - x'_i) = \text{rect} \left[\frac{x' - x'_i}{2R} \right] = \begin{cases} 1 & |x' - x'_i| \leq R \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

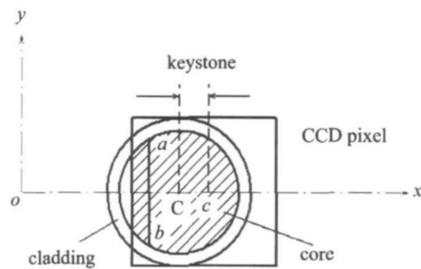


Fig. 3 Misalignment between a couple of image of fiber optic and CCD pixel on 1-D direction

根据 Drougard 关于对准偏差理论^[4],CCD 像元上的光强度等于光纤面的平均光强度,表示为

$$I(x', y') = \frac{1}{\pi r^2} \iint (x, y) p(x' - x) dx dy \quad (3)$$

式中, $I(x, y)$ 是光纤出射端光强,设其为脉冲函数 $\delta(x - x_0)$ 。 $I(x', y')$ 可看作是脉冲函数与孔径函数的卷积,根据光学传递函数的定义可认为孔径函数是光纤的虚拟光学传递函数(OTF)。所以去掉系数,式(3)可写作

$$I(x', y') = p(x' - x'_i) \int_{-\infty}^{\infty} p(x_0 - x_i, y) dy \quad (4)$$

上式右边第二项积分部分为圆函数,对 y 积分即为某弦 ab 的长度,它可看作对 x 求积分面积的积分变量,设其为

$$c(x_0 - x_i) = \int_{-\infty}^{\infty} p(x_0 - x_i, y) dy \quad (5)$$

所以式(4)可写作

$$I(x', y') = p(x' - x'_i) c(x_0 - x_i) \quad (6)$$

根据线扩散函数的定义,CCD 像元线扩散函数为

$$L(x') = \int_{-\infty}^{\infty} I(x', y') dy' = c(x_0 - x_i) \int_{-\infty}^{\infty} p(x' - x_i) dy' \quad (7)$$

$$= c(x_0 - x_i) c'(x' - x'_i) \quad (8)$$

上式中 $c'(x' - x'_i)$ 是 CCD 像元对 x 求面积的积分变量。

图 3 中二次采样面形(阴影部分)可用采样线扩散函数表示为

$$L(x') = \int_{-\infty}^{\infty} c(x_0 - x_i) c'(x' - x'_i) dx_i \quad (9)$$

将 $x_i - x'_i = k_i$ 代入上式得

$$L(x') = \int_{-\infty}^{\infty} c(x_0 - x_i) c'(x' - x_i + k) dx_i \quad (10)$$

令 $t = x' - x_i + k_i$, 则

$$L(x') = \int_{-\infty}^{\infty} c(x_0 - k_i - x' - t) c'(-t) dt \quad (11)$$

$$= c(x_0 - k_i - x') \times c'[-(x_0 - k_i - x')] \quad (12)$$

式(12)得出的是一对光纤和 CCD 像元的对准采样 LSF,对整个光纤束的像, k_i 是变量,随视场增大而增大。因为光纤束由几千根光纤组成,色畸变 k_i 远小于光纤束像高,可认为 k_i 服从均匀分布,即

$$u(k_i) = \begin{cases} 1/k_M & 0 \leq k_i \leq k_M \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (13)$$

k_M 是光纤谱线色畸变最大值, 将式(12)对整个光纤束求平均, 得平均 LSF 为

$$\begin{aligned} AL'(x') &= \frac{1}{k_M} \int_0^{k_M} c(x_0 - k_i - x') \times c'[-(x_0 - k_i - x')] dk_i \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \{c(x_0 - k_i - x') \times c'[-(x_0 - k_i - x')]\} u(k_i) dk_i \\ &= c(x_0 - x') \times c'[-(x_0 - x')] \times u(x_0 - x') \quad (14) \end{aligned}$$

各波长 CCD 像元对光纤光谱像的二次采样平均光学传递函数的平均 OTF 是平均 LSF 的傅里叶变换, 所以

$$\begin{aligned} AOTF &= \int_{-\infty}^{\infty} AL'(x') \exp(-2i\pi f x_0) dx' \\ &= C^*(f) \dot{C}(f) U^*(f) \exp(-2i\pi f x_0) \quad (15) \end{aligned}$$

式中, $C(f)$, $\dot{C}(f)$ 和 $U(f)$ 分别是 $c(x')$, $c'(x')$ 和 $u(x')$ 的傅里叶变换, 且均为实函数, 则式(15)可写成

$$AOTF = C(f) \dot{C}(f) U(f) \exp(-2i\pi f x_0) \quad (16)$$

上式表明, 第二次采样过程的平均光学传递函数可表示为二重采样面型的积分单元的傅里叶变换与对准偏差分布函数的傅里叶变换的乘积, 外加一个初始相位差。该计算方法和结论对其他类型的二重采样或存在对准偏差系统光学传递函数的计算有参考意义。

1.2 光纤成像光谱仪的 MTF 计算模型

引入光纤传像束后, 光纤成像光谱仪在光谱成像之前不再是连续成像系统。离散采样器件对输入信号的采样是一种线性但不是完全空不变过程, 而光学传递函数仅用于线性空不变系统。光学传递函数经过几十年的发展和完善, 针对离散采样系统国际上提出局部等晕和平均传递函数概念, 使光学传递函数能应用在非连续成像系统中。对单根光纤, 系统满足等晕条件^[3], 可看作线空不变系统, 光纤成像光谱仪的平均 MTF 可用下式计算

$$\begin{aligned} MTF_{sys} &= MTF_{tel} \times MTF_{ofint} \times MTF_{ofsam} \times MTF_{spe} \times MTF_{CCDint} \\ &\quad \times MTF_{CCDsam} \quad (17) \end{aligned}$$

上式中的 MTF 项从左至右分别为: 系统 MTF、望远镜 MTF、光纤积分 MTF、光纤采样 MTF、光谱仪 MTF、CCD 积分 MTF 和采样 MTF。在无畸变情况不存在对准偏差时, 光纤像与 CCD 像元匹配, 两者同步采样, 所以(17)式中只能计算一次采样 MTF。当存在对准偏差时, 可认为在无偏差情况下在乘上一个对准 MTF, 所以(17)式应修改为 $MTF_{sys} = MTF_{tel} \times MTF_{ofint} \times MTF_{spe} \times MTF_{CCDint} \times MTF_{sam} \times MTF_{align}$

根据 MTF 定义, 由(16)式可计算第二次积分采样过程的平均 MTF

$$AMTF = |C(f) \dot{C}(f) U(f)| \quad (19)$$

根据前文的定义,

$$c(x) = \begin{cases} \sqrt{r^2 - x^2} & x^2 \leq r^2 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (20)$$

$$\dot{c}(x') = \text{rect}\left[\frac{x'}{2R}\right] \quad (21)$$

分别对式(20)和(21)作傅里叶变换得

$$C(f) = \int_{-r}^r \sqrt{r^2 - x^2} \exp(-2i\pi f x) dx = \frac{J_1(2\pi r f)}{\pi r f} \quad (22)$$

$$\dot{C}(f) = \text{sinc}(2Rf) \quad (23)$$

上两式均已略去系数。对准偏差分布函数式(13)可写为

$$u(k_i) = \frac{1}{k_M} \text{rect}\left[\frac{k_i - k_M/2}{k_M}\right] \quad (24)$$

对上式作傅里叶变换, 并略去系数,

$$|U(f)| = \text{sinc}(k_M f) \quad (25)$$

将式(22), (23)和(25)代入式(19)得第二次积分采样过程的平均 MTF 为

$$AMTF = \frac{J_1(2\pi r f)}{\pi r f} \text{sinc}(2Rf) \text{sinc}(k_M f) \quad (26)$$

上式中右边第一和第二项分别为光纤和 CCD 像元的积分 MTF, 而第三项即为由色畸变引起的对准偏差 MTF_{align} 。光纤束和 CCD 采样过程同步发生, 采样间隔为 $2R$, 所以采样 MTF 为 $MTF_{sam} = \text{sinc}(2Rf)$ 。式(25)的结果是在纤芯积分面积有部分超出像元采样区域外即 $r + k_M > R$ 式得出的通用结果, 超出像元积分区域的长度为 $(k_M - R + r)$, 此时式(25)应修改为

$$MTF_{align} = \text{sinc}[(k_M - R + r)f] \quad (27)$$

当 $r + k_M \leq R$ 时, 光纤所有积分区域均被像元采样, 只是多了一个相位因子, 但像元积分 MTF 仍不变, 所以 $MTF_{align} = 1$, 此时整个系统的 MTF 为

$$MTF_{sys} = MTF_{tel} \times MTF_{spe} \times \frac{J_1(2\pi r f)}{\pi r f} \text{sinc}^2(2Rf) \quad (28)$$

当 $r + k_M > R$ 时, 整个系统的 MTF 为

$$\begin{aligned} MTF_{sys} &= MTF_{tel} \times MTF_{spe} \times \frac{J_1(2\pi r f)}{\pi r f} \cdot \\ &\quad \text{sinc}^2(2Rf) \text{sinc}[(k_M - R + r)f] \quad (29) \end{aligned}$$

从式(29)可看出, 与狭缝成像光谱仪 MTF 计算模型相比, 光纤成像光谱仪 MTF 计算模型多了一项光纤积分 MTF 因子和由谱线畸变引起的对准偏差 MTF 因子。

2 应用举例

根据研究目标设计的某机载可见近红外波段光纤成像光谱仪的光学结构如图 1 所示, 望远镜系统为复消色差折射式光学系统, 光谱仪系统为 Offner 凸面光栅结构。选择的线列光纤束宽度为 18 mm, 由 1 000 根直径为 $18 \mu\text{m}$, 纤芯直径为 $16 \mu\text{m}$ 的光纤组成, CCD 像元大小与光纤直径匹配为 $18 \mu\text{m}$ 。前置望远系统的垂轴色差为 $3.60 \mu\text{m}$, 经光纤束传输至光谱仪后转化成等量的色畸变。光谱成像系统最大色畸变为 $0.40 \mu\text{m}$, 最大谱线弯曲为 $0.15 \mu\text{m}$ 。对设计的望远系统和光谱仪系统 MTF 曲线分别进行采样, 得到一系列不同空间频率的 MTF 值, 再用式(29)进行计算后拟合, 并将其与相同光学参数的狭缝成像光谱仪各波长 MTF 值比较, 绘出两种系统不同波长的 MTF 曲线如图 4 所示。图中实线对应的是狭缝成像光谱仪对中心波长和边缘波长的 MTF 曲线, 虚线对应的是光纤成像光谱仪对中心和边缘波长的 MTF 曲线。两者对各波长在 Nyquist 频率处的 MTF 差值大约在 0.07 左

右。因色畸变较小, MTF 的下降主要是由光纤积分过程引起, 而色畸变对 MTF 的影响小于 0.01, 选择更小纤芯直径的光纤束可减小 MTF 下降量。明确诸如光纤直径、谱线畸变以及 CCD 像元大小等因素对 MTF 的影响后, 光谱仪系统设计者可对各影响因素进行权衡优化, 合理控制谱线畸变,

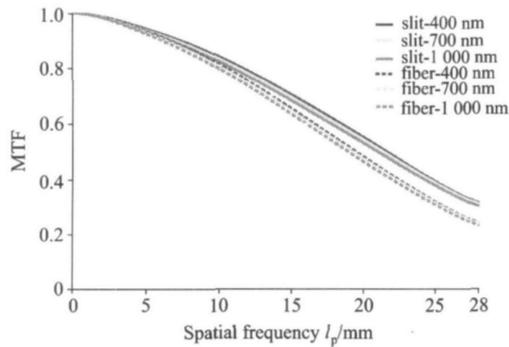


Fig 4 MTF curves of two kinds of imaging spectrometer for every wavelength

实现最优设计。

3 结论

将线列光纤传像束应用到成像光谱仪中, 柔性链接前置望远系统和光谱仪系统组成光纤成像光谱仪。它是二重采样系统, 光谱成像系统的谱线畸变导致第二次采样过程发生对准偏差, 使调制传递函数下降。本文从线扩散函数角度出发, 推导了第二次积分采样过程光学传递函数, 求得其调制传递函数。然后对整个光纤成像光谱仪系统建立了一套 MTF 计算模型。与狭缝成像光谱仪 MTF 计算模型相比, 该计算模型多了一项光纤积分 MTF 因子和一项由谱线畸变引起的对准偏差 MTF 因子。最后运用该模型评价了某机载可见近红外波段光纤成像光谱仪对各波长 MTF 值, 并将其与狭缝光谱仪作了比较分析。当畸变较小时, MTF 的下降主要来自光纤采样过程, 畸变对 MTF 影响很小。MTF 计算模型的推导和建立方法对计算二重采样光学传递函数有参考意义, 能在一定程度上指导光纤成像光谱仪的设计。

References

- [1] ZHENG Bao-hua, CHENG De-fu, ZHENG Zhi-zhong, et al(郑宝华, 程德福, 郑志忠, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2010, 30(5): 1417.
- [2] ZHANG Yong, ZHAO Da-zun(张勇, 赵达尊). Journal of Beijing Institute of Technology(北京理工大学学报), 1997, 17(4): 151.
- [3] CHEN Zi-kuang, ZHAI Hong-chen, MU Guo-guang(陈自宽, 翟宏琛, 母国光). Optical Technology(光学技术), 1998, 1(1): 57.
- [4] Renee D. J. Opt. Soc. Am., 1964, 54(7): 907.

Effect of Spectrum Distortion on Modulation Transfer Function in Imaging Fiber-Optic Spectrometer

CHENG Xin^{1,2}, WANG Jing^{1*}, ZHANG Bao¹, HONG Yong-feng¹

1. Changchun Institute of Optics Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China
2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Imaging fiber bundles were introduced to dispersion imaging spectrometer and substituted for slit, connecting the telescope and spectrometer to yield the imaging fiber-optic spectrometer. It is a double sampling system, the misalignment between image of optical fiber and detector pixel has arisen because of the spectrum distortion of spectrometer, which affected the second sampling process, and the modulation transfer function (MTF) therefore degraded. Optical transfer function of sampling process was derived from line spread function. The effect of spectrum distortion on system MTF was analyzed, and a model evaluating the MTF of imaging fiber-optic spectrometer was developed. Compared to the computation model of MTF of slit imaging spectrometer, a MTF item of sampling by optical fiber and a MTF item of misalignment arising from spectrum distortion were added in this model. Employing this, the MTF of an airborne imaging fiber-optic spectrometer for visible near infrared band was evaluated. The approach to deriving and developing the MTF model has a reference signification for the computation of MTF of double sampling system, which can direct the design of imaging fiber-optic spectrometer also.

Keywords Imaging spectrometer; MTF; Imaging fiber bundles; Spectrum distortion

* Corresponding author

(Received Dec. 10, 2010; accepted Apr. 8, 2011)