

激光引力波望远镜镜面杂散光测试方法

徐节速^{1,2,3}, 胡中文^{1,2}, 徐腾^{1,2}, 厉宏兰^{1,2,3}, 李倩^{1,2,3}, 姚梦远^{1,2,3}

- (1. 中国科学院国家天文台南京天文光学技术研究所, 江苏 南京 210042;
2. 中国科学院天文光学技术重点实验室(南京天文光学技术研究所), 江苏 南京 210042;
3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 激光引力波望远镜的杂散光来源主要是细光束入射到镜面产生的反射杂散光。1 W 的激光入射产生的杂散光需抑制到 10^{-10} W 以下, 否则将严重影响主要参数光程差的测量精度。针对该应用背景, 考虑了在细光束入射到镜面条件下由杂散光测试数据重构表征镜面反射特性的双向反射分布函数(BRDF)参数的可行性。传统方法测量 BRDF 需要 4 个转角, 系统复杂不便于实时应用。为此基于光学元件各向同性和镜面杂散光模型的对称性, 综合考虑了平面镜、曲面镜以及光束衍射效应、测量误差等因素, 提出了一种仅利用子午面内一维测量若干个点的散射数据即可重构得到 BRDF 参数的方法, 并用数值方法对其可行性和测量精度进行了验证。

关键词: 光学工程; 双向反射分布函数; 杂散光; 引力波望远镜

中图分类号: O436.2 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0913001

Test method of stray light on mirror surface of laser gravitational wave telescope

Xu Jiesu^{1,2,3}, Hu Zhongwen^{1,2}, Xu Teng^{1,2}, Li Honglan^{1,2,3}, Li Qian^{1,2,3}, Yao Mengyuan^{1,2,3}

- (1. National Astronomical Observatories/Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210042, China; 2. Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, Key Laboratory of Astronomical Optics & Technology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210042, China;
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The source of stray light of the laser gravitational wave telescope is mainly the reflected stray light generated by the thin beam incident on the mirror surface. When the laser light intensity of 1 W was incident, the stray light intensity needs to be suppressed to less than 10^{-10} W, otherwise the measurement accuracy of the main parameter optical path difference will be seriously affected. Aiming at the background of this application, the feasibility of Bidirectional Reflection Distribution Function (BRDF) parameters for mirror surface reflection characteristics reconstructed by stray light test data was considered when the thin beam incident on the mirror surface. In the traditional measurement of BRDF, four corners were required. The system was complex and inconvenient for real-time application. Based on the isotropic

收稿日期: 2019-04-01; 修订日期: 2019-05-14

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(B): 多波段引力波宇宙研究--空间太极计划预研(XDB23030000);

国家自然科学基金(11603056)

作者简介: 徐节速(1996-), 女, 硕士生, 主要从事杂散光分析与测试等方面的研究。Email: jsxu@niaot.ac.cn

导师简介: 胡中文(1968-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事天文光学仪器的技术方法等方面的研究。Email: zwhu@niaot.ac.cn

optical elements and the symmetry of mirror stray light model, considering the plane mirror, curved mirror and beam diffraction effect, measurement error and other factors, a method reconstructing the BRDF parameters by one-dimensional measurement the scattering of several points with the plane mirror rotation in the meridian plane was proposed, and the feasibility and measurement accuracy were verified by numerical methods.

Key words: optical engineering; bidirectional reflection distribution function; stray light; gravitational wave telescope

0 引言

杂散光建模和分析对光学仪器、系统工程在实际使用条件下的整体性能评估起着关键的作用。而要想提高性能评估的准确性,需要对各元件表面的反射分布特性开展研究。传统上用于测量表征表面反射特性的双向反射分布函数 (BRDF) 的装置通常需要四个机械自由度,测量过程复杂而且耗时^[1]。一些学者通过搭建精密的转角机构,构造巧妙的测角布置等尝试简化测量装置的复杂度,取得了一些成效。这些改进大多是从 BRDF 的定义出发进行实验测量,通过提高采样密度在一定程度上缩短测量时间^[2-5]。也有不少的研究人员对光学表面散射进行理论研究,提出了可以适用于各种表面的散射模型^[6]。

激光引力波望远镜是通过精确观测成对的自由落体质量块之间适当距离的微小变化来测量引力辐射。在激光的传输过程中,为了使主要参数光程差的测量精度满足望远镜的设计指标要求,需要将细光束入射下望远镜内的总体杂散光对入射光的比值抑制到 10^{-10} 量级以下^[7]。笔者优化设计的望远镜光学结构如图 1 所示,系统采用离轴四镜方案设计,其中主镜 M1 是离轴抛物面镜,次镜 M2 为非球面镜,三四镜 M3 和 M4 分别为平面镜和球面镜。望远镜各镜面的粗糙度要求范围在 0.1~1.5 nm 之间。假定各镜面是足够“干净”的,并有效排除了场外杂散光,此时系统内的杂散光主要是在细光束入射下,由粗糙的光学表面引起的。而粗糙的光学元件表面引起的杂散光可以由 Harvey 模型比较精确的描述^[8]。因此针对该应用背景,开展由细光束入射各镜面的杂散光测试数据重构得到表征镜面反射特性 BRDF 参数的可行性研究具有实际的意义。

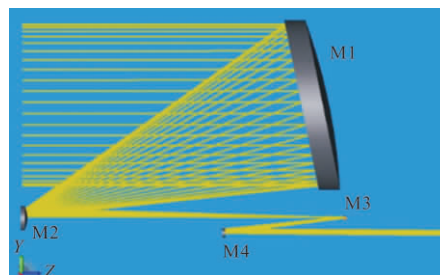


图 1 离轴四镜系统的引力波望远镜光学设计

Fig.1 Optical design of gravitational wave telescope for off-axis four-mirror system

文中提出的测试方法思路是在子午面内测量得到细光束入射到若干个不同旋转角度的平面镜后在探测面接收到的杂散光数据,然后利用光学元件的各向同性和 Harvey 模型的“平移不变性”,可以由该范围内的杂散光测试数据重构出 BRDF 参数,进而获得整个系统的杂散光数据。另外通过曲面杂散光校正,该方法还可适用于不同曲率的镜面杂光测试。采用该方法,不需要传统测量所需的四个机械自由度,只需在子午面内进行一维测量,从而大大减少了实验测量的复杂性,增加了实时应用的便利性。

1 镜面杂散光测试方法的理论依据

BRDF^[9]可用来描述镜面的反射特性,它定义为沿 (θ_r, φ_r) 方向出射的辐射亮度 $dL_r(\theta_r, \varphi_r; \theta_i, \varphi_i)$ 与沿 (θ_i, φ_i) 入射到被测表面的辐射照度 $dE_i(\theta_i, \varphi_i)$ 之比:

$$BRDF(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r) = dL_r(\theta_r, \varphi_r; \theta_i, \varphi_i) / dE_i(\theta_i, \varphi_i) \quad (1)$$
 式中: θ_i 和 φ_i 分别为入射光线的仰角和方位角; θ_r 和 φ_r 分别为反射光线的仰角和方位角; dE_i 和 dL_r 分别为入射和反射方向的小立体角元内的辐射照度和辐射亮度。对于各向异性表面, BRDF 是一个四维的函数,而对于各向同性表面, BRDF 关于表面法向量是

旋转对称的，它的结果只取决于入射角和出射角以及所对应的方位角之间的差值。引力波望远镜的各镜面属于各向同性的光学元件表面，因此单独对一个镜面进行杂散测试时，可以用在子午面测量的数据来代表整个半球面的数据。

当直接从公式(1)出发描述半球上的散射光，则其分布一般会随着入射角的变化而急剧改变，在大入射角时变得相当偏斜和不对称。J.E.Harvey 教授指出^[8]，对于各项同性的光学表面，如果将半球上收集的数据作为观测点的方向余弦的函数绘制，则新的散射函数不会改变形状，而仅仅随着入射角的变化在方向余弦空间上移动，具有“平移不变性”。此时 BRDF 只和散射角与入射角的夹角有关，与入射光方向无关，其模型表达式为：

$$BRDF=b_0[1+(|\sin\theta_s-\sin\theta_i|/l)^2]^{S/2} \quad (2)$$

式中： S 为 BSDF 曲线的倾斜因子； l 为翻转角； b_0 为待定常数。只考虑反射时，双向散射分布函数 BSDF 就是双向反射分布函数 BRDF。当已知表面粗糙度并设定 l, S 值时， b_0 就可以由公式(3)、(4)的全积分散射公式联立得到：

$$TIS=\begin{cases} \frac{2\pi b_0}{l^2(S+2)}\left[(1+l^2)^{\frac{S+2}{2}}-(l^2)^{\frac{S+2}{2}}\right] & \text{when } S \neq -2 \\ \pi b_0 l^2 \ln\left(1+\frac{1}{l^2}\right) & \text{when } S=-2 \end{cases} \quad (3)$$

$$TIS=\left(\frac{2\pi\Delta n\sigma}{\lambda}\right)^2 \quad (4)$$

式中： Δn 为折射率在散射表面边界上的变化量； λ 为光波波长； σ 为表面粗糙度^[10]。

此时得到的 BRDF 三参数值可用于后续的微元法计算和软件仿真时的表面散射属性设定中。接下来只需在子午面内一维测量镜面旋转的若干个点，利用 Harvey 模型的对称性和光学元件的各向同性，将镜面旋转时的杂散光分布等效为镜面未旋转时的杂散光分布，即可重构得到 BRDF 参数。

2 平面镜杂散光测试方法

本节开展了由镜面杂散光数据重构 BRDF 参数的方法研究。考虑镜面杂散光在子午面内分布的测量，其分布特性可以通过旋转杂散光探测器或者旋转镜面实现，两种测量方法彼此等价。本节通过建立散射模型并进行数值仿真，得到平面镜不同的旋转

角度时对应的杂散光数据，之后可由该数据进行 BRDF 参数重构。

2.1 镜面散射测试模型

笔者研究的杂散光测试方法是基于图 2 所示的实验模型示意图。图中半径为 r_0 的准直细光束(探测面和镜面的距离 L 远远大于入射光束半径 r_0) 入射到倾斜 α 放置的镜面的 A 点上，探测器垂直此时的反射光放置，即倾斜 2α ，保证此时的反射光线交于探测器的正中心 O 点。当镜子旋转 θ 时，则反射光线相对于之前的旋转了 2θ ，交探测器于 B 点。 θ_s 表示的是镜子旋转后的散射光线与旋转前的反射光线之间的夹角。

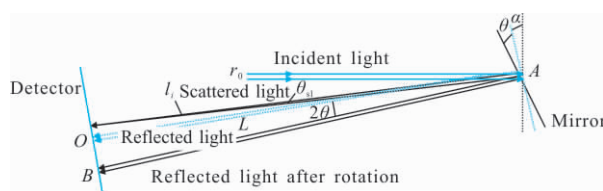


图 2 镜面杂散光测量实验模型示意图

Fig.2 Schematic diagram of measurement experiment model for mirror stray light

2.2 基于微元法计算及与商业软件数值计算的对比

为得到平面镜旋转时探测面 O 点处的杂光值，基于微元法分析该实验模型，即取探测器的一个像元进行研究，做如下近似 $\theta_s \approx 0, l_i = L$ 。假设细光束 P_i 均匀的分布在平面镜的每一个面元 dA_i 上，即每个面元的光强为 E_i 。由 BSDF 的定义得面元 dA_i 散射的光亮度为 $L_i = BSDF \cdot E_i$ ，所以面元 dA_i 到探测器像元 dS 的功率为：

$$d\phi_s(r) = L_i \cdot dA_i \cdot \cos\theta_{si} \cdot d\Omega_s = E_i \cdot BSDF \cdot dA_i \cdot \cos\theta_{si} \cdot d\Omega_s \approx E_i \cdot BSDF \cdot dA_i \cdot dS/L^2 \quad (5)$$

式中： $d\Omega_s$ 为平面镜面元 dA_i 向探测面像元 dS 散射的立体角。则，可以得到被入射光照射到的平面镜在像元 dS 散射的功率为：

$$\phi_s(\theta_s) = BSDF \cdot dS/L^2 \cdot \int E_i \cdot dA_i = BSDF \cdot dS \cdot P_i/L^2 \quad (6)$$

由 Harvey 模型的“平移不变性”可知，散射光强的分布只和散射角与入射角的夹角有关，与入射角的大小无关。因此可以将平面镜旋转 θ 时对应的探测器像元处的散射光等效为入射角 $\theta_i = 0^\circ$ ，散射角 $\theta_s = 2\theta \pm \theta_s$ 时对应的散射光值，即 $\sin\theta_s - \sin\theta_i \approx \sin 2\theta$ ，

代入到公式(2)可得:

$$BSDF=b_0 \cdot [1+(\sin(\theta_s)/l)^2]^{S/2} \approx b_0 \cdot [1+(\sin(2\theta)/l)^2]^{S/2} \quad (7)$$

因此平面镜旋转 θ° 对应的探测器像元上的辐照度表达式为:

$$E_s(\theta_s)=\varphi_s(\theta_s)/dS=P_i/L^2 \cdot BSDF \approx P_i \cdot b_0 \cdot [1+(\sin(2\theta)/l)^2]^{S/2}/L^2 \quad (8)$$

由此可见公式(8)是依据理论模型采用微积分方法直接计算得到,为了验证公式(8),笔者在商业软件中仿真该模型,通过光线追迹的方法进行数值计算,计算的结果会随着追迹数目的增加而逐渐收敛,最后接近理论值,因此软件仿真时需设置合理的光线追迹数目。在软件中仿真图 2 所示的实验模型,初始状态平面镜倾斜 $\alpha=10^\circ$ 放置,探测器倾斜 20° 放置,令平面镜与探测器相距 $L=600$ mm。设定平面镜半径为 10 mm,入射光斑半径 $r_0=2.5$ mm,入射光波长 $\lambda=632.8$ nm,入射光功率 $P_i=1$ W。

在商业软件中赋予平面镜表面不同的粗糙度 σ ,即 0.5、1.5、1.5 nm。令 $l=0.01$, $S=-1.5$,此时对应的 b_0 分别为 0.008 7、0.034 9、0.078 5。在给定 BRDF 参数下进行仿真模拟,旋转平面镜从 $-6.3^\circ \sim 6.3^\circ$ 。由于测量反射光附近的杂散光时,其值会随散射角的增加而快速下降,因此设定 $-0.3^\circ \sim 0.3^\circ$ 的采样间隔为 0.05° ,其他范围的采样间隔为 0.3° 。探测器像元处的仿真值及其与公式(8)的理论计算结果的对比如图 3 所示。图 4 给出了不同粗糙度对应的仿真值相对于理论计算值的误差曲线。

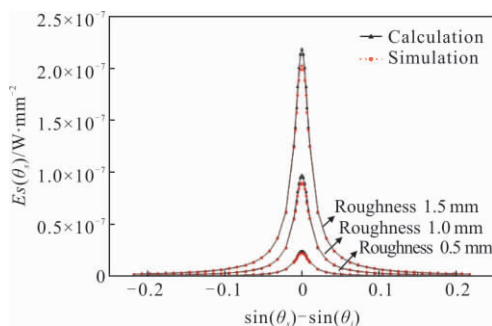


图 3 不同粗糙度对应的探测器像元上散射光辐照度理论仿真值和计算值对比

Fig.3 Comparison of theoretical simulation values and calculation values of scattered light irradiance on detector pixels corresponding to different roughness

图 3 是平面镜在不同粗糙度下,探测器像元接

受到的散射辐照度作为观测点的方向余弦的函数绘制。横坐标是 $\sin\theta_i - \sin\theta_s$,这是观察点在方向余弦空间中与镜面光束的距离,这里与平面镜的旋转角度 θ 有关,纵坐标是探测器像元接受到的散射光辐照度。虚线表示软件仿真的结果,实线表示由公式(8)计算的结果。

结合图 4 可知,在设定的采样范围内理论计算值和仿真值之间的误差基本在 8% 以下。由于在实际由部分杂散光数据重构参数时,中间段的杂散光值是可以忽略的,参考下文,因此忽略中间段时,在采样范围内整体误差基本在 3% 以下。由此验证了平面镜旋转 θ 度对应的探测器像元上的辐照度表达式,即公式(8)的正确性。误差产生的原因是软件仿真是采用光线追迹方法,其数值计算结果是随着追迹数目的增加而收敛,虽然通过试验选取了合理的追迹光线数,但和基于微积分方法的计算结果相比会存在一定的误差。由于该表达式是建立在 Harvey 模型的“平移不变性”的性质上进行的推导,该表达式的正确性反过来也验证了 Harvey 模型的可信度水平。图 4 中误差曲线在 0° 附近的误差比起其他角度范围的要大,这是因为入射光斑具有一定的口径,在反射光附近测量杂散光时,测得的值易受到反射光的影响,从而影响了数据的准确性。误差在散射角较大时,随散射角的增加而增大是因为散射角越大,越不满足公式(8)推导时近似处理的前提条件。

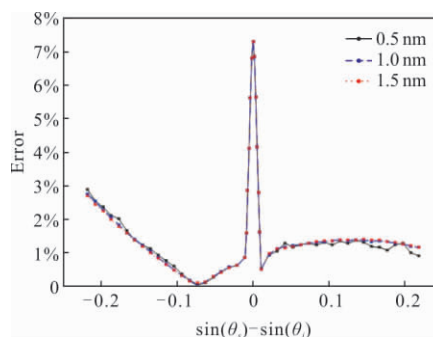


图 4 仿真值相对于理论值的误差曲线

Fig.4 Error curve of simulated value relative to theoretical value

2.3 由测量数据重构双向反射分布函数 BRDF

由杂散光数据重构 BRDF 参数,需对公式(8)推导,得:

$$BSDF=E_s(\theta_s) \cdot L^2/P_i \quad (9)$$

只考虑反射时,BSDF 即是 BRDF,所以只需一

维测量在细光束入射下,平面镜在子午面的旋转角对应的若干杂散光测量值,代入到公式(9)即可重构得到 BRDF 参数。杂散光数据的准确性程度会影响最后重构的精度,将在第 3 章节中对此进行详细讨论。另外对于未知粗糙度的镜面时,可由测得的杂散光数据重构出的 BRDF 参数反推出待测面的粗糙度。

3 平面镜杂散光测试精度

文中综合考虑了在实际的杂散光测试过程中,可能引起杂散光测量误差的各个因素对重构 BRDF 参数精度的影响,证明由杂散光测试数据重构 BRDF 参数的可行性。考虑实际情况下的背景噪声,将仿真数据添加随机噪声对重构精度进行了评估。考虑反射细光束实际具有一定大小并且入射光束具有衍射效应,讨论通过选取合理旋转角度范围内的数据,对 BRDF 参数重构的精度进行研究。

3.1 背景噪声对重构 BRDF 精度的影响

因为实验测量杂散光时可能会有人为因素(如探测器的位置偏差),转台旋转角度偏差,探测器暗电流等等所引起的背景噪声干扰,所以需要将仿真数据添加加性噪声对重构 BRDF 三参数的精度进行评估。取图 3 中粗糙度为 0.5 nm 时的杂散光仿真真数据进行处理,由于此时大部分杂散光数据的量级大约在 $10^{-9} \sim 10^{-10} \text{ W/mm}^2$,因此设定随机噪声的大小为 $[-5 \times 10^{-9}, 5 \times 10^{-9}] \text{ W/mm}^2$,叠加到仿真数据上,结果如图 5 所示。此时重构的 BRDF 曲线与理论的对比及误差见图 6。重构的三参数值分别为 $b_0=0.0081, l=0.0111, S=-1.5393$ 。

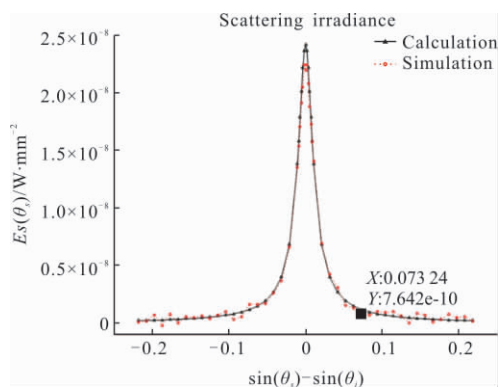


图 5 粗糙度为 0.5 nm 时添加随机噪声后的仿真值和理论计算值

Fig.5 Simulation value with random noise and theoretical calculation value when σ is 0.5 nm

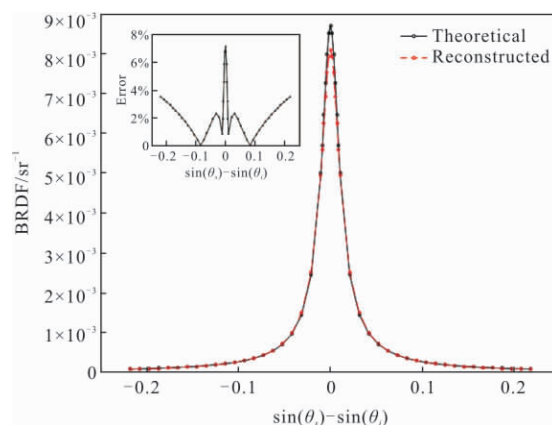


图 6 粗糙度为 0.5 nm 时,添加随机噪声后重构三参数的 BRDF 曲线和理论 BRDF 曲线及其误差

Fig.6 Reconstructed(adding random noise) BRDF curve and theoretical BRDF curve and their error when σ is 0.5 nm

由图 6 可知,平面镜粗糙度为 0.5 nm 时由添加背景噪声后的仿真数据重构的曲线其 RMS 值为 $2.3535 \times 10^{-4} \text{ sr}^{-1}$ 。理论的 BRDF 曲线相对于重构的三参数值拟合的 BRDF 曲线的误差基本在 4% 以下,中间段的误差比起旁边的大是因为图 4 在散射角较小时比散射角较大时的误差大,两边误差增大是因为散射光强值随散射角的增加而减小,更易受噪声影响。考虑背景噪声后,重构的曲线相对于理论曲线的整体误差仍然较小,验证了由散射数据重构 BRDF 三参数值的可行性而且重构的精度较高。

3.2 反射光对重构 BRDF 精度的影响

在实际实验测量中,由于散射角非常小时的杂散光测试数据难以扣除反射光强度的影响,导致太靠近反射光的散射光强度容易测不准,而且由于衍射效应的存在,靠近反射光周围测得的散射光数据会受到衍射效应的影响。所以需要忽略以反射光为中心一定范围内的杂散光数据进行重构。但由于离反射光越远的杂散光数据对应杂散光曲线越平滑的段,会使重构 BRDF 三参数的精度下降,所以需要研究以反射光为中心靠近反射光附近的可忽略的最大采样点区间,保证此时的重构精度仍然能满足笔者的要求。

由前面可知,图 5 的采样范围为 $\theta=[-6.6, -6.6]$,在 $(-0.3, 0.3)$ 范围内的采样间隔为 0.05° ,其他范围的采样间隔为 0.3° 。按采样间隔 0.3° 依次扩大忽略以反射光为中心的散射角范围(即依次忽略平面镜

旋转角 $\theta=(-0.3, 0.3), \theta=(-0.6, 0.6)$ 等等对应的杂散光数据)。由于散射角越大时对应的散射光强度越弱,越易受到背景噪声的影响,所以这里将背景噪声稍稍减少,添加大小 $[-10^{-10}, 10^{-10}] \text{ W/mm}^2$ 的随机噪声进行重构。当忽略到 $\theta=(-2.1, 2.1)$, 即取平面镜的旋转角 $\theta=[-6.3, -2.1] \& [2.1, 6.3]$ 对应的杂散光数据添加背景噪声时, 如图 7 所示, 此时由数据重构的 BRDF 曲线和误差图如图 8 所示, 对应重构的三参数分别为 $b_0=0.0063, l=0.0129, S=-1.5354$ 。

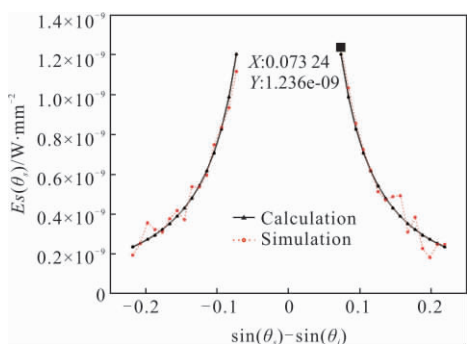


图 7 当 $\theta=[-6.3, -2.1] \& [2.1, 6.3]$ 时添加随机噪声后的仿真值和理论计算值

Fig.7 Simulation value with random noise and theoretical calculation value when $\theta=[-6.3, -2.1] \& [2.1, 6.3]$

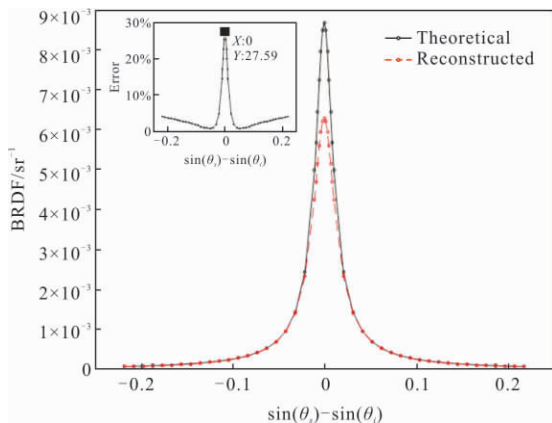


图 8 当 $\theta=[-6.3, -2.1] \& [2.1, 6.3]$ 时和重构三参数的 BRDF 曲线和理论 BRDF 曲线及其误差

Fig.8 Reconstructed (adding random noise) BRDF curve and theoretical BRDF curve and their error when $\theta=[-6.3, -2.1] \& [2.1, 6.3]$

由图 8 可知, 由平面镜旋转角为对应的数据添加随机噪声后重构的 BRDF 曲线的 RMS 值为 $4.6813 \times 10^{-4} \text{ sr}^{-1}$, 与之前的相比精度下降。此时重构

曲线相对理论曲线的误差基本在 28% 以下, 根据课题项目要求, 两者误差需在 30% 以下, 由此可见重构的精度在可接受的范围内。曲线中间段的误差增幅明显较大, 这是因为 BRDF 三参数的 b_0 对应的是 BRDF 曲线横坐标为 0 时的值, 而 S 值对应的是 BRDF 曲线的倾斜段。因此将平面镜旋转角从 2.1° 开始进行测量的值添加背景噪声进行重构, 该方法仍具有可行性。如果继续忽略数据进行重构, 那么反射光附近的散射角对应的 BRDF 值的精度会下降更多, 实际意义不大。

仿真时细光束半径为 2.5 mm, 平面镜与探测器相距 600 mm, 探测像元的散射光线正好不受反射光的影响时, 平面镜旋转 $\theta = \arcsin(2.5/600)/2 = 0.12^\circ$ 。而 2.1° 远大于正好不受反射光影响时的 0.12° , 因此该方法解决了散射角极小时, 杂散光测量值难以扣除反射光影响的困扰。由此可见考虑实际的背景噪声, 该方法在合理的平面镜的旋转角度范围内仍具有可行性。同时可以将平面镜旋转的初始值进行设置, 避开杂散光数据受反射光影响的问题, 具有实际的意义。

3.3 衍射效应对重构 BRDF 精度的影响

在实际的测量中, 由于入射光束被孔径限制, 存在衍射效应, 使得探测面除了接受到散射光外, 还会接收到衍射光, 因此有必要对衍射效应的影响进行研究。在商业软件中建立图 2 所示的模型, 在入射光路中添加半径为 2.5 mm 的孔径光阑, 设置入射功率, 保证经孔径光阑出射后的光功率也为 1 W, 设置镜面粗糙度为 0.5 nm。最后探测面接受到的衍射光强值和散射光强值如图 9 所示。

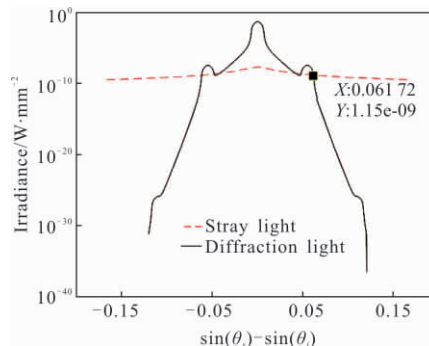


图 9 仿真的杂散光辐照度值与衍射光强值对比

Fig.9 Comparison of the stray light irradiance values and diffracted light intensity values

图 9 中横坐标依然为 $\sin\theta_s - \sin\theta_i$, 红色虚线表示平面镜的散射辐照度曲线, 黑色实线表示衍射光强曲线。由该图可知, 当 $\sin\theta_s$ 大于 0.061 72, 即 $\theta_s > 3.54^\circ$, 也即平面镜旋转角 $\theta > 1.77^\circ$ 时, 得到的散射光辐照度基本不受衍射光的影响。前面 1 小节中提到, 当平面镜旋转角的初始值为 2.1° 时, 重构的精度仍然满足要求。而 2.1° 大于此处分析的杂散光基本不受衍射光影响时的平面镜旋转角 1.77° , 因此考虑到衍射光的影响, 该方法仍具可行性。

虽然离反射光越近的位置, 测得的杂散光越受衍射光的影响, 但离反射光越远, 散射光强度也越小, 不利于测量。而且由前面的分析知, 平面镜的初始值越小, 重构三参数拟合的 BRDF 曲线精度也会越高。因此在实际的实验中, 可以在光路中加二级光阑进行衍射光抑制, 也可以对测得的数据进行衍射校正, 从而使靠近反射光的杂散光测量数据也有效。

4 曲面的杂散光测试校正

引力波望远镜中的各镜面除了平面镜外, 还使用不同曲率的反射镜。通过研究不同曲率半径的镜面产生的杂散光大小与镜面粗糙度之间的关系发现, 曲面杂散光数据可以在已经知道曲率大小的情况下, 由平面杂散光校正得到, 该校正曲线与粗糙度无关。

分别取镜面的曲率半径为 200、400、-200 mm, 对每个曲率半径大小的镜面赋予不同的粗糙度, 分别为 0.5、1、1.5 nm。接下来将不同粗糙度下的各个曲面镜产生的杂散光大小对对应同一粗糙度的平面镜产生的杂散光进行归一化, 得到的结果如图 10 所示。

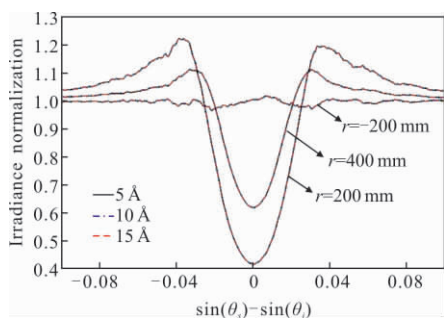


图 10 同一粗糙度下, 凸面镜($r=200\text{ mm}$, $r=400\text{ mm}$), 凹面镜($r=-200\text{ mm}$)对平面镜产生的杂散光进行归一化

Fig.10 Convex mirror ($r=200\text{ mm}$, $r=400\text{ mm}$) and the concave mirror ($r=-200\text{ mm}$) normalizes the stray light generated by the plane mirror under the same roughness

由图 10 可知, 每一个曲率半径的曲面镜在不同的粗糙度下对应的杂散光曲线对同一粗糙度的平面镜产生的杂散光值后归一化后是重合的。即同一曲率不同粗糙度的镜面的杂散光在其它条件保持不变时归一化后是相等的, 与粗糙度无关, 只与曲率有关, 不同曲率的镜面对应一条特定的曲线。所以利用该结论, 可以取相同粗糙度的平面镜进行测量, 通过校正得到对应的曲面杂散光数据。

5 结论

文中根据光学元件的各向同性及杂散光模型的对称性, 针对细光束入射到各镜面的情况, 通过对曲面杂散光进行研究, 发现了曲面杂散光相对平面杂散光的归一化曲线在较大范围内与曲面的粗糙度无关, 这一结论为带曲率的镜面的杂散光测量提供了新思路。论文用数值方法验证了由杂散光数据重构 BRDF 参数的可行性。该方法将通常情况下测量 BRDF 所需的四个机械自由度减少到一个, 只需在子午面内一维测量若干个散射点数据, 即可由杂散光测量数据重构 BRDF 三参数, 测量镜面可以是曲面。该方法还可以由重构的参数反推出待测面的粗糙度。文中的数值实验探讨了测量重构杂散光曲线的精度, 由杂散光数据重构参数在实验上是可行的。但由于在弱光条件下开展测试, 实验设计及实施将具有一定的挑战性。

参考文献:

[1] Ward G J. Measuring and modeling anisotropic reflection[J]. *Computer Graphics*, 1992, 26(2): 265-272.

[2] Han Yang, He Junhua, Yan Yadong, et al. Characteristics research of diffuser panel in near backscatter measurement system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(9): 0917002. (in Chinese)

韩洋, 何俊华, 闫亚东, 等. 近背向散射测量系统中漫反射板的特性研究[J]. *红外与激光工程*, 2017, 46(9): 0917002.

[3] Shi Weichao, Zheng Jianming, Li Yan, et al. Measurement and modeling of bidirectional reflectance distribution function on cutting surface [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(10): 1029001. (in Chinese)

史卫朝, 郑建明, 李言, 等. 加工表面双向反射分布函数的测量与建模[J]. *光学学报*, 2018, 38(10): 1029001.

- [4] Li Ming, Zong Xiaoying. In-lab system-level BRDF measurement method of calibration diffuser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(1): 0117004. (in Chinese)
李明, 宗肖颖. 定标漫反射板实验室系统级 BRDF 测量方法[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(1): 0117004.
- [5] Yasuhiro Mukaigawa, Kohei Sumino, Yasushi Y. Rapid BRDF measurement using an ellipsoidal mirror and a projector [J]. *Transactions on Computer Vision and Applications*, 2009(1): 21–32.
- [6] Lv Yang, Zeng Xuefeng, Zhang Feng. Effect of surface scattering on imaging performance for off-axis three mirror optical system [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(9): 092901. (in Chinese)
吕洋, 曾雪锋, 张峰. 镜面散射对离轴三反系统成像质量的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(9): 092901.
- [7] Jeffrey C L, Shannon R S. Optical telescope design for a space-based Gravitational-wave mission [C]//SPIE, 2014, 223: 914314.
- [8] Harvey J E. Light-scattering characteristic of optical surfaces [C]//SPIE, 1977, 0107: 41–47.
- [9] Nicodemus F E. Directional reflectance and emissivity of an opaque surface[J]. *Applied Optics*, 1965, 4(7): 767–773.
- [10] Zhang Tianyi, Hou Yonghui, Xu Teng, et al. Stray light analysis on LAMOST high-resolution spectrograph [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(1): 0117003. (in Chinese)
张天一, 侯永辉, 徐腾, 等. LAMOST 高分辨率光谱仪杂散光分析[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(1): 0117003.