文章编号:1002-2082(2012)01-0037-07

棱镜-光栅-棱镜型光谱成像系统光学设计

吴从均[1,2]，颜昌翔[1]

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 空间光学部,吉林 长春 130033;
2. 中国科学院 研究生院，北京 100039)

摘　要:为实现成像光谱仪系统的直视性和小型化特点,设计一种棱镜-光栅-棱镜(PGP)结合式元件,作为分光系统的成像光谱仪光学系统装置。系统主要包括 PGP 分光原件、准直系统、成像系统和接收系统。光栅采用体全息相位光栅,可以获得很高的衍射效率,准直和成像镜采用对称式结构,可以有效地消垂轴像差。根据实际指标探测器像元尺寸为 20 μm×20 μm,像元数为 512×512,采用双像元合并方法,光谱通道数为 148 个,狭缝大小为 10.2 mm×10.2 mm,波段在 400 nm～800 nm,物方数值孔径为 0.15。分析了 PGP 光谱成像系统的原理、特点,对参数关系和体全息相位型光栅的衍射效率进行了详细的讨论。分析结果表明:PGP 元件在整个光谱范围内理论衍射效率大于 0.6,采用 ZEMAX 软件进行优化设计,得到系统的平均光谱分辨率优于 3 nm,在截止频率处平均传递数大于 0.7,系统总长 90 mm。

关键词:PGP;体全息相位光栅;成像光谱仪; 衍射效率;光学设计

中图分类号:O433;TH703　　**文献标志码**:A　　**doi**:10.5768/JAO201233.0101008

Imaging spectrometer optical design based on prism-grating-prism dispersing device

WU Cong-jun[1,2], YAN Chang-xiang[1]

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, CAS,
Changchun 130033, China; 2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: In order to make the imaging spectrometer compact and to be directly viewed, an optical system incoporating prism-grating-prism(PGP) component was designed. The system includes PGP device, collimating lens, imaging lens and receiving device. The system uses volume hologram bragg diffraction grating(VHDG) instead of ordinary ruled grating, which have high diffraction efficiency. Symmetric structure that can eliminate lateral abberations automatically is applied to this system. The requirements of design specification are given, which include 512×512 pixels CCD with pixel size of 20 μm×20 μm, 148 spectrum channels, slit size of 10 mm×0.02 mm, object NA of 0.15, and operation wavelength ranging from 400 nm to 800 nm. System concept and features, diffraction efficiency, paraments relationship are discussed. According to analysis, diffraction efficiency is higher than 0.6 in the whole spectrum range. Using ZEMAX optical optimization software, the MTF of the sysytem is better than 0.7 at the Nyquist frequency, the spectural resolution is better than 3 nm, and the length of the sysytem is 90 mm.

Key words: PGP; volume hologram bragg diffraction grating; imaging spectrometer; diffraction efficiency; optical design

收稿日期:2011-03-13;　**修回日期**:2011-04-29

作者简介:吴从均(1986－),男,陕西安康人,硕士研究生,主要从事光学设计工作。E-mail:wcjun1002@yahoo.cn

引言

成像光谱仪可以同时获得二维空间信息和一维光谱信息,在地质分析、矿产勘探、地面测绘、军事监测、医疗器械、自然灾害预警等诸多方面有着重要的应用。分光元件是成像光谱仪的核心部件。利用光栅、棱镜和傅里叶变换方式作为光谱仪的分光系统在相关文献中已有过详细讨论[1],对它的各自特点也做了比较。光栅分光不仅存在谱线弯曲现象,而且在宽谱段中存在级次重叠;棱镜虽然没有级次重叠,但是同样存在谱线弯曲,这对于像元配准和光谱定标都是比较复杂的;傅里叶变换型光谱仪分辨率高,光通量大,但对环境变化敏感、光谱定标相对复杂[2];采用 AOTF、LCTF、波带片等二元光学元件和折衍射系统组合的分光方法相对还不成熟[3]。近年来对于分光方式又有很多新颖的方式出现,如量子光谱遥感技术和基于 MEOMS(微光机电系统)原理的 Hadamard 分光[4]等,但由于技术和工艺等原因这种分光方式仍停留在理论阶段。将各种分光方式相互结合,发挥各种器件的优势,是工程应用解决实际问题的重要手段,也是很多工程人员探索的方向,PGP 分光器件就是在结合了棱镜和光栅各自特点的基础之上发展起来的。

PGP 元件作为分光器件在成像光谱仪-AISA[5]上得到很好的应用,国内在显微高光谱成像光谱仪中也有相关的应用[6],苏州大学朱善兵[7]等人也对其光学系统进行过设计和讨论。本文详细讨论 PGP 元件特性,并运用理论计算了体全息相位型布拉格衍射光栅的衍射效率,对于一种常用机载的超光谱成像仪光学系统进行设计,给出设计结构和像质评价并对结果进行分析说明。

1 PGP 元件

PGP 元件结合了光栅和棱镜在单独作为分光元件时色散方向的一致性和谱线弯曲的相反特性,在中心波长处可以实现光谱直进直出,两者光谱线的相反弯曲可以相互得到补偿。传统的刻划透射式光栅在作为分光元件时,由于零级光占去很大一部分能量,使得 1 级光谱能量较小,体全息光栅是基于折射率调制度制作的,可以很好地把能量集中到正 1(或 −1)级上。因此,采用体全息布拉格衍射光栅,该光栅是在玻璃基底上采用重铬酸盐(DCG)明胶或者光致聚合物作为记录介质,根据全息原理经过曝光和显影,形成折射率调制型体光栅。该类光栅表面为平面,可以和玻璃棱镜很好地胶合,在中心波长处衍射效率接近 100 %。

1.1 PGP 分光原理

PGP 元件采用普通棱镜和体全息布拉格衍射光栅胶合达到分光的目的,整个元件如图 1 所示。平行光经过棱镜色散,不同波长以不相等的角度入射到体光栅上,衬底材料和棱镜相同,这样可以使得在二者的胶合面上出现光束偏折,通过光栅后的光束再一次经过棱镜色散,使得中心波长 λ_C 不会发生偏折,沿光轴方向平行出射。

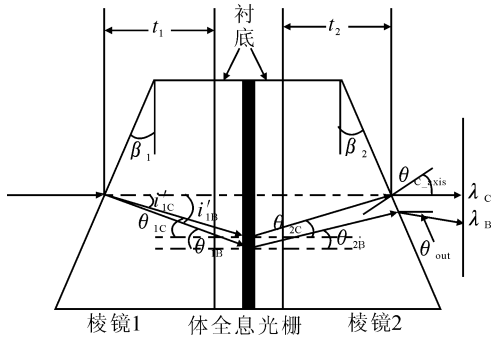


图 1 PGP 元件原理图

Fig. 1 PGP element schematic diagram

1.2 PGP 参数关系

在图 1 中,根据体全息衍射光栅情况下存在一个布拉格衍射角度,在这个角度下衍射效率最大理论值可达 100%。当入射波段满足布拉格衍射条件时,有:

$$2nd\sin\theta_B = \lambda_B \tag{1}$$

式中:n 为记录介质(DCG)的平均折射率;d 为光栅常数;λ_B 为光栅的布拉格衍射波长;θ_B 是对应布拉格衍射条件下光栅的入射角度。在棱镜表面平行光发生偏折,根据折射定律,有:

$$\sin\beta_1 = n_{\lambda 1}\sin(\beta_1 - \theta_\lambda) \tag{2}$$

式中:$n_{\lambda 1}$ 为棱镜 1 对应波长的折射率;β_1 为棱镜的顶角;θ_λ 为对应波长在光栅上的入射角。为使布拉格衍射波长在光栅上按照布拉格衍射角度入射,可以得到棱镜 1 的顶角 β_1 如下:

$$\beta_1 = \arctan[n_{B1}\sin\theta_B/(n_{B1}\cos\theta_B - 1)] \tag{3}$$

在中心波长处(中心波长处各参数下标采用 C 表示,棱镜 1 由 1 表示,棱镜 2 由 2 表示),θ_{1C} 由(2)式可求得:

$$\theta_{1C} = \beta_1 - \arcsin\frac{\sin\beta_1}{n_{B1}} \tag{4}$$

光栅面上光束的偏折按照光栅方程,可以得到经过光栅后的出射角为

$$\theta_{2C} = \arcsin[\lambda_C/nd - \sin\theta_{1C}] \tag{5}$$

通过棱镜 2 的出射角为 θ_{C_axis},为实现中心波长的直进直出,根据几何关系可以知道,θ_{C_axis} 和棱镜 2 的顶角 β_2 相等,即:

$$\beta_2 = \theta_{C_axis} = \arctan[n_{C2}\sin\theta_{C2}/(n_{C2}\cos\theta_{C2} - 1)] \tag{6}$$

任意波长的出射角度和光轴的夹角为

$$\theta_{\lambda-out} = \beta_2 - \arcsin[n_{\lambda 2}\sin(\beta_2 - \theta_{2\lambda})] \tag{7}$$

2 个棱镜厚度之间满足的关系为

$$t_1 = t_2\tan\theta_{2C}/\tan\theta_{1B} \tag{8}$$

当采用对称形式设计时,棱镜 1、2 材料相同,中心波长和布拉格衍射波长相等时,可以得到 2 个棱镜的参数相同,这和文献[7]中的结果完全一致。

1.3　体全息光栅的衍射效率分析

体全息布拉格衍射光栅的衍射效率可以采用电磁场严格耦合波理论[8](RCWA)、标量耦合理论[9]、基于矩阵和多光束干涉理论结合[10]进行分析计算。严格耦合理论可以得到精确的理论衍射效率,但是对于方程的求解必须使用数值方法求解,比较复杂;多光束干涉理论是一种近似的讨论方法;Kogelnik 的标量耦合得到的结果如(9)式所示:

$$\eta = \frac{\sin^2\sqrt{v^2+\xi^2}}{1+\xi^2/v^2},\ v = \frac{\pi\Delta nd}{\lambda\cos\theta_0},\ \xi = \Delta\theta\frac{\pi d}{\Lambda} \tag{9}$$

式中:d 表示光栅记录介质的厚度;Λ 为光栅的周期;θ_0 为布拉格条件下的入射角;$\Delta\theta$ 为布拉格入射角度偏离量;Δn 表示折射率调制度。当仅采用一级光谱时,非偏振情况下衍射效率可以用(10)式表示:

$$\eta_1 = \frac{1}{2}\{\sin^2(\frac{\pi\Delta nd}{\lambda\cos\theta}) + \sin^2[\frac{\pi\Delta nd}{\lambda\cos\theta}\cos(2\theta_\alpha)]\} \tag{10}$$

式中 θ_α 表示入射光线和出射光线的夹角。由(10)式可以看出,这种光栅的衍射效率与记录介质的厚度、光栅周期以及入射波长有关。

2　PGP 成像光谱仪系统

2.1　PGP 成像光谱仪原理

整个成像光谱仪的光学系统原理如图 2 所示。由前置望远系统、狭缝、准直镜、PGP 元件、成像镜、接收系统组成。望远镜将物方景像成像到狭缝处,狭缝位于准直系统的物方焦面上,准直光束经过 PGP 元件后按照不同的波段在空间分开,成像镜将不同波段的光束成像到像面接收装置,接收装置上的像是将狭缝按照不同谱段予以展开成像。一般的光谱仪系统是指从狭缝开始到接收元件之间的光学装置,整个光谱仪系统属于像方远心光学系统,这样可以有效地消除边缘视场渐晕。

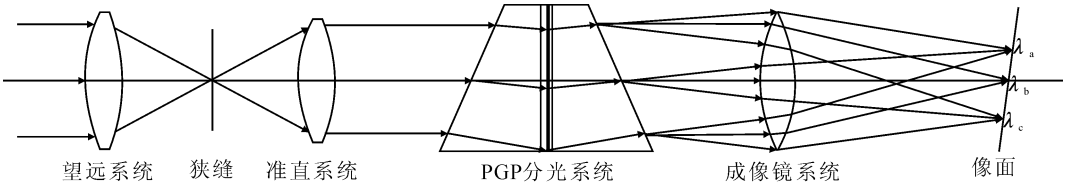


图 2　PGP 成像光谱仪光学系统

Fig. 2　Optical system of PGP imaging spectrometer

2.2　PGP 成像光谱仪特点

PGP 成像光谱仪具有以下特点:

1) 直视性。整个系统采用透射装置,从狭缝开始各光学元件保证共轴,按照所选则的中心波长和光栅常数,设计棱镜实现中心波长的无偏折成像,这对于整个机械结构和装调都是十分有利的。

2) 对称性。系统的准直镜和成像镜采用对称装置,放大率为−1,这种设计对于垂轴像差的校正十分有利,在设计准直镜和成像镜时只需要对纵轴像差进行严格的校正即可。

3) 光谱弯曲互补性。棱镜和光栅在单独作为分光元件时存在谱段弯曲,而且两者的弯曲方向刚好相反,棱镜弯向短波方向,光栅弯向长波方向,PGP 系统中将二者结合可以有效地消除谱线弯曲。但是由于两者的弯曲变化速率不同,这种补偿也是有限的,仅可能在某波长(一般是在中心波长处)实现零弯曲,补偿效应并非简单的代数和

差关系,这主要是由于不同波长的光在光栅上的入射角度不同所致。

4) 色散相加性。系统总的色散效果近似相当于光栅和棱镜色散效应之和,但是由于棱镜色散效率并没有光栅明显,实际起主要色散作用是为光栅。

5) 紧凑性。各光学元件之间衔接紧密,利于光谱仪小型化设计和轻量化,而且仪器的小型化也是将来发展的一个方向,很多文献都有关于小型化分光技术的研究[8]。

3　系统优化设计

3.1　设计指标

根据望远镜系统 F 数确定系统的物方数值孔径,从而实现系统的孔径匹配。系统设计的主要参数指标如表 1 所示。探测器选用柯达公司 KAF-0261 CCD,像元大小为 20 μm×20 μm,像元数为 512×512,在 0.4 μm～0.8 μm 量子效率大于 0.26。可用面积为 10.2 mm×10.2 mm,可以满足系统要求。

表 1　光学系统设计参数

Table 1　Design parameters of the optical system

物方数值孔径	波段/μm	最大畸变(小于)	通道数	MTF(大于)	缝长/mm
0.15	0.4～0.8	3 %	148	0.65	10

3.2　准直镜和成像镜设计

设计采用对称形式,两棱镜的参数完全相同,准直镜为成像镜的倒置形式,谱面上采用双像元合并,148 个通道共占用 296 个像元,谱面光谱维宽度 5.9 mm。选择中心波长为 ,棱镜材料选择普通的 K9 玻璃,利用(1)式、(2)式和(3)式求出棱镜的顶角大小为 13.212°。光栅周期为 ,记录介质的平均折射率为 1.52。利用公式(7)可以计算在上述波段范围内,边缘波长和光轴之间的夹角为 −4.9912°～4.7282°,因此成像镜的焦距可以由下式计算:

$$f=\frac{5.9}{\tan(4.7282)-\tan(-4.9912)}=34.5\ \text{mm}$$

选择四片式匹兹万物镜作为成像镜的初始结构,优化后结构形式如图 3 所示,焦距为 34 mm,系统在 25 lp/mm 处的 MTF 曲线如图 4 所示,球差和纵轴色差接近于零。

3.3　系统优化结果

将上述的成像镜、棱镜、光栅参数输入到 ZEMAX 中,设置狭缝宽度为 20 ,长度为 10 mm,进行人机交互式优化得到最终系统结构如图 5 所示。

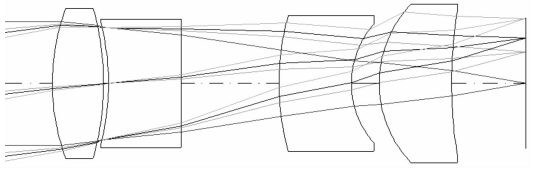


图 3　成像镜结构

Fig. 3　Structure of the image lens

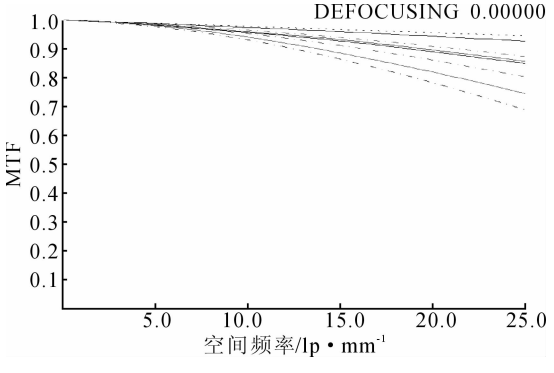


图 4　成像镜的 MTF 曲线

Fig. 4　MTF of the image lens

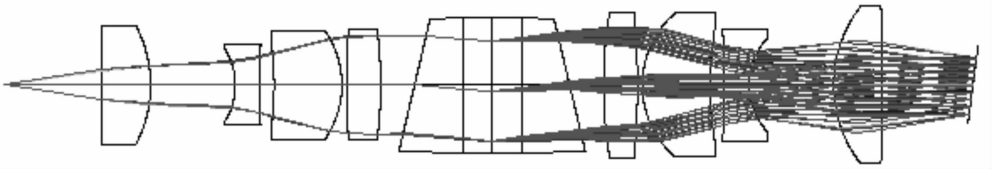


图 5　光学系统结构图

Fig. 5　Optical system structure

光学具体参数主要有两部分,PGP 元件参数,成像镜参数(准直镜是成像镜的倒置形式,两者参数相同)分别如表 2 和表 3 所示,光栏位于整个系统的中心处即光栅的前表面上,像面沿光轴倾斜角度为 7.46°。

表 2　PGP 元件参数

Table 2　Parameters of PGP device

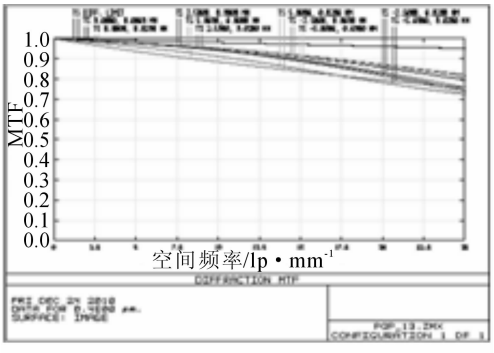
棱镜材料	棱镜厚度	棱镜顶角	光栅周期	衬底厚度	PGP 元件半高度
K9	5mm(中心)	13.212°	2.5 μm	3 mm	7 mm

表 3　成像镜参数

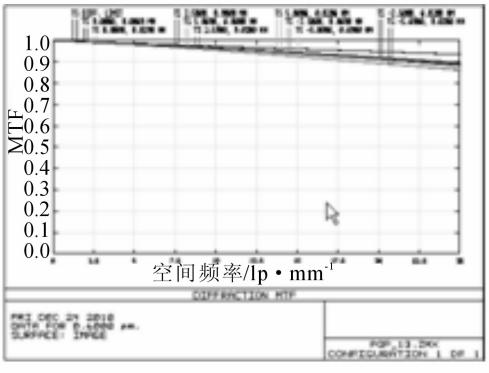
Table 3　The parameters of imaging lens

面序号	半径/mm	厚度/mm	材料	半高度
1	45.58	3.50	ZK9	7.6
2	−86.87	0.50		7.6
3	9.9	7.00	QK3	7.6
4	35.44	1.50		6.2
5	−75.06	2.50	ZF1	5.8
6	7.08	8.76		5.0
7	13.36	5.05	ZK9	8.2
8	−192.72	9.67		8.0
image	Infinity			6.0

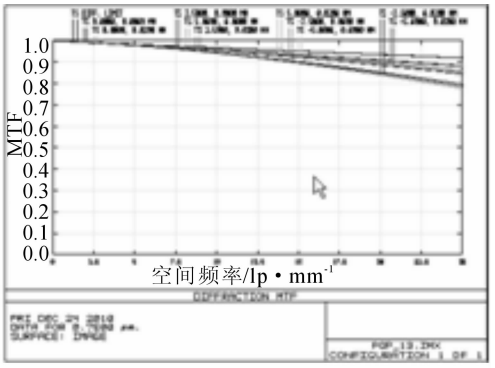
用 MTF 对整个波段进行评价,按照探测器的像元大小计算截止频率为 25 lp/mm,得到中心波长和边缘波段的 MTF 曲线如图 6 所示。整个波段和视场内点列斑的 RMS 最大值直径小于 18 μm,在中心视场和波长处仅为 5.6 μm。在中心波长处 MTF 大小接近衍射极限达到 0.9 左右,整个视场和波段的 MTF 都达到 0.7 以上,中心视场最大畸变量为 1.795 5%,在光谱方向上的弯曲约为 50 μm,相当于 2 个像元。



(a) 0.45 μm



(b) 0.6 μm



(c) 0.75 μm

图 6　不同波长处的 MTF 曲线

Fig. 6　MTF of the system in different wavelength

系统的像面按照不同波段在空间分开如图 7 所示。像面光谱维总的高度为 5.9 ,从 −3.027 mm～2.873 mm,空间方向长度为 10 mm,系统长度为 90 mm,此时成像物镜对于中心波长的 MTF 如图 8 所示,达到 0.85 以上,接近衍射极限,成像镜的焦距为 341.1 mm。

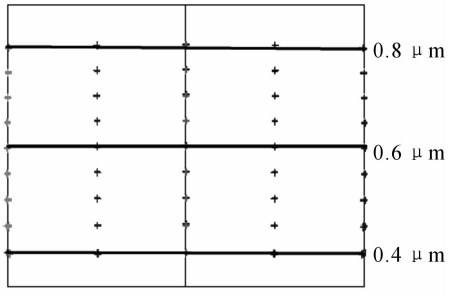


图 7　像面光谱分布(每隔 50 nm)

Fig. 7　Spectrum diagram in image plane

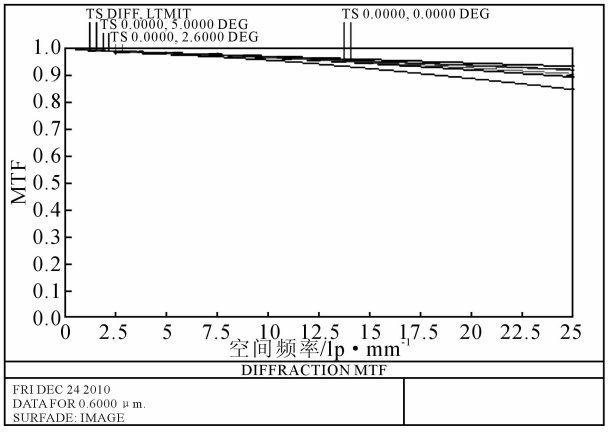


图 8　成像镜中心波长 MTF

Fig. 8　MTF of image lens at 0.6 μm

3.4 结果讨论

PGP 成像光谱仪系统的性能不仅和 MTF 有关,还和衍射效率以及系统的透过率有关,光学玻璃材料的透过率一般都较高,好的光学玻璃材料可达 95 %以上,以下仅对 PGP 元件的衍射效率进行分析。

PGP 衍射效率主要指体全息布拉格衍射光栅的衍射效率。根据(10)式,利用 Matlab 计算各个波段在光栅上的入射角度和衍射角度,可以求得体全息光栅的衍射效率和厚度、波长之间的关系,但是考虑到整个系统波段较宽,并不能在衍射效率最高处选择其对应的波长为中心波长,因为相对于中心波长来说,短波方向衍射效率下降的速率远大于长波方向,因此在整个波段,记录介质厚度选择 0.015 5 mm,此时边缘波段和中心波长的衍射效率均大于 0.6,在 580 nm 衍射效率达到极值,约为 99.6 %。

成像镜的第三块镜子对于成像质量敏感度影响很大,因此其公差相对于其他元件较紧。理想情况下棱镜的厚度对于系统像质影响为零,但是它会影响系统的透过率和体积,因此应选择适合装配且较薄的棱镜,公差可相对放松,本设计中选择棱镜的厚度为 5 mm。

本设计和相关类似设计相比,入射狭缝较长。这对于空间探测来说可以有效地增大探测地面的范围,也为设计宽视场系统提供了参考。

4 结论

在详细分析 PGP 元件分光原理的基础上,对其设计参数之间的关系进行了推导,根据系统的参数,给出了系统的特点,并按照所要求的设计指标,设计了一个波段在 400 nm～800 nm,总长度为 90 mm,物方数值孔径为 0.15,最大畸变小于2%的光学系统。整个光学系统采用透射式对称结构,这对于镜座设计和装调都是非常方便的。通过计算,首先设计了系统的成像镜结构,再将整个系统组合到软件中进行优化设计,使得系统的 MTF 在各个视场和波段内均大于 0.7,在中心波长处可达 0.85 以上,接近衍射极限。对系统的体全息光栅衍射效率进行了分析,选择出合适的厚度,既考虑整个系统的衍射效率,又为光栅的加工提供了参考数据。

参考文献:

[1] 汪逸群,颜昌翔,苗春安. 星载高分辨率超光谱成像仪分光方式的选择[J]. 中国光学与应用光学,2009,2(4):304-308.
WANG Yi-qun, YAN Chang-xiang, MIAO Chun-an. Choice of spectral-splitting modes in space-borne hyper-spectral imager[J]. Chinese Journal of Optics and Applied Optics, 2009, 2(4): 304-308. (in Chinese with an English abstract)

[2] 郑玉权,王 慧,王一凡. 星载高光谱成像仪光学系统的选择与设计[J]. 光学精密工程,2009,17(11):2629-2637.
ZHENG Yu-quan, WANG Hui, WANG Yi-fan. Selection and design of optical systems for spaceborne hyperspectral imagers[J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(11): 2629-2637. (in Chinese with an English abstract)

[3] 常凌颖,赵葆常,邱跃洪,等. AOTF 成像光谱仪光机系统设计[J]. 应用光学,2010,31(3):345-348.
CHANG Ling-ying, ZHAO Bao-chang, QIU Yue-hong, et al. Optical and mechanical design of imaging spectrometer based on acousto-optic tunable filter [J]. Journal of Applied Optics, 2010, 31(3): 345-348. (in Chinese with an English abstract)

[4] WUTTIG A, RIESENBERG R. Sensitive hadamard transform imaging spectrometer with a simple MEMS[J]. SPIE, 2003, 4481: 167.

[5] AIKIO M. Hyperspectral prism-grating-prism imaging spectraograph[D]. Finland: University of Oulu, 2001.

[6] 肖功海,舒 嵘,薛永祺[J]. 显微高光谱成像系统的设计[J]. 光学精密工程,2004,12(4):367-372.
XIAO Gong-hai, SHU Rong, XUE Yong-qi. Design of microscopic hyperspectral imaging system[J]. Optics and Precision Engineering, 2004, 12(4): 367-372.

[7] 朱善兵,季轶群,宫广彪,等. 棱镜-光栅-棱镜光谱成像系统的光学设计[J]. 光子学报,2009,38(9):2270-2273.
ZHU Shan-bing, JI Yi-qun, GONG Guang-biao, et al. Optical design of prism-grating-prism imaging spectrometers[J]. Acta Photonica Sinica, 2009, 38(9): 2270-2273. (in Chinese with an English abstract)

[8] MOHARAM M G, GAYLORD T K. Rigorous couple-wave analysis os planar-grating diffraction[J]. OSA, 1981, 71(7): 811-818.

[9] KOGELNIK H. Couple wave theory for thick hologram gratings[J]. Bell Syst. Tech. J.,1969,48(9):2909-2047.

[10] 冯德军,开桂云,刘志国,等. 用一种矩阵计算方法分析体积全息光栅[J]. 光子学报,1999,28(12):1102-1105.
FENG De-jun,KAI Gui-yun,LIU Zhi-guo,et al. Analysis of volume hologram grating through a matrix method[J]. Acta Photonica Ainica,1999,28(12):1102-1105. (in Chinese with an English abstract)

[11] 黄振宇,孙利群. 基于线阵 CCD 的小型光谱仪光度特性研究[J]. 应用光学,2007,28(5):564-568.
HUANG Zhen-yu, SUN Li-qun. Photometric performance of miniature spectrometer based on linear CCD[J]. Journal of Applied Optics,2007,28(5):564-568. (in Chinese with an English abstract)

(上接第 18 页)

[14] REN Hong-wen, WU S T. Adaptive liquid crystal lens with large focal length tenability [J]. Optics Express, 2006, 14(23): 11292-11298.

[15] CORLE T R, CHOU C H, KINO G S. Depth response of confocal optical microscopes[J]. Optics Letter,1986,11(2):770-772.

[16] 安连生,李林,李全臣. 应用光学[M]. 北京理工大学出版社,2002.
AN Lian-sheng, LI Lin, LI Quan-chen. Applied Optics[M]. Beijing:Beijing Institute of Technology Press,2002.