

· 光学设计 ·

基于 AOTF 的光学系统设计

程伟宁, 孙宏宇

(中国电子科技集团公司光电研究院, 天津 300308)

摘要: 基于声光可调谐滤波器(acousto-optic tunable filter, AOTF)工作原理, 设计出一工作波段 500~1 000 nm, 视场 $10^\circ \times 10^\circ$ 的光谱成像系统。该系统由三组镜头组合而成, 前置物镜与准直镜形成望远系统, 后组成像镜头采集 AOTF 产生的正一级衍射光, 利用 ZEMAX 软件进行消像差设计, 全系统在 40 lp/mm 处的 MTF 均大于 0.5, 其他像差也达到了要求。

关键词: 声光可调谐滤波器; 光谱成像系统; 光栏

中图分类号: O433

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2016)-02-0001-04

Optical Design of Hyper-spectral Imaging System Based on AOTF

CHENG Wei-ning, SUN Hong-yu

(Academy of Opto-Electronics, China Electronics Technology Group Corporation (AOE CETC), Tianjin 300308, China)

Abstract: Based on the operation principle of acousto-optic tunable filter (AOTF), a hyper-spectral imaging system with 500~1 000 nm operation wavelength and $10^\circ \times 10^\circ$ field of view is designed. The system is consisted of three groups of optic lenses. The fore-optical system is a focal system including objective and collimating lens, the back-imaging lens collects the +1 order diffraction beams produced by the AOTF. The whole system is optimized by ZEMAX, and imaging resolution is better than 40 lp/mm when MTF is 0.5, other aberration requirements are met as well.

Key words: acousto-optic tunable filter (AOTF); hyper-spectral imaging system; stop

随着光谱成像技术在星载、机载平台上的成功应用,其在军事、农业、生物医学等诸多领域得到了广泛的推广。光谱成像仪器的核心部件是分光器件,根据仪器的波长扫描机制,可以将其分为两类:传统机械扫描分光 and 电调谐分光。采用机械扫描方式的光谱仪由于存在运动部件,使得波长调整速度较慢,可靠性差,而采用电调谐分光的光谱仪则不存在上述问题,其具有扫描速度快、体积小、波长任意选择、通光孔径大、可靠性高等优点^[1]。自 AOTF 声光晶体出现后,在光谱仪器上迅速得到了应用,成为最有发展前景的一种光谱成像手段^[2]。

AOTF 成像光谱技术在国外已经取得了一系列的研究成果,其中以美国陆军实验室 (army research laboratory, ARL) 的研究最为突出,其研制成功了多台 AOTF 成像光谱仪,所涉及的光谱范围几乎覆盖

了从可见到热红外的所有波段^[3]。在国内, AOTF 用于光谱仪器起步比较晚,应用研究主要集中于非成像的光谱探测,因此,研究基于 AOTF 的成像技术具有重要的理论意义和应用价值。首先介绍了 AOTF 的工作原理,由于晶体的声光效应使得入射光发生衍射效应,利用 ZEMAX 软件根据晶体已知的光学参数建立了其衍射模型,可以很精确的模拟整个光学系统的光路、确定各个光学组分的位置、尺寸,最后按照使用要求设计了一结构紧凑、像质优良的 AOTF 光学系统。

1 AOTF 工作原理

AOTF 通过声光相互作用,对入射光进行单色衍射分光,声波在介质中传播时,使介质发生弹性

形变,引起介质的密度呈疏密相间的交替分布,因此介质的折射率也随着发生相应的周期性变化。这如同一个光学相位光栅,当光波通过此介质时,会产生光的衍射。衍射光的强度、频率、方向等都随着超声场的变化而变化。

当AOTF晶体加工完成后,由晶体出射的衍射波长仅受射频驱动频率的控制,通过改变射频驱动频率即可改变衍射波长,将入射的复色光出射为波长可变的单色衍射光,且衍射光与未衍射光有一定的夹角,可以实现两种光的空间分离。衍射波长的切换速度一般为微秒量级,因此,AOTF可以实现电控、快速的光谱扫描。

此外,对AOTF同时施加多个射频驱动频率,将会激发多个波段的衍射光,通过改变驱动频率的频差,可以使各衍射波段发生部分重叠或分离。因此可以通过改变射频驱动频率的个数以及频差调整和控制AOTF器件总的响应带宽,即系统光谱分辨率。利用此种机理实现AOTF的成像光谱系统对成像波段的挑选,为各波段配置合适的光谱分辨率,有效提高了成像光谱系统的灵活性^[4]。

2 AOTF 光学系统设计

目前AOTF成像光谱仪受晶体尺寸(一般为 $10\text{ mm}\times 10\text{ mm}$)与入射孔径角的限制比较严重。由晶体衍射性质可以知道,入射光和衍射光会沿入射方向继续传播,两者有一定的夹角,如图1所示,是一束光经晶体后产生的一级衍射光与零级光。



图1 晶体的衍射光与零级光

当入射光的角度较小时,一级光和零级光可以分开;但随着入射光角度的增大,会使得入射光产生的一级光与零级光发生重叠现象,最终会使最后所成图像受到影响,致使所成像的信噪比下降,如图2所示。

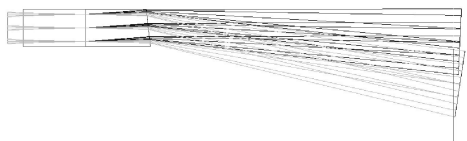


图2 不同入射角度的衍射光与零级光

因此,为了得到较好的图像,进入到晶体的光线角度必须限制在一定范围之内,在实际应用中,AOTF可接收的光束孔径通常不能大于 $5^\circ\sim 6^\circ$ 。同时,由于衍射效率、衍射带宽受光线入射角度的影响,当入射角度在 3° 以内时,衍射光带宽基本上没有变化,当入射角再增加 1° 时,则衍射带宽将增加50%,而且当光线入射角大于晶体可接收的光束立体角时,衍射效率就变得非常小。

由于AOTF工作原理的限制,通常要求光学系统都是多个子光学系统的组合,根据技术指标及探测器类型,必须根据系统要求合理分配晶体前后各光学组分的参数、相对孔径及光阑位置,对光学系统进行最优化设计^[5]。

在AOTF光学系统中存在视场光阑和孔径光阑,两种光阑可设置在不同位置。当视场光阑设置在AOTF上时,相当于一次像面就在晶体上,由于获得大尺寸的晶体有困难,系统的视场就会受晶体限制,同时由于受晶体可接收的孔径角限制,能量利用率较低,因此一般将孔径光阑设置在晶体上^[6-7]。

AOTF光学系统一般由前置物镜组、准直镜组、AOTF、成像镜组、CCD探测器组件组成,如图3所示。

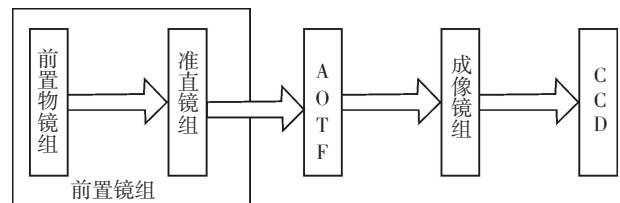


图3 AOTF光学系统的组成

前置物镜组:将目标成像于视场光阑上,形成一次像面;

准直镜组:将通过视场光阑的光束准直成平行光,然后入射至AOTF。

AOTF:选择成像中心波长,使其出射衍射光。

成像镜组:将AOTF衍射的平行光束会聚成像于CCD上。

CCD相机:完成光电信号转换、信号输出。

在AOTF原理研究的基础上,还研制了基于AOTF的成像系统的原理样机。样机工作于 $500\sim 1000\text{ nm}$ 波段,视场角为 $10^\circ\times 10^\circ$,系统焦距为 $\sim 30\text{ mm}$ 。

由于该系统的视场角要求较大,而AOTF晶体所能接收的入射孔径角较小,所以前置物镜组、准

直镜组还承担着压缩光线入射角的作用。根据光学传输原理,当光束孔径角变小时,其光束口径将变大。但是由于制作工艺的限制,AOTF 晶体尺寸不能做的足够大,所以前置镜组对光束入射角的压缩倍数不能太大。结合光学系统焦距、入射视场角、晶体可接收入射孔径角、晶体尺寸等因素,经过分析计算,合理分配了系统的各个组分焦距,单独设计各个组分,使其像差校正到最佳,然后在 ZEMAX 中,根据 AOTF 晶体的参数建立衍射模型,在设计过程中可以模拟不同入射角的光线衍射情况、评价成像质量,经多次修改后根据最终的设计结果,综合评价整个组合光学系统的像质。

由于系统的工作波段跨度达到了 500 nm,且要求在各个波段上都有很好的像质,因此在设计过程中需要对整个谱段复消色差。复消色差可以通过光学玻璃材料的选择、匹配和光学系统各组元光焦度的分配等方式来实现,通过合理选择玻璃材料,在 ZEMAX 中反复优化参数可以在整个波段范围内得到很高的像质。光学系统色差如图 4 所示。

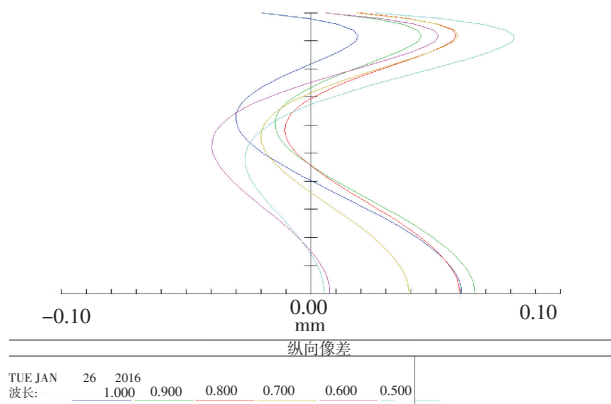


图4 光学系统色差

系统中采用的 CCD 单像素的尺寸为 13 μm ,可计算出其奈奎斯特频率为 40 lp/mm,设计后的光学系统全波段传递函数曲线如图 5 所示。由图 5 可知,系统各视场的传函接近衍射极限,说明光学系统成像质量良好。

图 6~图 9 分别是系统 1 000 nm、800 nm、600 nm、500 nm 波段的传递函数。由图可知,系统各个波段的性能都接近了衍射限,说明在 AOTF 工作时各个波段系统都能得到较高的像质。

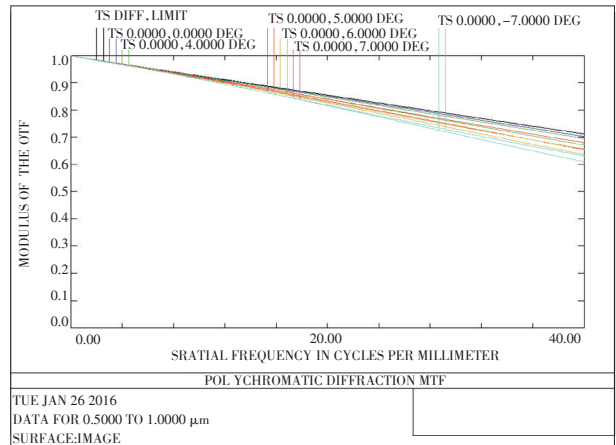


图5 系统全波段传递函数

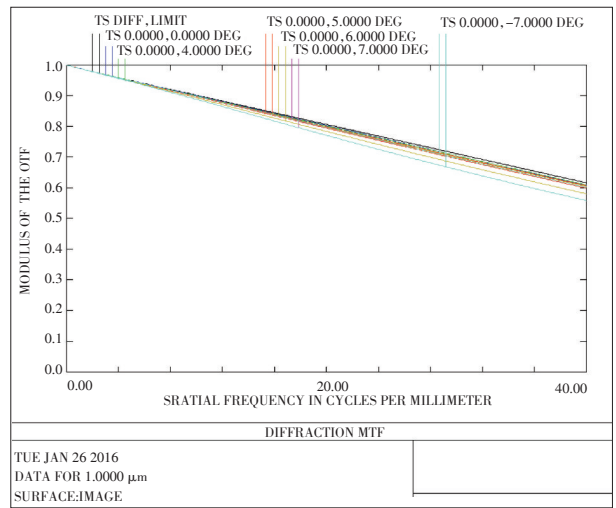


图6 系统 1 000 nm 波段传递函数

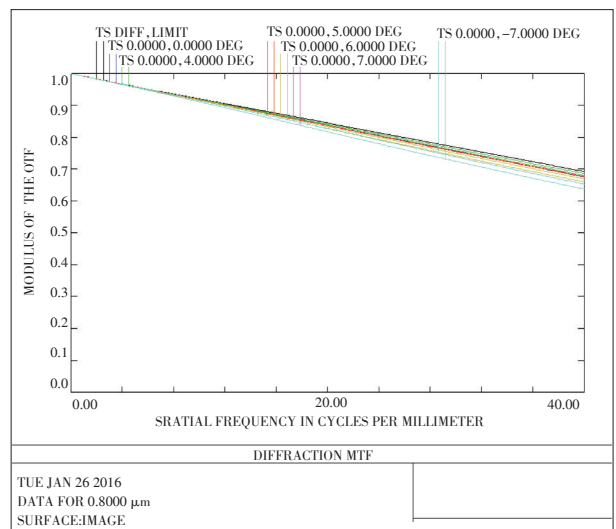


图7 系统 800 nm 波段传递函数

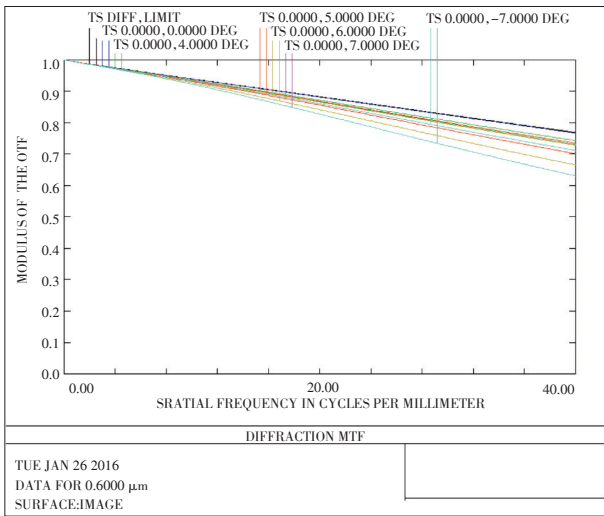


图8 系统 600 nm 波段传递函数

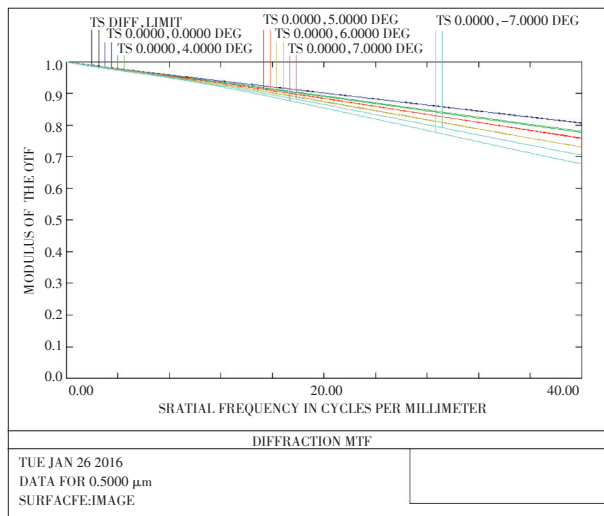


图9 系统 500 nm 波段传递函数

在使用中要求将零级光与衍射光分开,成像镜组与晶体有一定的距离,为了减小系统的体积,在光路中加入了两块反射镜对光路进行折转,如图10、图11所示。

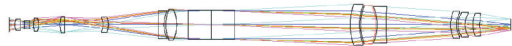


图10 系统光路图

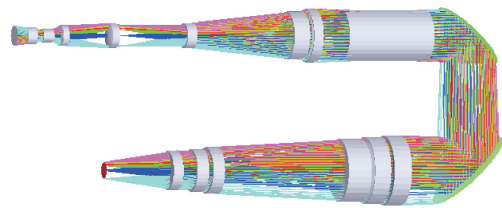


图11 折转光路图

3 结论

介绍了AOTF晶体的工作原理,并利用ZEMAX软件建立了晶体模型,对晶体的衍射进行了仿真分析,根据系统指标对AOTF光学系统各个组分进行了指标分解、设计,系统像质曲线表明,该系统光学传递函数(MTF)接近衍射极限,该系统可用于AOTF凝视型成像光谱系统,可用于伪装目标辨识、目标材质识别等目标探测技术。

参考文献

- [1] 姜庆辉,邱跃洪,赵葆常,等.AOTF 偏振光谱成像数据采集系统设计[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(1): 218-221.
- [2] 刘济帆,马艳华,张雷,等.基于AOTF的新型成像光谱系统[J]. 红外与激光工程, 2013, 42: 3065-3069.
- [3] 胡善洲,陈奋飞,曾立波,等.成像型声光可调谐滤光器关键性能指标测试方法研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(1): 271-274.
- [4] 常凌颖,赵葆常,邱跃洪.声光可调谐滤波器成像光谱仪光学系统设计[J]. 光学学报, 2010, 30(10): 3021-3022.
- [5] 赵慧洁,周鹏威,张颖,等.基于胶合棱镜的AOTF成像光谱仪横向色差校正[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(10): 2869-2874.
- [6] 常凌颖,赵葆常,邱跃洪,等.AOTF成像光谱仪光学系统的最优方案选择[J]. 应用光学, 2012, 33(1): 5-8.
- [7] 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): 345-349.