

doi: 10.3788/gzxb20144307.0730004

Offner 型成像光谱仪波长使用范围和光谱分辨率研究

裴梓任, 黄元申, 张大伟, 韩姗, 洪瑞金, 倪争技

(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 教育部光学仪器与系统工程中心;
上海市现代光学系统重点实验室, 上海 200093)

摘 要:研究了 Offner 型成像光谱仪消像差结构的参量和性能. 用几何法推导出 Offner 型成像光谱仪的波长使用范围、系统线性色散以及光谱分辨率的计算公式; 在理想像差条件下, 分析了 Offner 型成像光谱仪光谱分辨率与入射狭缝的宽度、凸面光栅分辨率和探测器像元尺寸各个因素之间的关系; 探讨了提高光谱分辨率采用的方法和技术, 解决了光谱仪的各个参量和光谱分辨率之间的矛盾. 研究表明: 当系统像差很小可忽略时, 通过减小狭缝宽度, 有利于提高光谱分辨率; Offner 型成像光谱仪的分辨率由入射狭缝宽度、光栅和 CCD 像元尺寸三者中分辨本领最低的参量确定.

关键词:光栅光谱仪; 波长范围; 光谱分辨率; 凸面光栅; Offner 结构

中图分类号: TH744.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2014)07-0730004-6

Research of Wavelength Range and Spectral Resolution for Offner Imaging Spectrometer

PEI Zi-ren, HUANG Yuan-shen, ZHANG Da-wei, HAN Shan, HONG Rui-jin, NI Zheng-ji
(University of Shanghai for Science and Technology, School of Optical-Electrical and Computer Engineering,
Optical Instrument and Systems Engineering Center of the Ministry of Education; Shanghai Key
Laboratory of Modern Optical System, Shanghai 200093)

Abstract: The parameters and property of Offner imaging spectrometer were studied according to eliminating aberration structure. The calculating equations of measurable range of wavelength, linear dispersion and spectral resolution were deduced by geometry method based on eliminating aberration structure of Offner imaging spectrometer; the relationship of resolution and each factor were analyzed, these factors including width of entrance slit, convex grating resolution and pixel size of detector. When the system aberration was to be ignored, the spectral resolution could be enhanced by decreasing width of entrance slit, this conclusion was verified by imaging experiment. The techniques and methods of improving spectral resolution were summarized, the tradeoff balance between each parameter and spectral resolution were considered. The final conclusion was as follow: the resolution of Offner imaging spectrometer was determined by the lowest resolution of the entrance slit, convex grating and pixel size of CCD.

Key words: Grating spectrometer; Wavelength range; Spectral resolution; Convex grating; Offner configuration

OCIS Codes: 300.6190; 120.4825; 080.2740; 050.1950; 110.4234

基金项目: 科技部重大科学仪器专项 (Nos. 2011YQ15004002, 2011YQ15004004, 2011YQ14014704)、国家自然科学基金 (Nos. 61205156, 61378060) 和上海市教委曙光项目 (No. 11SG44) 资助

第一作者: 裴梓任 (1986-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为凸面光栅分光系统. Email: hbqcpzr@163.com

导师 (通讯作者): 黄元申 (1963-), 男, 副教授, 主要研究方向为机械刻划光栅、亚波长光栅等. Email: hyshyq@sina.com

收稿日期: 2013-11-06; 录用日期: 2014-01-14

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

0 引言

Offner 型成像光谱仪属于同心光学系统结构,具有像差小、相对孔径大、成像质量高、结构简单紧凑、谱线弯曲和色畸变小等优点^[1-13],可用于高分辨率成像光谱仪的分光系统,用来实现目标识别和检测、精确测绘、临床诊断成像、管理和环境评估等^[1-2,11-13]. Offner 型成像光谱仪最早由 Thevenon 提出,后经 D. Kwo 加以改进,由一个大凹面反射镜和一个同心的凸面光栅组成^[12],结构简单、易实现大孔径,与其它平面和凹面光栅结构的光谱仪相比,像差很小,可以保证系统所有初级像差为零,而且采用反射结构,没有系统色差^[13-14],但系统存在高级像散^[13].

1999 年, M. P. Chrisp^[4] 等为了消除系统高级像散,对结构进行了改进,将大凹面反射镜分成两个半径不同的小凹面反射镜分别作为接收入射光和衍射光的元件,采用同心结构和罗兰圆装置,进一步减小了系统的谱线弯曲和其它像差的问题. X. Prieto-Blanco^[5-10] 等为了使这种结构的光谱仪能够进一步消像差,提出了一种基于子午和弧矢聚焦曲线的设计方法,提出正交结构,即入缝和出缝在两个互相垂直的平面内,并实现光谱在仪器平面外色散^[6].

文献[4-17]探讨了这种结构光谱仪的消像差设计,但对其可测波长范围和光谱分辨率未进行研究;文献[5-9,13-17]只是在优化设计时提出了波长范围和分辨率的参量要求;文献[13,16-18]对于分辨率的要求仅限于定性的分析,并没有深入考虑在整个光谱仪系统中其它因素对分辨率的影响,也没有求出系统线色散和最终光谱分辨率表达式,而光谱测量范围、光谱分辨率以及响应灵敏度是影响光谱仪性能的主要参量. 本文在已有研究的基础上,根据已经优化设计的 Offner 分光系统,结合消像差设计方法和结构特点,在理想像差条件下,分析了 Offner 型光谱仪的可测波长范围和光谱分辨率,推导出该系统可测波长范围的计算公式和光谱实际分辨率与各个参量之间的关系式,探讨了入射狭缝宽度、凸面光栅分辨率和探测器像素尺寸等参量对光谱分辨率的影响;讨论了 Offner 成像光谱仪分辨率受各种因素的影响及提高分辨率的办法,根据 Offner 系统的自身条件,确定了系统最终最小可分辨波长和分辨率,从而使系统在合理的波段范围内使用,并且取得较小的像差、高的分辨率和合理的光谱能量分布.

1 Offner 型光谱仪波长适用范围

1.1 分光系统消像差结构特点

Offner 型消像差结构如图 1,其中凸面光栅的曲率半径为 R_2 , M_1 、 M_3 分别是第一凹面反射镜和第三凹

面反射镜,曲率半径分别为 R_1 、 R_3 . 入射狭缝垂直于主平面,缝宽为 L , O 为入射狭缝的中点,且在 M_1 的罗兰圆上. 凸面光栅和两反射镜 M_1 、 M_3 的曲率中心在同一点 C 上,即三光学元件组成同心结构,且成像符合罗兰圆结构^[4-5],即:假设入射狭缝的中点 O 为物点, O 点在 M_1 的罗兰圆上,由 O 点发出的主光线在系统所成的像点 I_0 在 M_3 的罗兰圆上,虚物点 O' 和虚像点 I' 都在半径为 R_2 的罗兰圆上,这样系统的入射焦距等同于 O_2O' ,出射焦距等同于 O_2I_2 . 主光线入射到凹面镜 M_1 的中心点 O_1 ,经 M_1 反射后入射到光栅 G 的中点 O_2 ,经光栅发生衍射后,入射到另一个凹面镜 M_3 的中心点 O_3 ,在 M_3 上发生反射后的光线成像点在 M_3 的罗兰圆上,并且用 CCD 探测器沿 I_1I_2 圆弧段扫描接收. 根据消像差结构的特点可知^[5-10,13-17]:当光栅 G 的入射角 α 和衍射角 β 分别等于反射镜 M_1 和 M_3 的偏向角时,即: $\alpha = 2\theta_1$, $\beta = 2\theta_2$, Offner 型成像光谱仪分光系统可实现对称平面内物点在某一波长消像散,此时由几何关系可得: $O_1O_2 = R_2$, $O_2O_3 = R_2$, $\theta_1 = \arccos(R_1/2R_2)$, $\theta_2 = \arccos(R_3/2R_2)$.

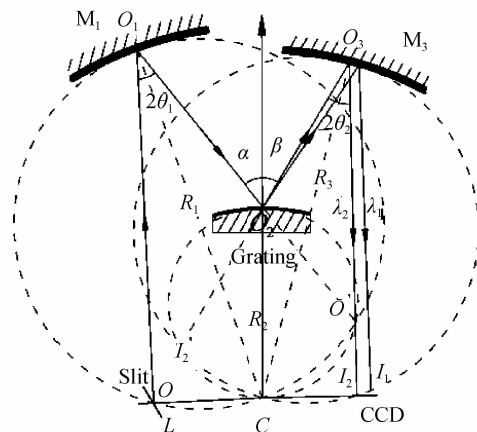


图 1 Offner 型光谱仪消像差结构

Fig. 1 Schematic diagram of Offner spectrometer for eliminating aberration structure

1.2 波长适用范围

若系统的工作波段范围为 λ_1 到 λ_2 , 经光栅 G 后, 两边缘工作波长 λ_1 、 λ_2 对应的出射角分别为 β_1 、 β_2 , 如果入射角为定值 α , 光栅常量为 d , 衍射级次为 k , 根据光栅方程有

$$\sin \beta_1 - \sin \beta_2 = \frac{k}{d} (\lambda_2 - \lambda_1) = \frac{k}{\lambda} \Delta \lambda \quad (1)$$

两工作波长 λ_1 、 λ_2 对应的像点 I_1 、 I_2 在 M_3 的罗兰圆上, 根据探测器 CCD 的尺寸大小, 设光谱谱面宽度为 Δh , 则有

$$\Delta h \approx CI_1 - CI_2 = R_2 \sin \beta_1 - R_2 \sin \beta_2 \quad (2)$$

联立式(1)和式(2)可得光谱的工作波段

$$\Delta \lambda = \frac{d \times \Delta h}{k \times R_2} \quad (3)$$

当光栅入射角 α 为定值时,根据光栅方程

$$d(\sin \alpha - \sin \beta) = k\lambda$$

根据 Offner 型分光系统的设计经验^[4-10,13-14], $0.5 < R_2/R_3 < 0.6$, $0.5 < R_2/R_1 < 0.6$, 且 $R_1 > R_3$. 在实际应用中,为了实现大视场无光遮挡的效果,同时也为了系统在某一波长处实现零像散, α, β 的取值范围要求是 $20^\circ \sim 40^\circ$ ^[4-6,8,13-17]. 若取光谱级次为 $k = -1$, 当 $\beta = 40^\circ$ 、 $\alpha = 20^\circ$ 时,得到可测波长的最大值为

$$\lambda_{\max} = d(\sin 40^\circ - \sin 20^\circ) = 0.301d$$

由于该成像光谱仪不是在真空条件下使用,所以波长小于 185 nm 的紫外光大部分会被大气吸收^[18], 则可测波长范围为: $\lambda = 185 \text{ nm} \sim \lambda_{\max}$, 在这个范围内,可以取到光谱所需要的工作波段范围 $\Delta\lambda$.

2 Offner 成像光谱仪分辨率理论分析

光谱分辨率是指光谱仪能分辨开两条波长很接近的谱线的能力,它是成像光谱仪重要的性能指标,通常利用瑞利准则来判断^[18-19],即当两条强度分布轮廓相同的谱线的最大值与最小值相重合时,它们能够分辨. 然而瑞利判据是仅考虑衍射极限分辨率. 在实际应用中,Offner 成像光谱仪的最终分辨率受入射狭缝宽度、凸面光栅分辨率、系统像差以及探测器像元尺寸等因素的影响,使得实际分辨率低于理论分辨率. 因此,研究各因素对光谱分辨率的影响,对成像光谱仪的设计具有极其重要的意义.

2.1 入射狭缝宽度对光谱分辨率的影响

入射狭缝宽度对系统分辨率的影响,主要表现在狭缝上的每一个点经过分光系统后,如果系统像差很小可以忽略,考虑到系统衍射作用,将会在像平面上会形成一个单色狭缝像点,所有单色狭缝像点一起构成具有一定宽度的谱线,这些像点形成的空间宽度即为狭缝像的几何宽度,考虑到光栅的色散作用,狭缝像的几何宽度所对应的光谱带宽(谱线半高宽)就是狭缝的最小可分辨波长差. 当入射光线为单色光时,狭缝上每一个点所发出的光满足光栅方程,其中主光线由狭缝中点 O 发出,满足光栅方程

$$d(\sin \alpha - \sin \beta) = k\lambda \quad (4)$$

当狭缝宽度为 L 时,狭缝边缘点的入射角相对于中点 O 会改变 $\pm\delta\alpha$, 相应的衍射角也随之改变 $\pm\delta\beta$, 则此时光栅方程为

$$d[\sin(\alpha \pm \delta\alpha) - \sin(\beta \pm \delta\beta)] = k\lambda \quad (5)$$

将式(5)展开减去式(4),整理后并考虑到 $\delta\alpha$ 和 $\delta\beta$ 很小,即 $\cos \delta\alpha \approx 1$, $\sin \delta\alpha \approx \delta\alpha$, 得到

$$\frac{\delta\alpha}{\delta\beta} = \frac{\cos \beta}{\cos \alpha} \quad (6)$$

因此考虑入射狭缝宽度 L 后,入射角变化范围是 $2\delta\alpha = L/f_1$, 其中 f_1 是入射焦距,由此得到衍射角变化

范围是 $2\delta\beta$, 即

$$2\delta\beta = \frac{L \cos \alpha}{f_1 \cos \beta} \quad (7)$$

设出射焦距为 f_2 , 入射狭缝在像面上所成像的几何宽度 L_0 为

$$L_0 = 2\delta\beta \times f_2 = \frac{f_2 L \cos \alpha}{f_1 \cos \beta} \quad (8)$$

由于该系统符合 M. P. Chrisp 的罗兰圆聚焦条件^[9], 根据图 1 的几何关系,虚物点 O' 和虚像点 I' 都在半径为 R_2 的罗兰圆上,这样系统的入射焦距等同于 O_2O' , 出射焦距等同于 O_2I_2' , 所以系统的入射焦距 f_1 和出射焦距 f_2 分别满足 $f_1 = O_2O' = R_2 \times \cos \alpha$, $f_2 = O_2I' = R_2 \times \cos \beta$, 将这一条件代入式(8)中,可得

$$L_0 = L \quad (9)$$

式(9)表明,如果把狭缝当成一个实物体,理想成像的情况下,Offner 成像光谱仪以 1:1 的比例成像. 当入射光线不是单色光时,在入射角一定情况下,由光栅方程可得系统的角色散为

$$\frac{d\beta}{d\lambda} = \frac{k}{d \cos \beta}$$

因此该系统的线色散为

$$\frac{dl}{d\lambda} = f_2 \frac{d\beta}{d\lambda} = R_2 \cos \beta \times \frac{k}{d \cos \beta} = \frac{R_2 k}{d}$$

由线色散可得,入射狭缝像的几何宽度 L_0 所对应的光谱带宽,即最小可分辨波长 $\delta_s \lambda$ 为

$$\delta_s \lambda = L_0 \frac{d\lambda}{dl} = \frac{Ld}{R_2 k} \quad (10)$$

因此该成像光谱仪的分辨本领为

$$R_s = \frac{\lambda}{\delta_s \lambda} = \frac{\lambda}{L_0} \frac{dl}{d\lambda} = \frac{\lambda k R_2}{Ld} \quad (11)$$

根据已有的参量和式(10),画出狭缝对应的最小可分辨波长与狭缝宽度的曲线图,如图 2.

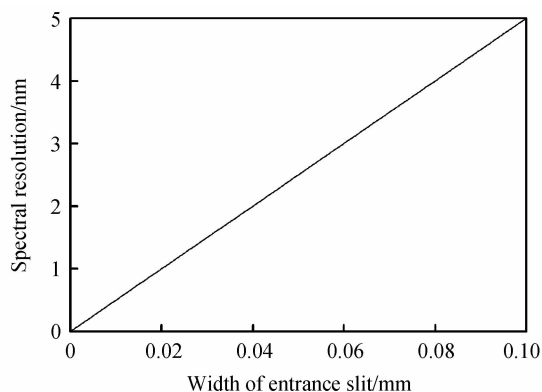


图 2 光谱分辨率与入射狭缝宽度之间的关系
Fig. 2 Relationship between spectral resolution and entrance slit width

由式(10)、(11)以及图 2 可知,在一个确定的系统中,光谱仪的实际分辨本领随入射狭缝宽度 L 的增大而降低,即:入射狭缝宽度增大,对应的最小可分辨波

长也增大,分辨本领就降低,因此,减小入射狭缝宽度有利于提高光谱仪的分辨率.另外,从式(11)可以看出,光谱仪的分辨本领与线色散率成正比.

为了证明光谱分辨率与入射狭缝宽度之间的关系,用实验室现有的一台 Offner 同心双镜三反射结构成像光谱仪来验证.主要参量为:大凹面反射镜的半径 $R=222.3$ mm,外径 $D=150$ mm,凸面光栅半径 $r=112.98$ mm,外径 $d=38$ mm,光栅刻线数为 177 g/mm,实验中采用光栅 +1 级衍射,入射狭缝长度 $b=12$ mm,狭缝宽度 L 可调范围是 $0\sim 0.2$ mm,光谱范围选取是 $400\sim 700$ nm.为了节省实验成本,该系统的探测器采用大恒公司生产的 DH2HV2001UC 数字 CMOS 摄像机采集光谱图像.摄像机的彩色图像传感器的像素尺寸为 $4.2\ \mu\text{m}\times 4.2\ \mu\text{m}$,像素深度为 8 位,分辨率为 $1\ 600\times 1\ 200$,模/数转换准确度为 10 位,清晰度 850 线,帧率为 10 帧/s,快门速度为: $1/100\ 000\sim 1$ s,且可调.图像处理软件在 LABVIEW 虚拟仪器开发平台上开发设计.根据入射狭缝宽度的不同,拍摄几张不同的扫描合成图像.实验中,当拍摄到波长 583 nm 时,发现不同宽度的入射狭缝扫描合成图像的分辨率和亮度不同,如图 3.图 3(a)是狭缝宽度为 0.1 mm 时拍摄的图像,图 3(b)是狭缝宽度为 0.028 mm 时拍摄的图像.

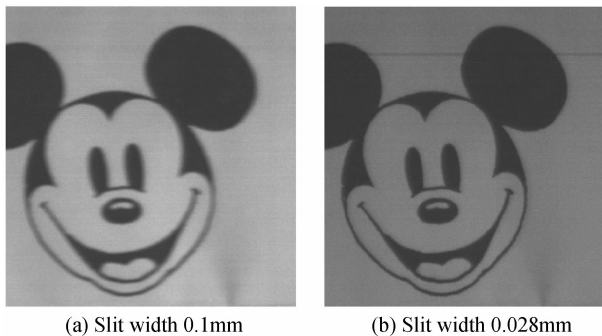


图 3 不同入射狭缝宽度对应的扫描拍摄合成图
Fig. 3 Synthesized picture at different entrance slit width

从图 3 中不难看出,图 3(b)比图 3(a)更清晰,即图 3(b)的分辨率比图 3(a)高,但图 3(b)比图 3(a)亮度要暗.这是因为减小入射狭缝宽度,图像的分辨率虽然会提高,但狭缝宽度过度的减小使出射光强度减弱,导致 CCD 探测器接收光信号减弱,系统的信噪比降低,从而使图像变暗.图 3(b)中的细横线是探测器 CMOS 上的划痕.当狭缝较宽时,光线明亮,图像分辨率又不高,所以无法被看到;当狭缝较窄时,光线较暗,图像分辨率也有所提高,在图像中可以被看到.

图 4 中三幅图是系统采用低压汞灯光源在入射狭缝宽度不同时拍摄的谱线图,5 条谱线的波长依次为: 579.1 、 577 、 546.1 、 435.8 和 404.7 nm.对比图 4 中三幅图可知:随着入射狭缝宽度的增大,5 条不同波长对

应的光谱线明显地增宽,图 4(a)中谱线 577 nm 和 579.1 nm 完全可分辨,但是在图 4(b)和图 4(c)中,这两条谱线重叠为一条谱线,不能分辨.因此,在像差极小、其他参量相同的情况下,适当地减小入射狭缝的宽度,有利于提高光谱分辨率.

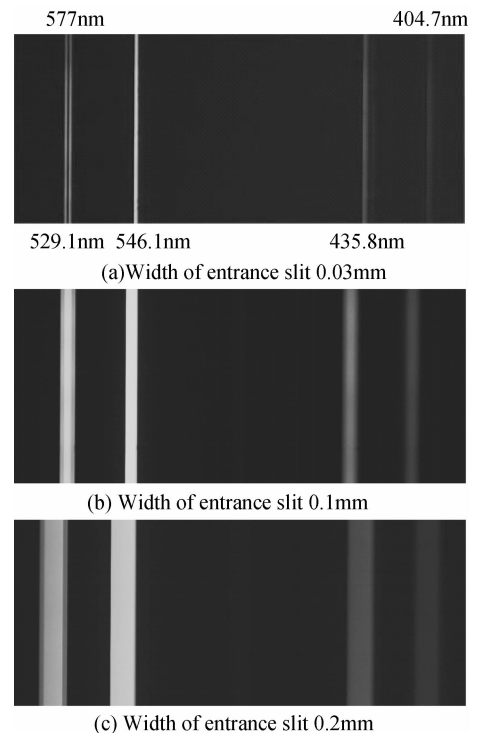


图 4 不同入射狭缝宽度对应的低压汞灯光源谱线图
Fig. 4 Low voltage mercury lamp spectrogram at different entrance slit width

由图 3 和图 4 可知:成像光谱仪在实际使用时,要根据实际要求选择合适狭缝宽度,使其既满足系统的信噪比,又满足光谱的分辨率,增加其实用性.

2.2 凸面光栅分辨本领对光谱仪分辨率的影响

多缝衍射主极大的半角宽度为

$$\Delta\beta = \frac{\lambda}{Nd \cos \beta} \quad (12)$$

其对应的线宽度为

$$\Delta L = f_2 \times \Delta\beta = R_2 \cos \beta \times \frac{\lambda}{Nd \cos \beta} = \frac{R_2 \lambda}{Nd} \quad (13)$$

根据系统线色散的表达式,其对应的波长差为

$$\delta_c \lambda = \Delta L \times \frac{d\lambda}{dl} = \frac{R_2 \lambda}{Nd} \times \frac{d}{R_2 k} = \frac{\lambda}{Nk} \quad (14)$$

因此光栅的分辨本领为

$$R_G = \frac{\lambda}{\delta_c \lambda} = Nk \quad (15)$$

式中 N 是光栅总刻线数, d 是光栅常量, λ 为入射波长, k 为衍射级次.在实际光栅成像光谱仪中,光栅的刻线数是有限的,因此它的主极大条纹的宽度有限,不可能无限小.

2.3 探测器 CCD 像元尺寸对光谱仪分辨率的影响

Offner 成像光谱仪的接收器件可以采用 CCD 探测器,它由一系列像元组成,每个像元输出的信号是该像元尺寸对应的光谱内所有光信号强度累加的结果. CCD 的最小可分辨的波长差 $\delta_c\lambda$ 由系统的线色散率和 CCD 的像元尺寸决定,设相邻两个像元的中心间距为 h ,则最小可分辨的波长差,即:相邻偶数和相邻奇数像元对应的波长差为

$$\delta_c\lambda = 2h \frac{d\lambda}{dl} = \frac{2hd}{kR_2} \quad (16)$$

因此由 CCD 的分辨本领为

$$R_c = \frac{\lambda}{\delta_c\lambda} = \frac{\lambda kR_2}{2hd} \quad (17)$$

由式(17)可知,要想提高光谱仪的分辨率,就应该减小 CCD 像元尺寸.然而在制造 CCD 过程中,过多的减小像元尺寸会使制造工艺中难度增大.另外从式(17)可以看出,虽然减小光栅常量 d 可以提高系统分辨率,但是从系统像差的角度考虑,光栅常量过小,则像方视场角会增大,系统的场曲、象散等轴外像差也增大,在像面上形成较大的弥散斑,从而光谱仪的分辨率随之降低,但是光栅常量 d 过大,光谱带宽会增大,分辨率则降低.因此,光栅常量要根据光谱的使用范围适当选择.

3 光谱仪最终分辨率的确定

在 Offner 成像光谱仪中,入射狭缝宽度、光栅自身参量和 CCD 像元尺寸各自对系统分辨率的影响,都会有一个各自最小可分辨波长.因此,需要确定整个系统的最小分辨波长差,即系统分辨本领由哪一个因素起决定作用.由于在 Offner 型优化设计分光系统中,如果系统像差的弥散斑半径小于狭缝宽度的 $1/3$ 时,即像差的弥散斑半径所对应的最小可分辨波长很小,此时 Offner 型系统的像差可以忽略.因此,在优化设计的分光系统中,系统可认为理想成像,对 Offner 型光谱仪最终分辨率起决定作用的主要是入射狭缝宽度、光栅参量以及 CCD 像元尺寸.

在不考虑 CCD 像元尺寸的情况下,当 $\delta_s\lambda \geq \delta_c\lambda$ 时,即光栅的刻线数 N 非常大时,系统的分辨率由狭缝对应的分辨率决定,此时可以通过减小入射狭缝宽度来提高系统的光谱分辨率;当 $\delta_s\lambda \leq \delta_c\lambda$ 时,即光栅刻线数 N 过小,狭缝很窄时,系统的分辨率由光栅的分辨率决定.

在不考虑光栅参量条件下,当 $\delta_s\lambda \geq \delta_c\lambda$ 时,即狭缝宽度过大,CCD 像元尺寸很小,此时光谱仪的分辨率由入射狭缝的分辨率决定;当 $\delta_s\lambda \leq \delta_c\lambda$ 时,即 CCD 像元尺寸过大,狭缝宽度较小,此时光谱仪的分辨率由 CCD 的像元尺寸所对应的分辨率决定.

在不考虑入射狭缝宽度的情况下,当 $\delta_c\lambda \geq \delta_s\lambda$ 时,此时光谱仪的分辨率由 CCD 的像元尺寸所对应的分辨率决定;当 $\delta_c\lambda \leq \delta_s\lambda$ 时,此时光谱仪的分辨率由光栅参量所对应的分辨率决定.

由于入射狭缝宽度、光栅参量及 CCD 像元尺寸对分辨率的影响是相对独立的,因此可以认为系统的实际分辨本领是由这三个分辨本领中最低的因素决定的.但在实际应用中,系统的像差对分辨率的影响不可忽视,只有在优化设计的理想光学系统中,这些结论在成立.而在固定的系统中,光栅的参量和 CCD 的像素尺寸是不变的,所以系统的最高分辨本领由光栅或 CCD 的分辨本领确定,最低分辨本领由入射狭缝宽度或系统像差确定.

4 结论

基于 Offner 成像光谱仪消像差结构特点,推导了 Offner 成像光谱仪的波长使用范围、系统线色散以及光谱实际分辨率与各种参量之间的关系式.分析了入射狭缝宽度、凸面光栅分辨率和探测器像素尺寸等因素对光谱分辨率的影响及提高分辨率的方法;解决了 Offner 光谱仪各个因素和光谱分辨率之间的矛盾,研究表明系统的实际分辨本领是由这三个分辨本领中最低的因素决定.该研究为成像光谱仪的研制提供经验和借鉴具有十分重要的实用价值.

参考文献

- [1] ROWLANDS N, NEVILLER A, POWELL I P. Short-wave infrared (SWIR) imaging spectrometer for remote sensing[C]. SPIE, 1994, **2269**: 237-247.
- [2] FISHER J, ANTONIADES J, ROLLINS C, et al. Hyperspectral imaging sensor for the coastal environment[C]. SPIE, 1998, **3482**: 179-186.
- [3] MERTZ L. Concentric spectrographs[J]. *Applied Optics*, 1977, **16**(12): 3122-3124.
- [4] CHRISP M P. Convex diffraction grating imaging spectrometer. U. S. Patent; 5,880,834[P]. 1999.
- [5] XESUS P B, CARLOS M O, RAUL D L F, et al. Analytical design of an Offner imaging spectrometer[J]. *Optics Express*, 2006, **14**(20): 9156-9168.
- [6] ROBERT L L. Out-of-plane dispersion in an Offner spectrometer [J]. *Optical Engineering*, 2007, **46** (7): 073004.
- [7] XESUS P B, CARLOS M O, HECTOR G N, et al. Imaging with classical spherical diffraction gratings; the quadrature configuration[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2009, **26**(11): 2400-2409.
- [8] XESUS P B, CARLOS M O, HECTOR G N, et al. The offner imaging spectrometer in quadrature [J]. *Optics Express*, 2010, **18**(12): 12756-12768.
- [9] XESUS P B, HECTOR G N, RAUL D L F. Off-plane anastigmatic imaging in Offner spectrometers[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2011, **28**(11): 2332-2339.
- [10] HECTOR G N, XESUS P B, RAUL D L F. Pupil aberrations in Offner spectrometers [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2012, **29**(4): 442-449.

- [11] LI Tian-hong, YANG Hai-hong, ZHAO Yong-ping. Imaging spectrometer remote sensing: current status and future[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 1997, **12**(2): 54-58.
李天宏, 杨海红, 赵永平. 成像光谱仪遥感现状与展望[J]. 遥感技术与应用, 1997, **12**(2): 54-58.
- [12] HUANG Yuan-shen, NI Zheng-ji, ZHUANG Song-lin. Research of the concentric optical system of grating spectrometers[J]. *Optical Instruments*, 2005, **26**(6): 38-42.
黄元申, 倪争技, 庄松林. 光栅成像光谱仪同心光学系统研究[J]. 光学仪器, 2005, **26**(6): 38-42.
- [13] TONG Ya-jun, WU Gang, ZHOU Quan, *et al.* Design method of offner-type imaging spectrometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(4): 1148-1152.
佟亚军, 吴刚, 周全, 等. Offner 成像光谱仪的设计方法[J]. 光学学报, 2010, **30**(4): 1148-1152.
- [14] HUANG Yuan-shen, CHEN Nan-shu, ZHANG Da-wei, *et al.* Design method for Offner imaging spectrometer composed of convex grating [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2005, **29**(6): 1236-1239.
黄元申, 陈南曙, 张大伟, 等. 一种凸面光栅 Offner 结构成像光谱仪的设计方法[J]. 仪器仪表学报, 2005, **29**(6): 1236-1239.
- [15] JI Yi-qun, SHEN Wei-min. Design and manufacture of Offner convex grating hyper-spectral imager[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, **39**(2): 285-287.
季轶群, 沈为民. Offner 凸面光栅超光谱成像仪的设计与研制[J]. 红外与激光工程, 2010, **39**(2): 285-287.
- [16] LIU Yu-juan, CUI Ji-chen, BEYANHESHIG, *et al.* Design and application of imaging spectrometer with convex grating [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, **20**(1): 52-57.
刘玉娟, 崔继承, 巴音贺希格, 等. 凸面光栅成像光谱仪的研制与应用[J]. 光学精密工程, 2012, **20**(1): 52-57.
- [17] XUE Ru-dong, JI Yi-qun, SHEN Wei-min. Design of a spectroscopic system for SWIR Offner imaging spectrometer [J]. *Journal of Suzhou University*, 2011, **27**(3): 61-66.
薛汝东, 季轶群, 沈为民. Offner 型短波红外成像光谱仪分光系统的设计[J]. 苏州大学学报, 2011, **27**(3): 61-66.
- [18] WANG Xing-quan, FENG Ke-cheng, ZHU Guo-xian, *et al.* Calculating equations for resolution and wavelength range of grating spectrograph[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(5): 1167-1170.
王兴权, 冯克成, 朱国贤, 等. 光栅光谱仪分辨率及波长范围计算公式的研究[J]. 光子学报, 2009, **38**(5): 1167-1170.
- [19] 李询. 光栅型成像光谱仪光学系统设计[D]. 西安: 西安工业大学, 2012.