

点源透射比测试的高性能光陷阱技术研究

曹智睿^{1,2}, 付跃刚¹

(1. 长春理工大学 光电信息学院, 吉林 长春 130021;

2. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要: 在高精度的点源透射比测试中, 测试环境中背景杂散光的影响不可忽视。为了提高点源透射比的测试精度, 研制了一种可有效抑制背景杂散光的高性能光陷阱系统。依据点源透射比测试理论和光辐射能量传输理论, 给出了光陷阱主要设计参数与点源透射比测试误差的定量数学关系; 提出了背景杂散光各级散射路径全面可控的光陷阱设计思路, 大大增加了背景杂散光到达成像视场前的散射次数; 通过多种光陷阱模型的仿真比对实验, 验证设计思路和模型的优越性。实验结果显示: $\Phi 20$ m 的光陷阱系统可使口径 $\Phi 2$ m、外形尺寸约 $2.8\text{ m}\times 3.5\text{ m}\times 11\text{ m}$ 的光学系统的点源透射比测试误差达到 1.49×10^{-10} , 较相同实验室空间下未使用光陷阱的测试系统降低了约 4 个数量级, 较相同实验空间下国外现有光陷阱方案降低了两个数量级, 可用于大型太空望远镜的高精度点源透射比测试。

关键词: 光学测量; 点源透射比; 背景杂散光; 光陷阱

中图分类号: TN206; TH751 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201746.0117006

Research on high performance light trap technology for PST test

Cao Zhirui^{1,2}, Fu Yuegang¹

(1. College of Optical and Electrical Information, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130021, China;

2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: The influence of background stray light can not be ignored in the high precision PST test. In order to improve the precision of the PST test, a high performance light trap system which can effectively suppress the background stray light was developed. The quantitative mathematical relationship between the main design parameters and the test error of PST was given based on the theory of the PST test and the theory of optical radiation transfer. The design idea of the light trap was proposed, which was fully controllable in the scattering path and greatly increased the scattering times to the imaging field of view. Through the simulation comparison experiment of some light trap models, the superiority of the design ideas and the model was verified. The result show that, when a light trap with diameter of 20 m is used for the PST test to an optical system with diameter of 2 m and size of $2.8\text{ m}\times 3.5\text{ m}\times 11\text{ m}$, the testing error can be as small as 1.49×10^{-10} , it is reduced by about 4 orders of magnitude compared with the test system without light trap under the same experimental space, and reduced by about 2 orders of magnitude compared with the existing light trap schemes under the same experimental space. The light

收稿日期: 2016-05-05; 修订日期: 2016-06-03

基金项目: 国家自然科学基金(61307114)

作者简介: 曹智睿(1983-), 男, 助理研究员, 博士生, 主要从事光学测试技术方面的研究。Email: caozhirui_0503@163.com

通讯作者: 付跃刚(1972-), 男, 教授, 博士, 主要从事光电技术方面的研究。Email: Fuyg@cust.edu.cn

trap can be used to the high precision PST for the large space telescope.

Key words: optical measurement; PST; stray light of the background; light trap

0 引言

杂散光性能直接影响太空望远镜的深空探测能力,是此类空间光学系统的重要技术指标和验证项目。目前我国正在研制自己的“哈勃”望远镜,其深空探测能力要求达到 26 等星,杂散光点源透射比设计值高达 10^{-10} 量级,高精度的杂散光测试技术是该项目研制的关键技术之一。

近年来,国际上以美国为代表的研究机构多以点源透射比(Point Source Transmittance, PST)的概念评价太空望远镜的杂散光抑制能力,典型的 PST 测试系统包括:2000 年 Wuhrec C 等^[1]介绍了 XMM Telescope 的 PST 测试系统,该测试系统整体置于空气洁净度为 class 5 的实验室内,在被测相机的物方视场位置设置了光陷阱结构,通过抑制相机后向散射光的一次散射路径降低了背景杂散光返回相机成像视场的几率,系统测试精度达到了 10^{-10} 量级;2008 年美国 Ball Aerospace & Technologies Corp 研制了一种新型杂散光测量设备^[2],该设备采用了一种“双圆柱形”光陷阱结构,当被测相机置于双圆柱轴心之间的区域时,相机的后向散射光经光陷阱结构一次散射后偏离了双圆柱轴心之间的区域,从而降低了背景杂散光返回相机成像视场的几率,2010 年该设备对 Operation Land Imager(OLI)望远镜的杂光测试精度达到了 10^{-9} 量级。

自 20 世纪 90 年代起,PST 评价方法逐步被国内的科研院所所采纳,据公开资料报道,国内典型的 PST 测试装置及其测试能力如下:1996 年和 1998 年中国科学院光电技术研究所廖胜等人先后介绍了红外光学系统和可见光学系统的 PST 的测试装置^[3-4],该测试装置采用了数字锁相放大技术,最终测试结果达到了 10^{-5} 量级;2011 年哈尔滨工业大学空间光学工程研究中心的王治乐等人搭建了一套无中心遮挡的离轴抛物面反射式杂光测量装置^[5],实际测得的最佳 PST 数值约为 10^{-6} 量级;2011 年中国科学院长春光学精密机械与物理研究所的杨林介绍了极紫外太阳望远镜杂散光 PST 测试装置^[6],实测得到的 PST 数据约为 10^{-6} 量级;2014 年中国科学院西安光学精密机械研究所的徐亮等人介绍了月基望远镜杂散光 PST 的

测试装置^[7],在 ISO class 8 的常压洁净间内,满足了指标 PST 测试值 10^{-7} 的要求,文章还指出了该测试系统的后续改进措施,包括提高测试环境的空气洁净度等级和采用斩波与数字锁相放大技术在环境光亮背景辐照中提取微弱目标信号。

综合国内外文献可以发现:国外先进的点源透射比测试系统均使用了光陷阱系统,以此降低背景杂散光对测试精度的影响,而国内关于高性能光陷阱技术的研究和应用甚少,致使点源透射比测试能力与国际先进水平相比存在约 3 个数量级的差距。与 XMM 和 OLI 等国外同类产品相比,中国版“哈勃”望远镜的测试精度需求更高,口径($\Phi 2$ m)和外形尺寸($2.8\text{ m}\times 3.5\text{ m}\times 11\text{ m}$)更大,直接沿用国外现有方案将面临实验空间过大、空气洁净度难以实现等一系列条件保障难题,为此文中提出了一种不同的光陷阱设计思路和结构模型,在确保测试精度的前提下可以最大限度地降低实验空间需求和空气洁净度保障等方面的困难,使其能够适用于大型空间光学系统的高精度 PST 测试。

1 点源透射比

在某测试波段下,光学系统轴外视场角 θ 处点源目标的辐射,经光学系统后在像面产生的辐射照度 $E_d(\theta)$ 与其在光学系统入瞳处辐照度 E_i 的比值称为点源透射比,其数学表达式如公式(1)所示:

$$PST(\theta) = \frac{E_d(\theta)}{E_i} \quad (1)$$

PST 测试系统主要由目标发生器、平行光管、被测相机镜头、旋转平台、辐照度探测器、远程控制与数据采集系统等组成,如图 1 所示。

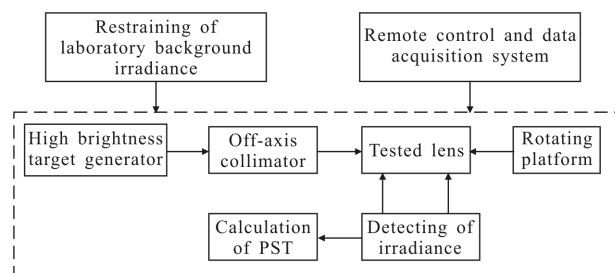


图 1 PST 测试系统组成示意

Fig.1 Main constituent of PST test system

由 PST 测试原理和测试系统组成可知, PST 测试的主要误差来源如图 2 所示。其中, 探测器测量误差主要是由于探测器的非线性和电子学噪声等因素导致。背景辐照误差主要由内壁散射、尘埃散射和空气分子散射等因素导致。

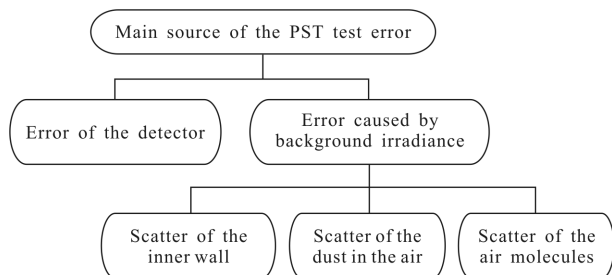


图 2 PST 测试的主要误差来源
Fig.2 Main error source of PST test

2 光辐射能量传输

在 PST 的测试过程中, 测试光束以轴外某视场角入射至光学系统的遮光系统并产生后向散射, 后向散射光束在空气分子、尘埃颗粒和测试环境各结构表面之间往返传输, 在此过程中部分辐射能量可能直接进入被测系统的成像视场, 从而对 PST 测试精度产生影响。作者在之前的研究工作中已经定量分析了空气、尘埃对 PST 测试精度的影响^[8-11], 文中重点关注测试环境各结构表面之间的光辐射传输。

PST 测试环境中, 光辐射能量从一个面传输到另一个面的基本关系如公式(2)所示:

$$d\phi_c = L_s(\theta_0, \psi_0) \cdot dA_s \cdot \frac{\cos(\theta_s) \cdot dA_c \cdot \cos(\theta_c)}{R_{sc}^2} \quad (2)$$

式中: $d\phi_c$ 为传递到单位接受面的辐射能量; $L_s(\theta_0, \psi_0)$ 为单位源面的双向光亮度; dA_s 和 dA_c 分别为源面和接受面的面积; θ_s 和 θ_c 分别为源面和接受面法线与两者中心连线的夹角; R_{sc} 为源面和接受面的中心距离。

对公式(2)进行数学变换, 可写成三个因子乘积的形式, 如公式(3)和公式(4)所示:

$$d\phi_c = \frac{L_s(\theta_0, \psi_0)}{E(\theta_i, \psi_i)} \cdot E(\theta_i, \psi_i) \cdot dA_s \cdot \frac{\cos(\theta_s) \cdot dA_c \cdot \cos(\theta_c)}{R_{sc}^2} \quad (3)$$

$$d\phi_c = BRDF(\theta_i, \psi_i, \theta_0, \psi_0) \cdot d\phi_s(\theta_i, \psi_i) \cdot d\Omega_{sc} \quad (4)$$

式中: $BRDF$ 为源面材料的双向反射分布函数; $E(\theta_i, \psi_i)$ 为源面的出射辐照度; $d\phi_s(\theta_i, \psi_i)$ 为源面的出射辐

射通量; $d\Omega_{sc}$ 为源面对接受面的投影立体角, 也称几何构成因子 GCF。

在忽略空气尘埃散射效应的前提下, 由 PST 测试理论和辐射能量传输理论推导出测试环境的光辐射能量传输对 PST 测试精度的影响, 如公式(5)和公式(6)所示:

$$d\phi_c = d\phi_0(\theta_i, \psi_i) \cdot \sum_{n=1}^k BRDF_n(\theta_i, \psi_i, \theta_0, \psi_0) \cdot d\Omega_{scn} \quad (5)$$

$$\Delta PST = \frac{\Delta E_d(\theta)}{E_i} = \frac{d\phi_c/dA_c}{d\phi_0(\theta_i, \psi_i)/d\phi_0} = \frac{d\phi_0}{dA_c} \cdot \sum_{n=1}^k BRDF_n(\theta_i, \psi_i, \theta_0, \psi_0) \cdot d\Omega_{scn} \quad (6)$$

式中: $d\phi_0(\theta_i, \psi_i)$ 为 PST 测试光束的出射能量; $d\phi_0$ 为被测光学系统的入瞳面积; 变量 n 代表 PST 测试光束到达被测光学系统成像表面所经过的散射次数; ΔPST 的含义为实验室内壁散射导致的 PST 测试误差。

综上所述, 光陷阱表面的散射特性、各散射面间的几何构成因子和散射次数是决定背景杂散光对 PST 测试精度影响的主要因素。

3 高性能光陷阱系统

3.1 材料表面散射特性(BRDF)

传统的杂散光测试实验室通常采用内壁喷涂黑漆或悬挂黑布的方法, 减小背景杂散光对测试精度的影响, 经过上述消光处理的内壁表面近似服从朗博散射特性, 光谱吸收效率可介于 95%~97% 之间。该处理方法的优点是易于实现、成本较低, 能够满足绝大多数摄影物镜的杂散光测试需求; 缺点是光线散射路径不可控, 背景杂散光经一次散射即可返回成像视场, 难以满足高精度的杂散光测试需求。

文中选用表面光滑的黑色亚克力板作为光陷阱表面材料, 其表面散射特性如图 3 所示。该材料的光谱吸收率较高, 主要散射路径集中在较小的空间立体角范围内, 通过合理设计光陷阱的结构布局, 可有效控制背景杂散光的各级散射路径, 使其传输方向偏离 PST 测试的关键路径, 降低对 PST 测试结果的影响。(PST 测试过程中的关键路径是指, 被测光学系统的后向散射光经测试环境结构表面的 n 次散射后直接进入被测光学系统成像视场的传输路径, n 的取值视测试精度要求而定。)

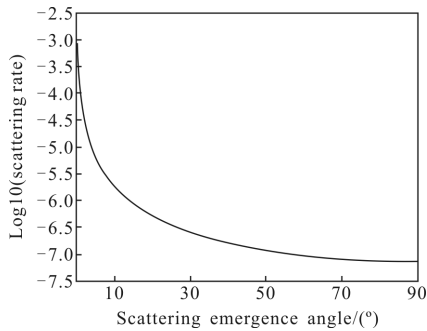


图 3 物化处理材料表面的 BRDF 曲线

Fig.3 BRDF curve of the wall surface after physicochemical treatment

3.2 结构布局

由公式(6)可知,减小几何构成因子 $d\Omega_{sc}$ 或者增大散射次数 n 都可以减小 PST 测试误差, 光陷阱的结构布局规划主要围绕这两个目的进行。

$$d\Omega_{sc} = \frac{\cos(\theta_s) \cdot dA_c \cdot \cos(\theta_c)}{R_{sc}^2} \quad (7)$$

由公式(7)可知,减小 $d\Omega_{sc}$ 需要增大 θ_s 、 θ_c 、 R_{sc} , 这都需要通过增大测试空间来实现, 而增大测试空间则意味着测试成本和空气洁净度保障难度的增大, 对大型空间光学系统而言,上述条保需求难以实现, 因此文中将主要以增加散射次数来实现减小 PST 测试误差的目的。

国外现有技术已经很好地解决了背景杂散光一次散射的问题, 背景杂散光进入被测相机成像视场前的散射次数 n 至少为 3 次。例如,在 XMM 的光陷阱作用下, 被测相机的后向散射光束经过三次散射即可进入成像视场,如图 4 所示;在 BALL 公司的光陷阱作用下, 被测相机的后向散射光束经过 5 次散射即可进入被测相机的成像视场,如图 5 所示。

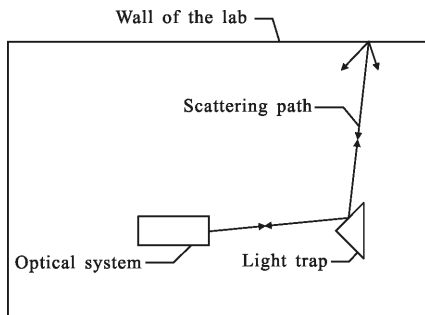


图 4 XMM 光陷阱中散射路径示意图

Fig.4 Schematic of the scattering path in XMM light trap

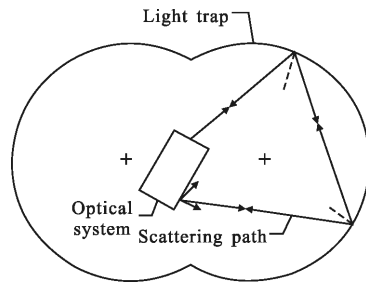


图 5 BALL 公司光陷阱中散射路径示意图

Fig.5 Schematic of the scattering path in BALL's light trap

文中研制的光陷阱系统可使背景杂散光进入被测相机成像视场前的散射次数 n 增大至 10 次以上, 该光陷阱的结构模型如图 6 所示, 工作原理如图 7 所示。

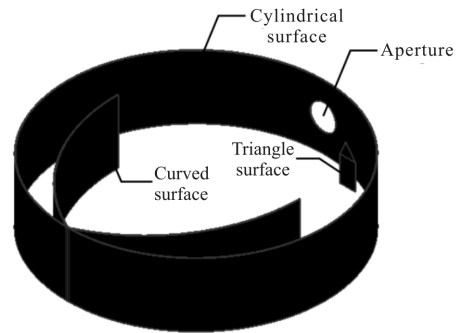


图 6 文中光陷阱的结构模型

Fig.6 Structure of the light trap in this paper

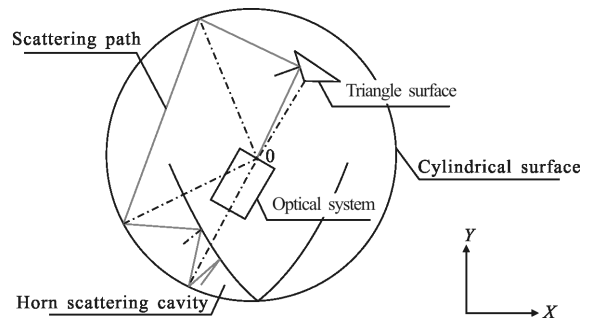


图 7 文中研制光陷阱的工作原理

Fig.7 Working principle of the light trap in this paper

该光陷阱模型中三角形散射面的角度、“牛角形”散射腔的曲面方程等参数需要迭待优化, 确保背景杂散光能够经过两次散射进入“牛角形”散射腔, 并在散射腔内完成预定的散射次数。

与国外现有光陷阱系统相比, 该光陷阱系统具备三个显著的技术特点:(1) 将被测相机复杂的散射

表面从散射光路中隔离出来,所有参与散射的表面均近似服从镜面散射特性,使得背景杂散光的散射光路全面可控,这是国外现有光陷阱无法实现的。例如,XMM 方案中,测试实验室的内壁表面和被测相机表面的散射特性复杂,使得散射路径不可控;BALL 公司的方案中,被测相机的表面散射特性复杂,使得散射路径不可控,对外形尺寸较大的被测相机而言这一影响尤为突出。(2)“牛角形”散射腔可使进入其中的散射光线向牛角尖端传输,难以逸出,通过增加散射次数,显著降低了背景杂散光对 PST 测试精度的影响。(3)结构紧凑,测试空间需求小,空气洁净度易于保障。

4 仿真实验

4.1 实验方法

为了验证测试环境光辐射能量抑制方法的正确性,可以选择实测实验或仿真实验等方式。实测实验需要杂散光性能极好的真实光学系统、整套测试设备和实验室环境保障条件,测试成本极高;实测实验的结果中难以区分光学系统的杂散光设计残差、空气散射误差和光陷阱内壁散射误差,并不利于方法自身的验证,因此文中选用仿真实验的验证方式,仿真实验流程如图 8 所示。

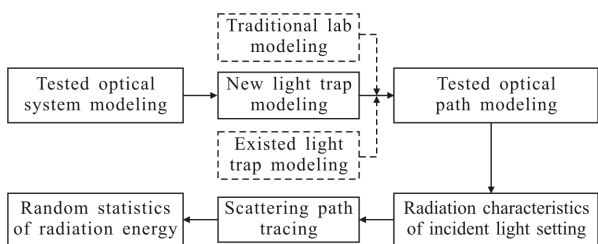


图 8 仿真实验流程

Fig.8 Flow of simulation test

依据仿真实验的具体需求,文中选用 TracePro 作为仿真实验的实现工具。Tracepro 软件是杂散光仿真分析领域常用的商业软件,能够应用蒙特卡洛方法对大量随机散射光线进行追迹;具备与 UG 软件的数据接口,可以将结构模型直接导入;能够对结构件表面的散射特性等参数进行详细设定;能够对入射光辐射特性和特定表面的辐射能量进行精确设定和测量;该软件无法设置测试环境的空气洁净度

等级。应用 TracePro 实现仿真实验的具体方法如下:

(1) 被测光学系统建模:为了将被测光学系统的杂散光设计残差从仿真试验结果中分离,对某 Φ 口径 2 m、外形尺寸 2.8 m×3.5 m×11 m 的被测光学系统进行理想化改造,改造后光学系统即能真实模拟遮光罩等结构件的后向散射特性,又拥有近乎完美的杂散光抑制能力。应用该模型模拟 PST 测试过程时,如果将光陷阱内壁设置为全吸收,则光学系统像面处辐照度为零;在光陷阱内壁散射特性真实的情况下,测得的 PST 数值即为测试环境光辐射导致的测试误差。

(2) 文中光陷阱系统建模:光陷阱的圆柱形散射面直径为 $\Phi 20$ m,三角形散射面为等腰三角形,顶角 120° ,等腰边长 1.2 m,圆弧形散射面半径 12 m,弧长 14.15 m,圆弧中心在圆柱中心基础上向 X 正向平移 4.5 m,向 Y 正方向平移 1 m,表面散射特性如图 3 所示,整体结构布局如图 6 所示。

(3) 国内传统测试环境建模:传统实验室环境为 20 m×20 m 的矩形实验室,内壁表面服从朗博散射模型。

(4) XMM 光陷阱建模:在国内传统测试环境模型基础上,加入等腰三角形散射面,顶角 120° ,等腰边长 1.2 m,表面散射特性如图 3 所示,光陷阱整体机构布局参照图 4 所示。

(5) BALL 公司光陷阱建模:双圆柱结构外形尺寸为 25 m×20 m,表面散射特性如图 3 所示,光陷阱整体机构布局参照图 5 所示。

(6) 测试光路建模:设置了轴外 30° 视场角的实际测试光路。

(7) 入射光辐射特性设定:设置入射光线的辐照度为 $1\ 000\ \text{W}/\text{m}^2$,入射光线光线数为 3 000 万条。

(8) 软件自动运行随机统计运算。

4.2 仿真实验结果

当被测光学系统置于国内传统实验室环境时,光学系统像面处的杂散光辐照度如图 9(a)所示,像面处的辐照度为 $8.1 \times 10^{-4}\ \text{W}/\text{m}^2$,即该测试环境下的 PST 测试误差为 0.81×10^{-6} 。

当被测光学系统置于 XMM 光陷阱模型时,光学系统像面处的杂散光辐照度如图 9(b)所示,像面处的辐照度为 $1.3 \times 10^{-5}\ \text{W}/\text{m}^2$,即该测试环境下的 PST 测试误差为 1.3×10^{-8} 。

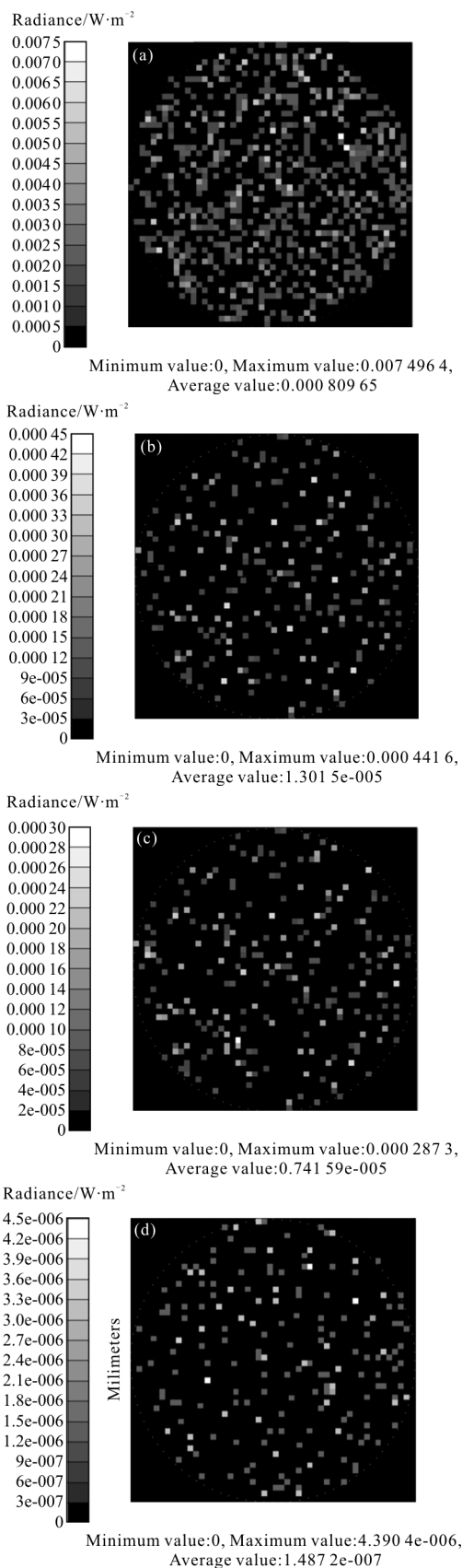


图 9 各光陷阱模型的仿真结果

Fig.9 Simulation results of each light trap model

当被测光学系统置于 BALL 公司的光陷阱模型时,光学系统像面处的杂散光辐照度如图 9(c)所示,像面处的辐照度为 $0.74 \times 10^{-5} \text{ W/m}^2$,即该测试环境下的 PST 测试误差为 0.74×10^{-8} 。

当被测光学系统置于文中研制的光陷阱模型时,光学系统像面处的杂散光辐照度如图 9(d)所示,像面处的辐照度为 $1.49 \times 10^{-7} \text{ W/m}^2$,即该测试环境下的 PST 测试误差为 1.49×10^{-10} 。

5 结论

杂散光性能是太空望远镜的重要技术指标,在地面研制阶段需要对其 PST 参数进行精密的检测试验。为了减小测试环境的背景杂散光干扰,提高 PST 测试精度,研制了新型高性能光陷阱系统,并利用 TracePro 软件模拟了 $20 \text{ m} \times 20 \text{ m}$ 的实验空间内 (BALL 公司方案 $25 \text{ m} \times 20 \text{ m}$),口径 $\Phi 2 \text{ m}$ 、外形尺寸约 $2.8 \text{ m} \times 3.5 \text{ m} \times 11 \text{ m}$ 光学系统的 PST 测试,不同的光陷阱模型的仿真试验结果显示:文中研制的光陷阱系统可使 PST 测试误差达到 1.49×10^{-10} ,较未使用光陷阱的方案降低了约 4 个数量级,较国外现有方案降低了约两个数量级,能够满足 PST 设计值为 10^{-10} 的大型光学系统的杂散光测试需求。

文中所提出的光陷阱设计思路和光陷阱模型不仅适用于点源透射比测试,还适用于其他对背景光辐射高度敏感的研究工作,例如微光探测相机的测试、试验工作等。在后续研究中,作者将尝试在现有方法的基础上,增设空气散射误差标定方案,在确保测试精度的同时,降低对测试环境的洁净度保障要求。

参考文献:

[1] Wuhler C, Birkl R, Dezoeten P, et al. PST measurements and wide angle straylight analyses of the XMM (X-Ray Multi Mirror)telescope [C]//Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 2000, 4012: 113-122.

[2] Gary L Peterson. Stray light test station for measuring point source transmission and thermal background of visible andinfrared sensors[C]//Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 2008, 7069: 70690M.

[3] Liao Sheng, Shen Mangzuo. PST research and measurement of infrared optical system stray light [J]. *J Infrared Millim Waves*, 1996, 15(5): 375-378. (in Chinese)

- 廖胜, 沈忙作. 红外光学系统杂散光 PST 的研究与测试 [J]. 红外与毫米波学报, 1996, 15(5): 375-378.
- [4] Liao Sheng, Shen Mangzuo. PST research and measurement of R-C optical system stray light [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 1998, 25(S): 17-20. (in Chinese)
廖胜, 沈忙作. R-C 光学系统可见光杂光 PST 的研究与测试 [J]. 光电工程, 1998, 25(S): 17-20.
- [5] Wang Zhile, Gong Zhongqiang, Zhang Wei, et al. Measurement of stray light based on point-source transmittance in space optical system [J]. *Optical Technique*, 2011, 37(4): 401-405. (in Chinese)
王治乐, 龚仲强, 张伟, 等. 基于点源透过率的空间光学系统杂光测量 [J]. 光学技术, 2011, 37(4): 401-405.
- [6] Yang Lin, Li Da, Cui Tiangang, et al. Measurement and elimination of stray light from space solar telescopes for imaging test at UV band [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(7): 1456-1463. (in Chinese)
杨林, 李达, 崔天刚, 等. 空间太阳望远镜在紫外波段成像检测中的杂散光测量和消除 [J]. 光学精密工程, 2011, 19(7): 1456-1463.
- [7] Xu Liang, Zhao Jianke, Xue Xun, et al. PST research and measurement of lunar-based optical telescope stray light [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 41(4): 1289-1295. (in Chinese)
徐亮, 赵建科, 薛勋, 等. 月基望远镜杂散光 PST 研究与测试 [J]. 红外与激光工程, 2014, 41(4): 1289-1295.
- [8] Du Weiwei. Design and implementation of air borne particle counter based on light scattering theory [D]. Soochow: Soochow University, 2011: 8-15. (in Chinese)
杜伟巍. 基于光散射的尘埃粒子计数器设计与实现 [D]. 苏州: 苏州大学, 2011: 8-15.
- [9] Ren Zhibin, Lu Zhenwu, Liu Yuling, et al. Study of Mie normalized scattered intensity distributions [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2003, 14(1): 83-85. (in Chinese)
任智斌, 卢振武, 刘玉玲, 等. Mie 理论归一化散射光强的研究 [J]. 光电子·激光, 2003, 14(1): 83-85.
- [10] Huang Huijie, Zhao Yongkai, Ren Bingqiang, et al. Aerosol particle measurement by laser diode light scattering [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2002, 29(12): 1117-1121. (in Chinese)
黄惠杰, 赵永凯, 任冰强, 等. 尘埃粒子的半导体激光散射测量 [J]. 中国激光, 2002, 29(12): 1117-1121.
- [11] Cao Zhirui, Fu Yaogang. Analysis of the impact for the air cleanliness to the precision of PST test [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, 14(1): 83-85.