紫外星敏感器光学系统设计及其鬼像分析

朱 杨[1,2],张 新[1],伍雁雄[1],张建萍[1],史广维[1],王灵杰[1]

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 中国科学院光学系统先进制造技术重点实验室,
吉林 长春 130033;2. 中国科学院大学,北京 100049)

摘 要:针对空间紫外波段航天器自主导航姿态敏感器的特殊需求,提出基于正组为 FK5 和熔石英、负组为 QF1 的新型紫外玻璃组合方法,设计了波段 330~365 nm、焦距 80 mm、*F* 数 1.6、视场角 8°×8°的紫外星敏感器。基于近轴鬼像能量计算的方法对鬼像抑制指标进行计算。利用 Code V 对系统轴上一阶鬼像进行初步的分析与判断,再利用非序列光线追迹对系统轴外多阶鬼像进行仿真计算,得到完备的轴外鬼像能量分布。结果表明,该光学系统结构紧凑,像质良好,各视场成像弥散斑均方根半径 10 μm 内能量集中度大于 80%,相对畸变优于 0.05%,在相差 7 等星的动态范围下,像面处亮星最大鬼像光斑照度仅为暗星照度的 1/21,满足紫外星敏感器的探测需求。

关键词:紫外星敏感器; 光学设计; 杂散光分析; 鬼像

中图分类号:TN23 **文献标志码**:A **DOI**:10.3788/IRLA201645.0118003

Optical system design and ghost analysis for ultraviolet star sensor

Zhu Yang[1,2], Zhang Xin[1], Wu Yanxiong[1], Zhang Jianping[1], Shi Guangwei[1], Wang Lingjie[1]

(1. Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: To satisfy the requirements of space ultraviolet autonomous navigation sensor, a method based on usual glass combination was proposed to supersede costliness special glass such as CaF_2. An ultraviolet star sensor was designed, whose waveband was 330-365 nm, *F* number was 1.6 and field of view was 8°×8°. The ghost suppression target was calculated by paraxial ray tracing. The paraxial first-order ghost was preliminarily analyzed and estimated by Code V, then the off axis multi-orders ghost and energy distribution was simulated by non-sequential ray tracing technology. The results show that this optical system has compact structures and high image quality. The dispersion spot radius is smaller than 10 μm, and relative distortion is less than 0.05%. With a target dynamic range of 7 magnitudes, the ghost irradiance of the brightest star is 1/21 of the darkest star and meets the requirements of ultraviolet star sensor.

Key words: ultraviolet star sensor; optical design; stray light analysis; ghost

收稿日期:2015-05-11; **修订日期**:2015-06-15

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金(61007009)

作者简介:朱杨(1989-),男,博士生,主要从事光机系统设计与杂散辐射抑制方面的研究。Email:zhuyang_1989@126.com

导师简介:张新(1968-),男,研究员,博士,主要从事非常规复杂光学系统设计等方面的研究。Email:optlab@ciomp.ac.cn

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

0 引 言

星敏感器是空间飞行器中广泛使用的一种高精密空间姿态测量仪器，它通过探测天体中不同位置的恒星辐射来获取运载体的姿态信息[1-3]。与可见和红外波段相比，紫外星敏感器不易受地面和气象特征影响，背景信号弱，信噪比高，是观星的极佳谱段[4-5]。光学系统的成像性能是制约星敏感器测量精度的重要因素，而紫外波段下可选用的光学材料较少，且折射率随波长变化较为剧烈，难以同时实现大视场、长焦距、大相对孔径、低色差、低畸变、低杂光等要求。鬼像是杂散光的一种，是由成像光线被透镜表面多次剩余反射后在像面汇聚形成的，若不进行有效的抑制，将对成像信息造成危害[6]。由于菲涅耳损耗，在紫外波段下不同介质间的光学薄膜剩余反射率较大，鬼像问题较为严重，对于有大动态范围观测需求的星敏感器尤为突出，因此在光学方案设计阶段就应对鬼像抑制指标进行规划，并在优化过程中进行一定的控制，以避免出现颠覆性错误。

目前报道的星敏感器多工作于可见或红外波段，而紫外星敏感器则并不多见[2-3,7-8]。现有的紫外光学系统普遍采用 CaF_2 等昂贵的特殊玻璃来实现像差的校正[9-10]，抗腐蚀性差，难以适用于环境特性苛刻的空间载荷。

为满足空间紫外探测相关要求，提出基于近轴鬼像能量计算的方法，对鬼像抑制指标进行计算。提出基于正组为 FK5 和熔石英、负组为 QF1 的新型紫外玻璃组合方法，代替正组为 CaF_2、负组为熔石英的常规玻璃组合，设计了波段为 330~365 nm、焦距为 80 mm、相对畸变优于 0.05%的大相对孔径紫外星敏感器。采用 Code V 中的近轴一阶鬼像分析模块在光学优化设计过程中实现对鬼像弥散斑的动态控制，并利用非序列光线追迹对轴外视场高阶鬼像的能量分布进行模拟。该系统采用全球面双高斯结构复杂化设计，成像质量优良，具有小型化、信噪比高等特点。

1 近轴鬼像能量与抑制指标计算原理

鬼像入瞳和出瞳的位置是由鬼像主光线与光轴交点确定的，鬼像入瞳和出瞳的口径尺寸则由鬼像边缘光线决定，一般情况下，鬼像光线和成像光线有所不同，轴外点光源在成像高斯像面处的鬼像模型如图 1 所示[11]，轴外点目标的辐射亮度为 L_0，与鬼像入瞳的间距为 L_g，则鬼像入瞳处接收到的目标光通量 $\Phi_{en,g}$ 为：

$$\Phi_{en,g}=I_0\Omega_{en,g}=I_0\frac{A_{en,g}}{L_g^2} \tag{1}$$

式中：I_0 为点目标光强；$\Omega_{en,g}$ 为目标与鬼像光阑间的立体角；$A_{en,g}$ 为鬼像光阑面积。

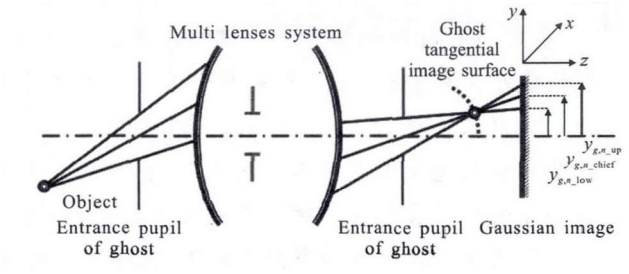

图 1 成像高斯像面处的鬼像模型

Fig.1 Ghost model at Gaussian image plane

则鬼像出瞳处的鬼像能量为：

$$\Phi_{xp,g}=T_g\Phi_{en,g}=T_gI_0\frac{A_{en,g}}{L_g^2} \tag{2}$$

式中：T_g 为鬼像经过光学系统到达出瞳过程中的总透过率，对于一阶鬼像，$T_g=R_2R_1T_1T_2\cdots T_N$；$R_1$ 和 R_2 为生成鬼像表面的剩余反射率；$T_1T_2\cdots T_N$ 为系统中 N 个光学元件的总透过率。鬼像在成像高斯像面处的辐照度 $E_{g,n}$ 则与鬼像在高斯像面处的弥散斑半径成反比，其表达式为：

$$E_{g,n}(y)=T_gI_0\frac{A_{en,g}}{L_g^2A'_{en,g}}\mathrm{circ}\left(\frac{y-y_{g,n_chief}}{|y_{g,n_up}-y_{g,n_low}|}\right) \tag{3}$$

式中：$A'_{en,g}$ 鬼像在高斯像面处的弥散斑面积；y 为成像高斯像面处 y 轴方向的纵坐标；y_{g,n_chief} 为鬼像主光线在像面上的纵坐标；y_{g,n_up} 和 y_{g,n_low} 分别为鬼像的上、下边缘光线在像面上的纵坐标。为简化计算，当鬼像弥散斑圆整度较好时，上式可近似为：

$$E_{g,n}(y)=T_gI_0\frac{A_{en,g}}{L_g^2A'_{en,g}}\mathrm{rect}\left(\frac{y-y_{g,n_chief}}{2r_{g,n}}\right) \tag{4}$$

式中：$r_{g,n}$ 为成像高斯像面处鬼像弥散斑的均方根半径。对于非相干成像光学系统，系统整体鬼像辐照度可看成是多种路径下的多阶鬼像的辐照度叠加。

$$E_{g,n_total}=\sum_N E_{g,n} \tag{5}$$

在一般的观测系统中，常以作用距离衡量成像

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

系统的探测能力，而对于探测无穷远星光信号的星敏感器来说，可采用目标信号强度所对应的信噪比来衡量成像系统的探测能力。不同恒星的星等与辐照度间的关系为：

$$mv_2-mv_1=-2.5\log\frac{E_2}{E_1} \tag{6}$$

鬼像的抑制原则为：通过光学系统优化设计，使系统响应的最弱目标与视场内最亮目标的鬼像辐照度之比大于系统信噪比。则有

$$SNR=\frac{E_{\text{target_min}}}{E_{g,n_\text{total}}}=\frac{E_{\text{target_max}}/K}{E_{g,n_\text{total}}} \tag{7}$$

式中：K 为系统对目标响应的动态范围上下限之比。若已知星等 $mv_{\text{target_min}}$、$mv_{\text{target_max}}$、SNR 和光学元件表面透过率与剩余反射率，通过联立公式(4)~(7)即可求出满足鬼像抑制需求的鬼像弥散斑半径 $r_{g,n}$ 的最小值。

$$r_{g,n}=T_g\cdot K\cdot R_{\text{target_max}}\cdot SNR\cdot C_{2N}^2\cdot\eta \tag{8}$$

式中：C_{2N}^2 为 N 个光学元件产生一阶鬼像的所有光线路径数量；η 为所有关系路径中鬼像点斑 RMS 小于像面尺寸的路径所占几率，根据经验 η 一般取 0.05~0.2，通过初始光学设计结果下的初步鬼像分析结果确定该系统的主要鬼像关键路径范围并将 η 取 0.1。根据观测需要亮暗目标差 7 等星，联立公式(6)~(7)可得 K 约为 200。若系统 SNR 为 10，每个光学表面的剩余反射率为 5%，则计算求得的鬼像均方根半径 $r_{g,n}$ 为 0.75 mm，即光学系统中所有鬼像路径下的鬼像半径均需大于 0.75 mm。

2 紫外星敏感器光学设计实例

根据空间恒星探测的应用需求，确定紫外星敏感器光学系统主要设计指标参数如表 1 所示。

表 1 紫外星敏感器光学系统设计指标

Tab.1 Specifications of ultraviolet star sensor optical system

Parameters	Targets
Focal length/mm	80
Field of view/(°)	8×8
F number	1.6
Waveband/nm	330-365
Energy concentration	≥80% in 30 μm RMS
Distortion	≤0.1%
SNR of ghost	≥10
RMS of ghost/mm	≥0.75
Pixel size/μm	13

对于紫外宽谱段下的光学系统，因难以选取高色散火石玻璃作为消色差玻璃对，光学设计上的主要挑战便是色差校正。常用的紫外玻璃特性如表 2 所示，包括 CaF_2、LiF、熔石英和蓝宝石等晶体材料[12-14]。氟化物晶体材料的紫外透过截止波长较短，但其可加工性较差且对温度变化较为敏感。由表 2 可知晶体材料具有较好的色散特性，易与火石玻璃配对消色差，但其价格大多较为昂贵，且在短波波段会产生轻微的双折射，需尽量避免用作大光焦度的透镜。

表 2 常用紫外波段光学玻璃特性

Tab.2 Characters of common ultraviolet optical glass

Materials	Index @365 nm	Abbe number	Trans (5 mm) @350 nm	50% trans cutoff/nm
CaF_2	1.445	95.31	0.986	130
Fused silica	1.458	67.8	0.920	170
LiF	1.405	97.29	0.930	125
FK5_Schott	1.504	70.41	0.995	295
QF1_CDGM	1.579	45.87	0.981	315
K6_CDGM	1.532	60.46	0.990	310

消色差设计的基本原则是正透镜选用 v 值大的材料，负透镜选用 v 值小的材料[9]。然而紫外波段下绝大部分光学玻璃的透过率很低，可用光学材料较少，折射率普遍较低，且色散特性相近，给像差校正带来极大的困难。紫外波段下常用 CaF_2 作为正透镜材料，用熔石英作为负透镜材料，二者阿贝数之差为 27.4。而 FK5 与 QF1 玻璃组合的阿贝数之差为 24.5，虽略小于 CaF_2 与熔石英玻璃组合，但 FK5 与 QF1 的折射率高于 CaF_2 与熔石英，有利于高级像差的校正。综合考虑像差校正与成本控制，该系统采用双高斯型光学系统作为初始结构进行复杂化设计，采用 FK5 和 QF1 常规玻璃，避免使用 CaF_2 等昂贵的特殊玻璃，在保证像质前提下有效降低系统成本。

光学系统结构如图 2 所示，由于第一片正透镜暴露在外，需有良好的理化性能和耐辐射性能并兼顾部分像差的校正，因此选择熔石英作为第一片透镜材料。其余正透镜组玻璃选用 FK5，负透镜组玻璃选用 QF1。系统结构紧凑，在保证总体尺寸不超包络前提下尽量延长后工作距。

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

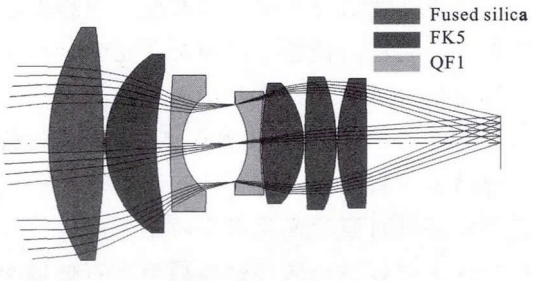

图 2 光学系统结构图

Fig.2 Layout of optical system

光学系统的传递函数(MTF)曲线和点列图分别如图 3、图 4 所示，各视场的 MTF 曲线在截止频率 40 lp/mm 处均大于 0.7，光学系统弥散斑的形状与尺寸得到较好的控制，最大视场处的点列图均方根半径为 9.4 μm。系统能量集中度曲线如图 5 所示，在弥散斑均方根半径为 13 μm (一个像元内)能量集中度大于 80%。光学系统畸变如图 6 所示，边缘视场相对畸变小于 0.05%。光学系统成像质量良好，各项指标均满足设计要求。

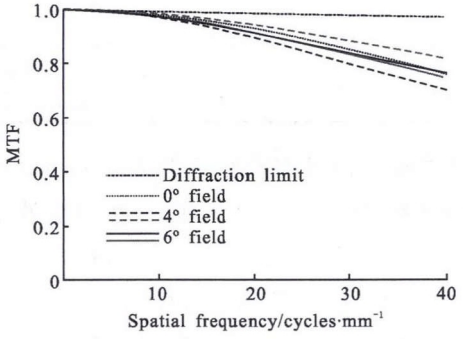

图 3 光学传递函数曲线

Fig.3 MTF curves of system

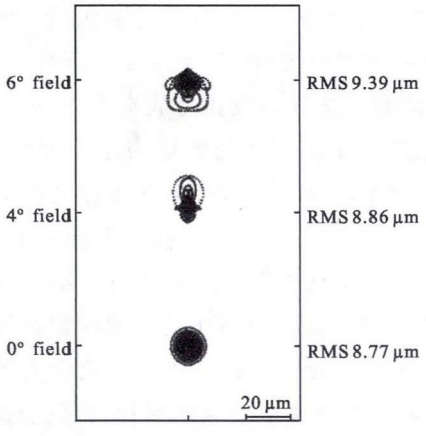

图 4 光学系统点列图

Fig.4 Spot diagram of optical system

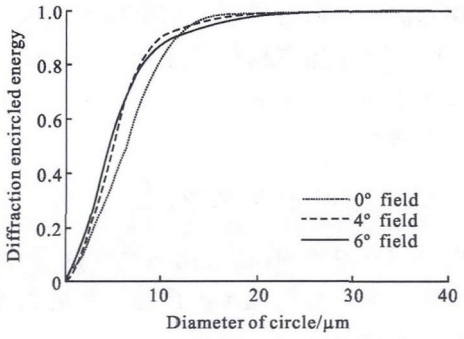

图 5 系统能量集中度曲线

Fig.5 Energy concentration of system

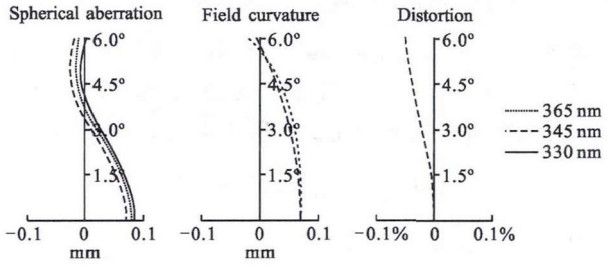

图 6 球差、场曲及畸变设计结果

Fig.6 Curves of spherical, field curves and distortion

3 星敏感器鬼像分析

任何透射系统都会因具有不同折射率的光学介质间的菲涅耳损耗，使光线经过介质间时产生剩余反射，当这些不规则的剩余反射光线到达像面时，会在像面处形成鬼像。任何角度入射的光线都会在不同透射介质间产生鬼像，一般成像视场内或其附近角度入射的光线形成的鬼像较为严重。当产生鬼像的光线进入成像光路时，若不进行有效的抑制，便会在目标图像附近形成一系列重影，严重影响系统的成像质量与探测性能。

与可见光波段相比，光学玻璃在紫外波段下的透过率普遍较低，即使镀膜后其透射特性也仍相对较差，这使紫外波段下的鬼像问题更为严重。根据菲涅耳公式，不同介质间的表面剩余反射率 R 与折射率 n 的关系为 $R=(n-1)^2/(n+1)^2$，在不镀光学薄膜的情形下，熔石英、FK5 与 QF1 的剩余反射率在 3.47%~5.04%之间。由于实际加工的光学表面非理想光滑，在相同粗糙度下对紫外波段的散射更为严重，实际剩余反射率会更大。综合实际紫外增透膜和粗糙度考虑，并保留一定的公差容限，确定每个光学表面的剩余反射率为 5%。

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing ... All rights reserved. http://www.cnki.net

光学设计软件 Code V 中的鬼像分析模块,通过鬼像在像面的弥散斑半径 DISC 的大小,可以快速地对透射系统进行初步的鬼像分析与判断。通过优化透镜曲率半径、厚度与空气间隔,尽量增大各个表面间形成的 DISC 值。利用 Code V 对优化后的光学系统进行鬼像分析,由于鬼像路径较多,仅将透镜和透镜之间、像面和透镜之间形成的较小的鬼像光斑路径结果在表 3 中列出。其中 DBFL 为鬼像系统后焦距,EFL 为鬼像系统有效焦距,DISC 为鬼像弥散斑半径大小,Pupil Ratio 为光瞳比,Magnification 为鬼像放大倍率,Detector 代表像面处探测器表面,L2b 代表透镜 Lens2 后表面,L7f 代表透镜 Lens7 前表面。

由于在紫外波段下探测器的剩余反射率为 40%,明显大于透镜组,在优化过程中应优先控制探测器与透镜表面形成的鬼像光斑尺寸。如表 3 所示,经过多轮迭代优化设计,探测器与透镜表面间形成的鬼像光斑尺寸均大于 4 mm,且透镜系统间由 L7f 与 L6f 形成的最小 DISC 值为 1.523 mm,大于第 2 节中计算求得的鬼像光斑均方根直径 0.75 mm 的目标值,满足设计指标需求。

表 3 基于 Code V 的鬼像分析

Tab.3 Ghost analysis by Code V

Ghost path	DBFL	DISC	Pupil ratio	Magnification
L2b–L1b	−16.555 089	−3.324 272	0.546 242	1.556 270
L7f–L6f	5.022 484	1.523 105	1.000 000	1.030 478
L7b–L6b	−7.125 295	−1.799 640	1.000 000	1.237 278
L5f–L4b	6.556 831	1.903 620	1.000 000	1.076 376
L2f–L1f	−25.924 852	−9.798 014	0.925 941	0.826 853
L4f–L3b	10.154 203	−2.626 740	1.000 000	1.208 033
L7b–L5b	−32.188 779	9.323 535	1.000 000	1.078 882
Detector–L6f	−10.821 299	4.158 700	1.000 000	4.158 700
Detector–L7f	−13.649 656	5.878 709	1.000 000	−0.725 587
Detector–L7b	−75.583 513	−31.199 903	1.000 000	0.757 049
Detector–L6b	−78.141 053	−42.515 392	1.000 000	0.574 359
Detector–L2b	83.779 674	33.922 561	2.273 642	0.771 792

然而 Code V 中的鬼像分析模块是基于近轴光线追迹理论,对轴外光线的追迹则存在一定误差。轴上光束形成的鬼像是以像面中心旋转对称,而倾斜光束经光学系统到达像面处会产生彗差和像散等轴外像差,轴外光束形成的鬼像不再旋转对称,鬼像光斑可能沿子午或弧矢方向延展成不规则的椭圆或彗星扫尾状,无法准确通过 DISC 估计轴外鬼像的实际影响。此外由于正负鬼像的影响,随着入射光线视场的增大,不同路径的鬼像可能向相反方向偏移,且多种路径下的多阶鬼像也会相互叠加。因此为满足实际工程应用,需采用非序列光线追迹的方法进一步对不同视场下的多阶鬼像进行仿真,计算求得鬼像的实际分布。

图 7(a)~(b)分别为紫外星敏感器在 0°~6°视场下所有光学表面形成的多阶鬼像在像面处的照度分布图,部分典型光斑的主要形成路径在图 7 中标出。通过比较表 3 和图 7(a)可知主要鬼像路径弥散斑的近轴计算与仿真基本一致。0°视场时各鬼像光斑为中心对称的弥散圆,照度大体由中心向边缘逐步降低。随着视场增加,一部分正鬼像随像点同向移动,另一部分负鬼像则沿像点反方向移动,视场越大正负鬼像的分离特性越为明显。

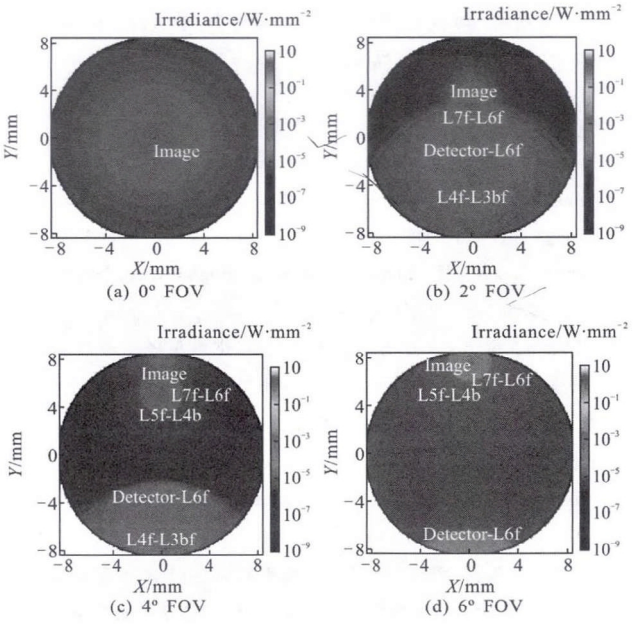

图 7 像面处光学系统多阶鬼像的幅照度分布图

Fig.7 Irradiance distribution of multi-orders ghost in focal plane

以 4°视场为例具体分析鬼像照度,为简化分析进行归一化处理,设 1 W 亮目标平行光入射,则成像像点的照度为 4.25 W/mm²,以 L7f–L6f 路径为主形成鬼像点斑区域的照度为 1.01×10^{-3} W/mm²,以 L5f–L4b路

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

径为主形成鬼像点斑区域的照度为 1.2×10^{-4} W/mm^2，以 Detector-L6f 为主形成鬼像点斑区域的照度为 5.2×10^{-5} W/mm^2，以 L4f-L3b 为主形成鬼像点斑区域的照度为 2.5×10^{-4} W/mm^2。由系统观测目标动态范围为 200 可知，暗目标的成像像点照度为 0.021 W/mm^2，与最亮的鬼像点斑照度 1.01×10^{-3} W/mm^2 之比为 21，满足系统 SNR 为 10 的指标要求，即亮目标的鬼像不会对暗目标造成干扰。

4 结 论

给出基于近轴鬼像能量的鬼像抑制指标计算的方法，并通过熔石英、FK5 与 QF1 常规玻璃组合代替 CaF_2 等昂贵的特殊玻璃，设计了紫外星敏感器光学系统，各视场成像弥散斑均方根半径小于 10 μm，MTF 在截止频率处均大于 0.7，相对畸变优于 0.05%，系统像质良好，结构紧凑，易于加工装调。在光学设计阶段通过近轴一阶鬼像的动态控制，有效地抑制了光学系统鬼像影响，通过非序列光线追迹对轴外高阶鬼像进行仿真分析，得知像面处最暗目标的照度与最亮目标的鬼像光斑照度之比为 21，远高于系统对信噪比的要求。为紫外星敏感器的设计与鬼像抑制提供一定新的参考与选择。

参考文献：

[1] Guo Yanchi, Xu Xiping, Qiao Yang, et al. Optical system design of star sensor with wide field of view and wide spectra range [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2014, 43 (12): 3969-3972. (in Chinese)
郭彦池, 徐熙平, 乔杨, 等. 大视场宽谱段星敏感器光学系统设计[J]. **红外与激光工程**, 2014, 43(12): 3969-3972.

[2] Wu Yanxiong, Zhang Xin, Zhang Jizhen, et al. Research on the autonomous star sensor based on indirectly sensing horizon and its optical design [J]. ***Acta Optica Sinica***, 2015, 35(2): 0222001. (in Chinese)
伍雁雄, 张新, 张继真, 等. 星光折射自主导航星敏感器及光学系统设计研究[J]. **光学学报**, 2015, 35(2): 0222001.

[3] Liu Jian, Hao Yuncai, Chang Jun, et al. Athermalization of star tracker system [J]. ***Transactions of Beijing Institute of Technology***, 2010, 30(2): 223-230. (in Chinese)
刘健, 郝云彩, 常军, 等. 无热化星敏感器光学系统设计[J]. **北京理工大学学报**, 2010, 30(2): 223-230.

[4] Zhang Aihong, Zuo Baojun, Fan Zhigang, et al. Design of optical system for ultraviolet star-sensor [J]. ***Journal of Harbin Institute of Technology***, 2002, 34 (3): 370-372. (in Chinese)
张爱红, 左保军, 范志刚, 等. 紫外星敏感器光学系统设计[J]. **哈尔滨工业大学学报**, 2002, 34(3): 370-372.

[5] Zhou Jun, Li Juan, Wang Qingfeng, et al. Optimized design of infrared opto-mechanical systems based on the spontaneous emission suppression [J]. ***Acta Optica Sinica***, 2015, 35(3): 0322003. (in Chinese)
周军, 李娟, 王庆丰, 等. 基于自发辐射抑制的红外光机系统优化设计[J]. **光学学报**, 2015, 35(3): 0322003.

[6] Hu Fusheng, Jin Guang, Zhang Nan. Algorithm of list structure of ghost images analyzing in complicated optical systems [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2007, 36(3): 322-325. (in Chinese)
胡福生, 金光, 张楠. 复杂光学系统鬼像分析的单向链表实现算法[J]. **红外与激光工程**, 2007, 36(3): 322-325.

[7] Lv Bo, Liu Weiqi, Zhang Daliang, et al. Optical system design of large entrance pupil catadioptric star sensor [J]. ***Chinese Journal of Lasers***, 2014, 41(7): 0716002. (in Chinese)
吕博, 刘伟奇, 张大亮, 等. 折反射式大入瞳星敏感器光学系统设计[J]. **中国激光**, 2014, 41(7): 0716002.

[8] Wang Hu, Miao Xinghua, Wen Deshen, et al. Optical system design of star sensor with wide-view field and small *F*-number [J]. ***Acta Photonica Sinica***, 2005, 34 (12): 1822-1824. (in Chinese)
王虎, 苗兴华, 汶德胜, 等. 宽视场大相对孔径星敏感器光学系统设计[J]. **光子学报**, 2005, 34(12): 1822-1824.

[9] Wang Hong. Optical system for ultraviolet warning camera with wide field of view and large relative aperture[J]. ***Optics and Precision Engineering***, 2014, 22 (12): 3212-3216. (in Chinese)
王红. 大相对孔径大视场紫外告警相机光学系统[J]. **光学精密工程**, 2014, 22(12): 3212-3216.

[10] Li Bo, Wang Shurong, Wang Junbo. Optical design of space-based ultraviolet tracking and detailed reconnaissance system [J]. ***Chinese Journal of Lasers***, 2013, 40(9): 0916003. (in Chinese)
李博, 王淑荣, 王俊博. 天基紫外跟踪详查光学系统设计[J]. **中国激光**, 2013, 40(9): 0916003.

[11] Rania H, Abd El-Maksoud, Jose Sasian. Modeling and analyzing ghost images for incoherent optical systems [J]. ***Appl Opt***, 2011, 50(15): 2305-2315.

[12] **肖特. 产品与应用下载中心** [EB/OL]. [2015-09-15]. http://www.schott.com/advanced_optics/chinese/download/index.html?so=china&lang=chinese.

[13] **成都光明. 光明光电光学玻璃产品数据库**[EB/OL]. [2015-09-15]. http://www.cdgmgd.com/208/.

[14] Zemax. Resource Center [EB/OL]. [2015-09-15]. http://www.zemax.com/support/resource-center.

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net