



光学学报
Acta Optica Sinica
ISSN 0253-2239, CN 31-1252/O4

《光学学报》网络首发论文

题目：引力波望远镜的装调误差对 TTL 噪声的影响研究
作者：崔新旭，方超，王智
收稿日期：2023-03-14
网络首发日期：2023-05-10
引用格式：崔新旭，方超，王智. 引力波望远镜的装调误差对 TTL 噪声的影响研究 [J/OL]. 光学学报.
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1252.O4.20230509.1047.012.html>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

引力波望远镜的装调误差对 TTL 噪声的影响研究

崔新旭¹ 方超¹ 王智^{1*}

¹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: 研究引力波望远镜的装调误差对望远镜的 TTL 耦合噪声的影响。通过控制变量法, 保持其他参量不变, 仅对引力波望远镜中的某项装调公差进行赋值, 仿真分析引力波望远镜中的某项装调公差对出瞳位置变化的影响, 进而计算出激光干涉信号经过全玻璃激光干涉仪, 最终在四象限探测器上进行干涉时, 由于引力波望远镜的装调公差的存在, 导致的 TTL 耦合噪声的变化情况。通过对比发现, 引力波望远镜的主镜与次镜的距离公差, 对引力波望远镜的 TTL 耦合噪声影响大于其他光学元件之间的距离公差对 TTL 耦合噪声的影响。主镜和次镜之间的距离公差导致的 TTL 耦合噪声的变化与次镜和三镜之间的距离公差、三镜和四镜之间的距离公差导致的 TTL 耦合噪声的变化符号相反; 光阑和主镜之间的距离装调公差对 TTL 耦合噪声的变化影响很小, 可以忽略不计。各个光学元件的距离装调公差导致的 TTL 耦合噪声的变化量与抖动角度之间呈抛物线规律分布。在装调空间引力波望远镜时, 应着重控制主镜与次镜之间的距离误差。并且可以使用次镜和三镜的距离装调误差、三镜和四镜之间的距离装调误差导致的 TTL 耦合噪声部分抵消由装调主镜和次镜之间的距离误差导致的 TTL 耦合噪声。

关键词 光学; 引力波; 干涉测量; 望远镜; 装调公差;
中图分类号 O439 **文献标志码** A

1 引言

自从 LIGO 地面引力波天文台首次直接探测到引力波^[1], 人类便发现了探索宇宙奥秘的全新窗口。证实了爱因斯坦对引力波的预言^[2-3], 开辟了采用引力波研究宇宙天文奥秘的新手段, 对天文学和物理学的发展意义重大。

由于地面引力波探测受到地球曲率半径、环境扰动、重力梯度、地震等各种地面噪声^[4]的影响, 所探测的引力波频段范围内的波源十分有限, 因此需发展空间引力波探测技术。太极计划中, 采用星间激光干涉测量光学系统, 在太空中对引力波进行探测。但是由于太空环境存在各种扰动, 星间激光干涉测量系统的接收端或发射端处于抖动状态, 导致用于星间测距的两束干涉光束存在一定的角度抖动。由于两个干涉光束之间的角度抖动耦合到光程信号读出的噪声称之为 TTL (Tilt-to-Length) 耦合噪声。

要在百万公里的距离^[5]上实现皮米量级的干涉测距, 要求的技术指标精度非常严苛, 精度以皮米量级计算。装调引力波望远镜的过程中, 由于装调误差的存在, 会导致望远镜出瞳位置变化, 致使 TTL 耦合噪声产生变化, 影响干涉测量的精度。所以研究引力波望远镜的

基金项目: 国家自然科学基金(星间激光干涉测量望远镜 TTL 耦合噪声研究, 62075214)

通信作者: *E-mail: wz070611@126.com

装调误差对 TTL 耦合噪声的影响十分重要。研究引力波望远镜的装调误差对 TTL 耦合噪声影响的规律性, 研究结果可以用于指导实际的空间引力波望远镜的装调工作。可更好的将 TTL 耦合噪声控制在一定低的水平。以保证实际生产出的空间引力波望远镜能够满足实际的使用需求。

目前对于国外设计的空间引力波望远镜, 如 Verlaan 等人验证了为 ESA 设计的引力波望远镜的热稳定性和抗振动实验^[6]; S Schuster 等人研究了减小测试质量干涉仪的 TTL 耦合噪声的方法^[7], Gudrun 讨论了减小 TTL 耦合噪声的两镜成像系统和四镜成像系统^[8]。D.Korytov 等人探究了使用碳化硅材料制造的天基引力波望远镜的尺寸结构稳定性^[9]。JILA 研究了 LISA 望远镜的波前畸变和光束指向等问题, 研究对抖动角度反应最灵敏的波前差 zernike 拟合分量^[10]。Jean-Yves Vinet 等人从光学系统的相位关系分析 LISA 望远镜的指向抖动噪声^[11]。Shannon R 等人从光程稳定性和杂散光的角度阐述设计引力波望远镜的依据^[12-13]。Isable Escudreo Sanz 系统阐述了引力波望远镜的工作环境并设计望远镜^[14]。Sonke 的博士论文中介绍 TTL 耦合噪声的模型^[15]。陈博士等人根据杂散光和波前的影响设计了离轴四反望远镜^[16]。以上研究都未涉及到望远镜的装调公差与 TTL 耦合噪声之间的内在关系。空间引力波望远镜作为星间激光干涉测量光学系统的重要组成部分, 决定着星间激光干涉测量的准确性, 以及空间引力波探测的成败。

由于 TTL 耦合噪声是第二大噪声源^[17], 引力波望远镜实际工程化过程中, 装调又会对 TTL 耦合噪声产生影响, 但是对于望远镜的装调与 TTL 耦合噪声之间的关联却鲜有报道。所以对望远镜的装调公差与 TTL 耦合噪声之间联系的研究对引力波望远镜的工程化至关重要, 引力波望远镜的装调公差对 TTL 耦合噪声会产生怎样的影响决定着最终的引力波望远镜是否满足使用要求。

本文通过仿真设计满足波前差指标要求的引力波望远镜, 计算设计的引力波望远镜的 TTL 耦合噪声, 分析望远镜的装调公差对 TTL 耦合噪声产生的影响, 来判断装调引力波望远镜的过程中对 TTL 耦合噪声敏感的装调误差变量, 研究结果可指导引力波望远镜的装调。

2 装调误差对 TTL 耦合噪声的影响

2.1 空间引力波望远镜的设计

在星间激光干涉测量光学系统中, 为了在百万公里距离上, 实现激光信号的发射与接收^[14], 使两束干涉信号满足杂散光指标要求和光程稳定性要求, 一般使用到离轴四反望远镜作

为激光信号的发射和接收装置。根据设计指标要求，设计的空间引力波望远镜的结构参数如表 1 所示。

表 1 离轴四反望远镜结构参数

Table 1 Structural parameters of off-axis quadruple mirror telescope

NO.	name	radius of curvature /mm	thickness /mm
1	Primary mirror	-12xx.xxx	-600
2	Secondary mirror	-8x.xxx	590
3	Third mirror	-6xx.xxx	-58.141
4	Forth mirror	3xx.xxx	118.013

本次设计的引力波望远镜的光路图如图 1 所示，无穷远处的平面波经过入瞳后，先经过主反射镜与次反射镜的反射成一次像，再经过三镜和四镜的反射后，在出瞳处以平行光出射。

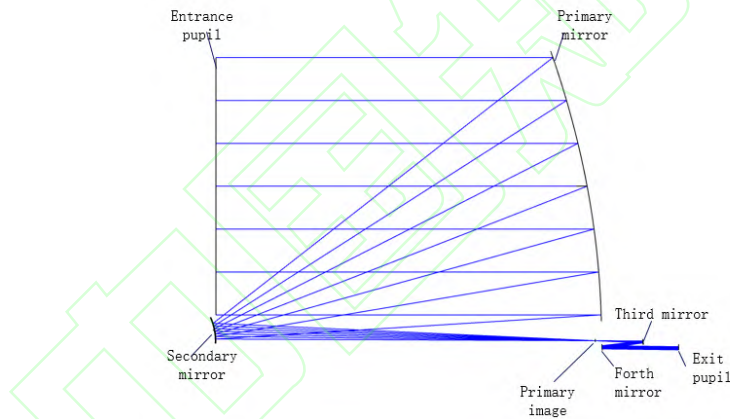


图 1 空间引力波望远镜光路图

Fig. 1 Light path diagram of space gravitational wave telescope

引力波望远镜的设计波前差如图 2 所示，光学系统的设计波前残余差为 $0.0085\lambda (\lambda = 1064nm)$ 。

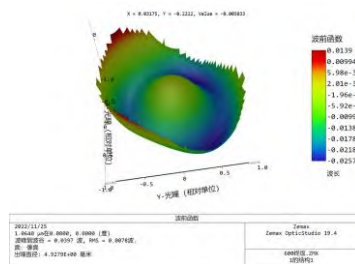


图 2 空间引力波望远镜的波前差

Fig. 2 Wavefront difference of space gravitational wave telescope

为了方便说明问题，将星间激光干涉测量光学系统简化为图 3 所示。

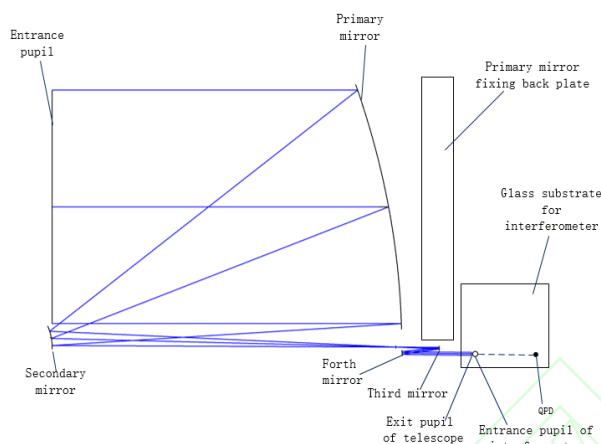


图 3 星间激光干涉仪光路简图

Fig.3 Schematic diagram of the optical path of the interstellar laser interferometer

引力波望远镜的入瞳控制进入整个引力波望远镜的光信号能量的强弱，出瞳所在位置如图 3 所示。望远镜出瞳要与干涉仪的入瞳相衔接，在干涉仪内部的光路用虚线代替，望远镜的出瞳距四象限探测器之间的距离为激光干涉仪的干涉臂长。对于设计的星间激光干涉测量光学系统而言，理想望远镜的出瞳与干涉仪基板的入瞳相重合，并靠刚性结构固定，此刚性结构要满足光程稳定性要求，同时要将引力波望远镜的主镜固定背板、全玻璃激光干涉仪全部固定，同时保证理想状态下设计的引力波望远镜的出瞳与干涉仪的入瞳相重合。

假设设计和加工的刚性结构能够使理想的引力波望远镜的出瞳与干涉仪的入瞳相重合，但将引力波望远镜用刚性结构固定后，由于装调误差的存在，引力波望远镜的出瞳会偏离激光干涉仪的入瞳，致使引力波望远镜实际引入的 TTL 耦合噪声与理想情况下的 TTL 耦合噪声有差别。TTL 耦合噪声的计算如公式^[18] (1) 所示。

$$Int = \int_s E_{meas} E_{ref}^* dr^2, \quad (1)$$

Int 代表积分运算， E_{meas} 代表测量光束， E_{ref}^* 代表参考光束 E_{ref} 的共轭， S 代表积分区域，通常测量光束是平面波，参考光束通常是高斯光束。然后推导出 LPF 信号产生的轴向路径长度信号，计算上式并进行泰勒展开。本文仅从应用光学的角度考虑装调公差对 TTL 耦合噪声的影响，所以忽略波动光学的相关项，得到光程差的计算公式

$$LPS_{LPF} \approx -\frac{1}{2} d\alpha^2 + \frac{1}{2} (d - z_0)\alpha^2 + o(\alpha^4), \quad (2)$$

α 表示抖动角度， d 表示的是望远镜的出瞳距离四象限探测器的距离， z_0 是高斯光束的束腰位置， $o(\alpha^4)$ 代表与抖动角度 α 无关的高阶量，可不必考虑。

假设平顶光束是理想的平面波，高斯光束是理想的高斯线型分布，并且高斯光束的束腰位置位于四象限光电探测器感光面上。所以忽略由于波前不匹配导致的 TTL 耦合噪声，只关注由于几何光程路径差导致的 TTL 耦合噪声。那么 TTL 耦合噪声的计算公式可简化为：

$$LPS_{LPF} \approx -\frac{1}{2}d\alpha^2, \quad (3)$$

2.2 装调公差对 TTL 耦合噪声的影响

由于望远镜与干涉仪之间的相对位置固定，望远镜的设计出瞳与干涉仪的四象限探测器之间的距离为 417mm。理想位置情况下，由于加工公差的存在，望远镜的出瞳位置受到加工公差的影响，整个望远镜所对应的 TTL 耦合噪声会发生相应变化，但是变化的程度和变化规律目前并不知晓，所以研究引力波望远镜的装调公差对星间激光干涉测量系统的 TTL 耦合噪声的影响十分必要。将星间激光干涉测量系统的 TTL 耦合噪声与望远镜装调公差的敏感性建立联系，并以 TTL 耦合噪声的要求为判据，建立装调公差项与 TTL 耦合噪声变化的模型关系。

根据计算 TTL 耦合噪声的公式，理想位置情况下，TTL 耦合噪声随抖动角度的变化曲线，与存在一定的装调公差条件下，TTL 耦合噪声随抖动角度的变化曲线，二者之差 ΔS_{LPF} 作为与抖动角度的关系曲线图。以相邻两镜组之间的距离增加 0.2mm 作为装调公差，定量分析装调公差对 TTL 耦合噪声的影响。本次设计的引力波望远镜的装调公差如表 2 所示。

表 2 装调的距离公差值

Table2 Various tolerance values of assembly and adjustmentt

NO.	Component distance	Design distance/mm	Tolerance value/mm	Actual distance/mm
1	Aperture and primary mirror	600.000	0.200	600.200
2	Primary and secondary mirror	-600.000	-0.200	-600.200
3	Secondary and third mirror	660.000	0.200	660.200
4	Third and forth mirror	-58.141	-0.200	-58.341

当光阑与主镜之间的距离存在+0.2mm 的安装公差时，即光阑与主镜的距离为 600.2mm

时，与理想情况下，无装调公差引力波望远镜相比较，TTL 耦合噪声的变化如图 4 所示。

图 4 (a) 中显示 TTL 耦合噪声的变化 ΔS_{LPF} 几乎为一条水平直线，即 TTL 耦合噪声变化几乎为零。

图 4(b) 中显示的曲线 ΔS_{LPF} 变化率是一条直线，此直线的斜率为 -5.296×10^{-7} 。

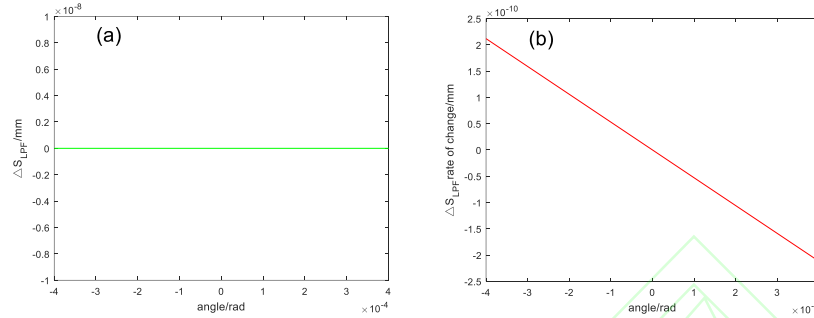


图 4 光阑与主镜之间存在安装误差 (a) ΔS_{LPF} 变化曲线图 (b) ΔS_{LPF} 变化率直线图

Fig.4 There is an installation error between the diaphragm and the primary mirror. (a) ΔS_{LPF} change curve; (b) ΔS_{LPF} rate of change line graph;

当空间引力波望远镜的主次镜存在装调误差时，如存在+0.2mm 的装调误差，即在实际装调过程中，主镜与次镜之间的实际距离为 600.2mm 时，TTL 耦合噪声曲线与不存在装调误差条件下的 TTL 耦合噪声的差值如图 5 所示。图 5(a)中显示 TTL 耦合噪声的变化 ΔS_{LPF} 随倾斜抖动角度 α 之间呈抛物线规律变化，且抛物线开口向上，抛物线的斜率变化如图 5(b) 所示,该直线的斜率大小为 9.021×10^{-4} 。

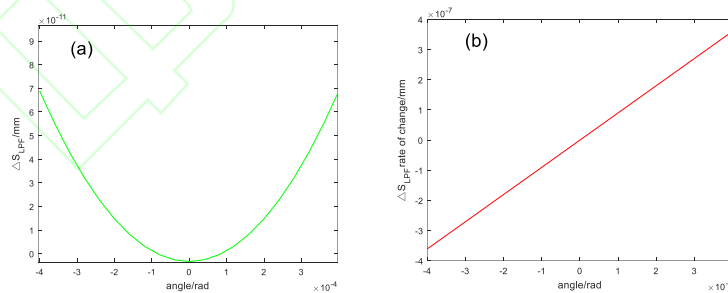


图 5 主镜与次镜之间存在安装误差 (a) ΔS_{LPF} 变化曲线图 (b) ΔS_{LPF} 变化率直线图

Fig.5 There is an installation error between the primary mirror and the secondary mirror (a) ΔS_{LPF} change curve; (b) ΔS_{LPF} rate of change line graph;

当次镜与三镜之间存在装调误差的情况下，如存在+0.2mm 的装调误差时，次镜与三镜之间的距离由 590mm 变为 590.2mm 时，TTL 耦合噪声曲线与不存在装调误差条件下的

TTL 耦合噪声的差值曲线图如图 6 所示。

图 6(a)中显示 TTL 耦合噪声曲线的变化 ΔS_{LPF} 与抖动角度 α 成抛物线规律变化，且抛物线的开口向下，抛物线的斜率变化图如图 6(b)所示，该直线的斜率为 -5.824×10^{-5} 。与图 5 相比，图 5 的斜率变化是图 6 斜率变化的 15.489 倍,且方向相反。说明主次镜距离变化引起的 TTL 变化是次镜三镜距离变化引起的 TTL 变化的 15.489 倍。说明主次镜对 TTL 耦合噪声的敏感程度大于次镜与三镜距离的敏感程度，并且变化方向相反。

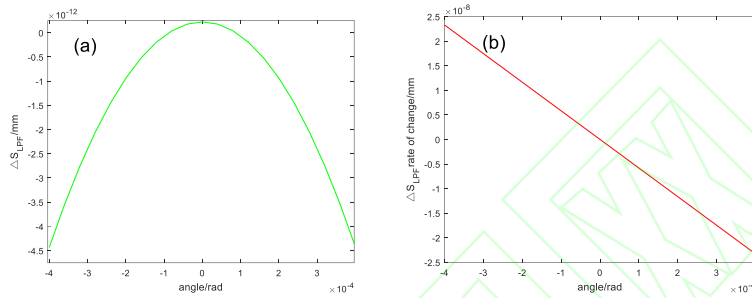


图 6 次镜与三镜之间存在安装误差 (a) ΔS_{LPF} 变化曲线图 (b) ΔS_{LPF} 变化率直线图

Fig.6 There is an installation error between the secondary mirror and the third mirror (a) ΔS_{LPF} change curve;

(b) ΔS_{LPF} rate of change line graph;

当三镜与四镜之间存在装调误差的情况下，如存在 0.2mm 的装调误差，三镜和四镜之间的距离由 -58.1406 变为 -58.3406mm，TTL 耦合噪声曲线与不存在装调误差条件下的 TTL 耦合噪声的差值曲线图如图 7 所示。

图中显示 TTL 耦合噪声曲线的变化 ΔS_{LPF} 与抖动角度 α 之间成抛物线变化，抛物线开口向下，抛物线的斜率变化如图 7 (b) 所示，直线的斜率为 -9.689×10^{-5} 。与图 5 (b) 相比，图 5 (b) 斜率是图 7(b)斜率的 9.311 倍，且开口向下，说明主次镜距离变化引起的 TTL 耦合噪声变化是三镜四镜距离变化引起的 TTL 耦合噪声变化的 9.311 倍，即主次镜的敏感性是三四镜距离敏感性的 9.311 倍。

说明主次镜对 TTL 耦合噪声的敏感程度大于三四镜距离的敏感程度，并且方向相反，而三镜四镜距离的敏感程度是次镜三镜距离的敏感程度的 1.664 倍，并且方向相同。

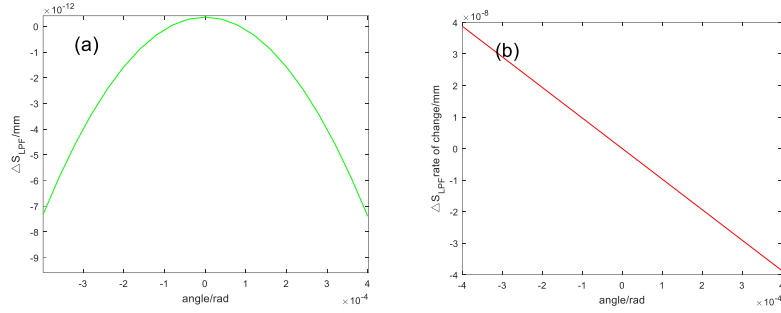


图7 三镜与四镜之间存在安装误差 (a) ΔS_{LPF} 变化曲线图 (b) ΔS_{LPF} 变化率直线图

Fig.7 There is an installation error between the three mirrors and the four mirrors (a) ΔS_{LPF} change curve; (b) ΔS_{LPF} rate of change line graph;

主次镜之间的距离公差对 TTL 耦合噪声的变化影响最大，变化关系呈抛物线分布。次镜与三镜之间的公差和三镜与四镜之间的距离公差，导致 TTL 耦合噪声的变化趋势相反，能够相互抵消。光阑与主镜之间的距离公差对 TTL 耦合噪声的变化影响几乎可以忽略。

3 分析与讨论

设计的空间引力波望远镜采用离轴四反望远镜的结构形式，根据图 1 中的离轴四反望远镜，将其进行等价转换，等效光路图如图 8 所示，由于设计的引力波望远镜的主镜、次镜、三镜和四镜分别是汇聚透镜、发散透镜、汇聚透镜、汇聚透镜，主镜的焦距 f_1 为正、次镜的焦距 f_2 为负、三镜的焦距 f_3 为正、四镜的焦距 f_4 为正。用 d_1 代表入瞳与主镜之间的距离， d_2 代表主镜与次镜之间的距离， d_3 代表次镜与一次像面的距离， d_4 代表一次像面与三镜的距离， d_5 代表三镜与四镜之间的距离， d_6 代表四镜与出瞳之间的距离， d 代表出瞳距四象限探测器之间的距离。等效处理后的光路图如图 8 所示。

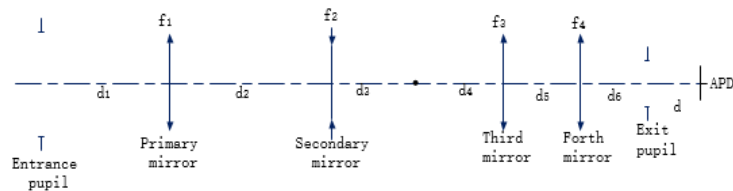


图8 引力波望远镜的等效光路图

Fig.8 Equivalent optical path diagram of gravitational wave telescope

计算光阑依次经过主镜、次镜、三镜和四镜组成的光学系统后，在像空间的像距，由高斯公式^[19]

$$\frac{1}{l'} - \frac{1}{l} = \frac{1}{f'}, \quad (4)$$

计算，光阑经过主镜、次镜、三镜和四镜后，出瞳位置 l'_4 的大小等于

$$l'_4 = -1 / (1 / (d_5 + 1 / (1 / (d_3 + d_4 - 1 / (1 / f_2 - 1 / (d_2 - 1 / (1 / d_1 + 1 / f_1)))) - 1 / f_3)) - 1 / f_4), \quad (5)$$

当分析图 8 中所示的光路与 TTL 耦合噪声的关系时，为了使整体内容精简，仅以分析距离 d_3 为例，说明整个分析方法及结果。将 l'_4 写成与 d_3 之间的距离关系公式，最终的形式如式(6).

$$l'_4 = [(d_1 d_2 f_3 f_4 - d_1 d_2 d_5 f_4 + d_1 d_5 f_1 f_4 + d_1 d_5 f_2 f_4 - d_2 d_5 f_1 f_4 - d_1 f_1 f_3 f_4 - d_1 f_2 f_3 f_4 + d_2 f_1 f_3 f_4 + d_5 f_1 f_2 f_4 - f_1 f_2 f_3 f_4) \times d_3 + d_1 d_2 d_4 f_3 f_4 - d_1 d_2 d_4 d_5 f_4 + d_1 d_2 d_5 f_2 f_4 + d_1 d_2 d_5 f_3 f_4 + d_1 d_4 d_5 f_1 f_4 + d_1 d_4 d_5 f_2 f_4 - d_2 d_4 d_5 f_1 f_4 - d_1 d_2 d_2 f_3 f_4 - d_1 d_4 f_1 f_3 f_4 - d_1 d_5 f_1 f_2 f_4 - d_1 d_4 f_2 f_3 f_4 - d_1 d_5 f_1 f_3 f_4 + d_2 d_4 f_1 f_3 f_4 + d_2 d_5 f_1 f_2 f_4 - d_1 d_5 f_1 f_2 f_4 + d_2 d_5 f_1 f_3 f_4 + d_4 d_5 f_1 f_2 f_4 + d_1 f_1 f_2 f_3 f_4 - d_2 f_1 f_2 f_3 f_4 - d_4 f_1 f_2 f_3 f_4 - d_5 f_1 f_2 f_3 f_4] / [(d_1 d_2 f_3 - d_1 d_2 d_5 + d_1 d_2 f_4 + d_1 d_5 f_2 - d_2 d_5 f_1 - d_1 f_1 f_3 - d_1 f_1 f_4 - d_1 f_2 f_3 + d_2 f_1 f_3 - d_1 f_2 f_4 + d_2 f_1 f_4 + d_5 f_1 f_2 - f_1 f_2 f_3 - f_1 f_2 f_4) \times d_3 + d_1 d_2 d_4 f_3 - d_1 d_2 d_4 d_5 + d_1 d_2 d_5 f_2 + d_1 d_2 d_4 f_4 + d_1 d_2 d_5 f_3 + d_1 d_4 d_5 f_1 + d_1 d_4 d_5 f_2 - d_2 d_4 d_5 f_1 - d_1 d_2 f_2 f_3 - d_1 d_2 f_2 f_4 - d_1 d_4 f_1 f_3 - d_1 d_5 f_1 f_2 - d_1 d_2 f_3 f_4 - d_1 d_4 f_1 f_4 - d_1 d_4 f_2 f_3 - d_1 d_5 f_1 f_3 + d_2 d_4 f_1 f_3 + d_2 d_5 f_1 f_2 - d_1 d_4 f_2 f_4 - d_1 d_5 f_2 f_3 + d_2 d_4 f_1 f_4 + d_2 d_5 f_1 f_3 + d_4 d_5 f_1 f_2 + d_1 f_1 f_2 f_3 + d_1 f_1 f_2 f_4 - d_2 f_1 f_2 f_3 + d_1 f_1 f_3 f_4 - d_2 f_1 f_2 f_4 + d_1 f_2 f_3 f_4 - d_2 d_1 f_3 f_4 - d_4 f_1 f_2 f_3 - d_4 f_1 f_2 f_4 - d_5 f_1 f_2 f_3 + f_1 f_2 f_3 f_4] \quad (6)$$

通过提取公因式，对等式(6)进行处理，得到的结果如等式(7)所示。

$$l'_4 = \frac{k_{31} d_3 + b_{31}}{k_{32} d_3 + b_{32}}, \quad (7)$$

其中，

$$k_{31} = d_1 d_2 f_3 f_4 - d_1 d_2 d_5 f_4 + d_1 d_5 f_1 f_4 + d_1 d_5 f_2 f_4 - d_2 d_5 f_1 f_4 - d_1 f_1 f_3 f_4 - d_1 f_2 f_3 f_4 + d_2 f_1 f_3 f_4 + d_5 f_1 f_2 f_4 - f_1 f_2 f_3 f_4, \quad (8)$$

$$b_{31} = d_1 d_2 d_4 f_3 f_4 - d_1 d_2 d_4 d_5 f_4 + d_1 d_2 d_5 f_2 f_4 + d_1 d_2 d_5 f_3 f_4 + d_1 d_4 d_5 f_1 f_4 + d_1 d_4 d_5 f_2 f_4 - d_2 d_4 d_5 f_1 f_4 - d_1 d_2 f_2 f_3 f_4 - d_1 d_4 f_1 f_3 f_4 - d_1 d_5 f_1 f_2 f_4 - d_1 d_4 f_2 f_3 f_4 - d_1 d_5 f_1 f_3 f_4 + d_2 d_4 f_1 f_3 f_4 + d_2 d_5 f_1 f_2 f_4 - d_1 d_5 f_1 f_2 f_4 + d_2 d_5 f_1 f_3 f_4 + d_4 d_5 f_1 f_2 f_4 + d_1 f_1 f_2 f_3 f_4 - d_2 f_1 f_2 f_3 f_4 - d_4 f_1 f_2 f_3 f_4 - d_5 f_1 f_2 f_3 f_4 \quad (9)$$

$$k_{32} = d_1 d_2 f_3 - d_1 d_2 d_5 + d_1 d_2 f_4 + d_1 d_5 f_2 - d_2 d_5 f_1 - d_1 f_1 f_3 - d_1 f_1 f_4 - d_1 f_2 f_3 + d_2 f_1 f_3 - d_1 f_2 f_4 + d_2 f_1 f_4 + d_5 f_1 f_2 - f_1 f_2 f_3 - f_1 f_2 f_4 \quad (10)$$

$$\begin{aligned}
b_{32} = & d_1 d_2 d_4 f_3 - d_1 d_2 d_4 d_5 + d_1 d_2 d_5 f_2 + d_1 d_2 d_4 f_4 + d_1 d_2 d_5 f_3 + d_1 d_4 d_5 f_1 + d_1 d_4 d_5 f_2 - d_2 d_4 d_5 f_1 - d_1 d_2 f_2 f_3 - d_1 d_2 f_2 f_4 \\
& d_1 d_4 f_1 f_3 - d_1 d_5 f_1 f_2 - d_1 d_2 f_3 f_4 - d_1 d_4 f_1 f_4 - d_1 d_4 f_2 f_3 - d_1 d_5 f_1 f_3 + d_2 d_4 f_1 f_3 + d_2 d_5 f_1 f_2 - d_1 d_4 f_2 f_4 - d_1 d_5 f_2 f_3 \\
& + d_2 d_4 f_1 f_4 + d_2 d_5 f_1 f_3 + d_4 d_5 f_1 f_2 + d_1 f_1 f_2 f_3 + d_1 f_1 f_2 f_4 - d_2 f_1 f_2 f_3 + d_1 f_1 f_3 f_4 - d_2 f_1 f_2 f_4 + d_1 f_2 f_3 f_4 - d_2 f_1 f_3 f_4 \\
& - d_4 f_1 f_2 f_3 - d_4 f_1 f_2 f_4 - d_5 f_1 f_2 f_3 + f_1 f_2 f_3 f_4
\end{aligned} \tag{11}$$

对(7)式进行化简处理得到式(12):

$$\begin{aligned}
l_4' &= \frac{k_{31} d_3 + b_{31}}{k_{32} d_3 + b_{32}} \\
&= \frac{\frac{k_{31}}{k_{32}} d_3 + \frac{b_{31}}{k_{32}}}{d_3 + \frac{b_{32}}{k_{32}}} \\
&= \frac{k_{33} d_3 + b_{33}}{d_3 + b_{34}} \\
&= k_{33} + \frac{b_{33} - k_{33} b_{34}}{d_3 + b_{34}} \\
&= k_{33} + \frac{b_{35}}{d_3 + b_{34}} ,
\end{aligned} \tag{12}$$

但存在实际的装调公差时， d_3 会变成 d_3' ，即次镜与三镜之间存在装调公差，大小为 $d_3' - d_3$ ，那么会导致 l_4' 的变化量为

$$\begin{aligned}
\Delta l_4' &= l_4'' - l_4' \\
&= b_{35} \times \left(\frac{1}{d_3' + b_{34}} - \frac{1}{d_3 + b_{34}} \right) \\
&= b_{35} \times \frac{(d_3 - d_3')}{(d_3' + b_{34})(d_3 + b_{34})} ,
\end{aligned} \tag{13}$$

l_4'' 是存在装调公差时，入瞳经过引力波望远镜系统在像空间所成的像——出瞳的位置。

其中 d_3 与 d_3' 之间存在关系。

$$\Delta d_3 = d_3' - d_3 , \tag{14}$$

将(13)进行整理，写成等效形式如：

$$\begin{aligned}
\Delta l_4' &= b_{35} \times \frac{\Delta d_3}{(d_3 + \Delta d_3 + b_{34})(d_3 + b_{34})} \\
&= \frac{-b_{35} \cdot \Delta d_3}{\Delta d_3(d_3 + b_{34}) + (d_3 + b_{34})^2} \\
&= \frac{\frac{-b_{35}}{d_3 + b_{34}} \cdot \Delta d_3}{\Delta d_3 + (d_3 + b_{34})} \\
&= \frac{-b_{36} \cdot \Delta d_3}{\Delta d_3 + (d_3 + b_{34})} \\
&= -b_{36} + \frac{b_{36}(d_3 + b_{34})}{\Delta d_3 + (d_3 + b_{34})} ,
\end{aligned} \tag{15}$$

(15) 是次镜三镜之间存在装调公差后，导致的出瞳位置的变化量。

由于 TTL 耦合噪声的计算公式为：

$$TTL = \frac{1}{2} d \alpha^2 , \tag{16}$$

对 TTL 耦合噪声的变化量的计算，得到等式

$$\begin{aligned}
\Delta TTL &= \frac{1}{2} \Delta l_4' \alpha^2 \\
&= \frac{1}{2} \alpha^2 \frac{-b_{36} \cdot \Delta d_3}{\Delta d_3 + (d_3 + b_{34})} ,
\end{aligned} \tag{17}$$

由于 d_3 远大于 Δd_3 ，对上述等式进行近似，最终得到等式

$$\Delta TTL = \frac{1}{2} \alpha^2 \frac{-b_{36} \cdot \Delta d_3}{(d_3 + b_{34})} , \tag{18}$$

仍然近似于一个抛物线分布，与模拟计算得到的 TTL 耦合噪声变化情况相符合。

4 结 论

通过对引力波望远镜的装调公差进行分析，建立起引力波望远镜的装调公差与 TTL 耦合噪声变化的联系，通过上述分析与讨论，得知引力波望远镜的 TTL 耦合噪声的敏感程度，对主次镜的距离敏感程度最高，是次镜与三镜距离敏感程度的 15.489 倍，是三镜与四镜距离敏感程度的 9.311 倍，并且主次镜之间由于位置误差引起的 TTL 耦合噪声可由次镜与三

镜的位置误差、三镜与四镜的位置误差引起的 TTL 耦合噪声局部抵消。所以实际对引力波望远镜进行装调时, 要着重考虑主次镜之间的距离公差, 其次考虑三四镜之间的距离公差, 最后保证次镜和三镜之间的位置公差。对引力波望远镜的装调误差与 TTL 耦合噪声的影响敏感程度进行分析, 可以对实际的引力波望远镜的装调过程进行指导。本文目前仅考虑装调公差对引力波望远镜的 TTL 耦合噪声的影响, 后续将讨论加工公差对 TTL 耦合噪声的影响, 进而指导引力波望远镜的加工和装调。

参考文献

- [1] Matthew P. Gravitational Wave Detection by Interferometry [D]. Britain: Scottish Universities Physics Alliance, 2011: 5-12.
- [2] Cattani C, De Maria M, *et al.* Conservation laws and gravitational waves in general relativity [J]. The attraction of gravitation: new studies in the history of general relativity, 1993, 5(1): 63-68.
- [3] Chen C M, James M, *et al.* A brief history of gravitational wave research [J]. Chinese Journal of Physics, 2016, 11(1): 1-28.
- [4] Shannon R, Jeffrey C, *et al.* Optical Telescope Design for a Space-based Gravitational-wave Mission [J]. Proc. of SPIE, 2014, 9143(28): 914314-1-914314-7.
- [5] Martin G, Thilo S, Dennis W, *et al.* A high sensitivity heterodyne interferometer as a possible optical readout for the lisa gravitational reference sensor and its application to technology verification [J]. Proc. of SPIE, 2017, 10566(12): 1056612-1-1056612-7.
- [6] A L Verlaan, H Hogenhuis, J Pijnenburg, *et al.* LISA Telescope Assembly Optical Stability Characterization for ESA [J]. Proc. of SPIE, 2013, 8450(3): 845003-1-845003-7.
- [7] M Trobs, S Schuster, M Lieser, *et al.* Reducing tilt-to-length coupling for the LISA test mass interferometer [J]. Classical and Quantum Gravity, 2018: 3(1): 1-24.
- [8] Gudrun W. Complex optical systems in space: numerical modelling of the heterodyne interferometry of LISA Pathfinder and LISA [D]. Germany: Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, 2010: 135-155.
- [9] J SanJuan, D Korytov, G Mueller, *et al.* [J]. Note: Silicon carbide telescope dimensional stability for space-based gravitational wave detectors, 2012, 83(11): 116107-1-116107-4.
- [10] Peter L Bender. Wavefront distortion and beam pointing for LISA [J]. Classical and Quantum Gravity, 2005, 22(3): 339-346.
- [11] Jean-Yves Vinet, Nelson Christensen, Nicoleta Dinu-Jaeger, *et al.* [J]. Classical and Quantum Gravity, 2019, 36(3): 1-17.
- [12] Jeffrey C Livas, Shannon Sankar. Optical telescope system-level design considerations for a space-based gravitational wave mission [J]. Proc. of SPIE, 2016, 9904(11): 99041-1-99041-12.
- [13] J Livas, S Sankar. Optical Telescope Design Study Results [J]. IPO Publishing, 2015, 10(1): 1-6.
- [14] Sanz, Astrid heske, Jeffrey C, Livas. Sankar. A telescope for LISA – the Laser Interferometer Space Antenna [J]. Adv. Opt. Techn., 2018,7(6): 395-400.
- [15] Sonke S. Investigation of the coupling between beam tilt and longitudinal pathlength signal in laser interferometers [D]. Germany: Leibniz Universität Hannover, 2013: 13-33.

- [16] 陈胜楠,姜会林,王春艳,等. 大倍率离轴无焦四反光学系统设计 [J]. 中国光学, 2020, 13(1): 179-189.
Chen S N, Jiang H Y, Wang C Y, et al. Design of off-axis four-mirror afocal optical system with high magnification[J]. Chinese Optics, 2020, 13(1): 179-189.
- [17] Sonke S. Tilt-to-length coupling and diffraction aspects in satellite interferometry [D]. Germany: Leibniz Universität Hannover, 2017: 1-4.
- [18] WANG Z, YU T, ZHAO Y, *et al.* Research on Telescope TTL Coupling Noise in Intersatellite Laser Interferometry [J]. PHOTONIC SENSORS, 2019, 8(1): 1-10.
- [19] 郁道银, 谈恒英. 工程光学[M]. 第3版. 北京:机械工业出版社, 2012: 9-39.
YU D Y, Tan H Y. Engineering Optics [M]. 3th ed. Beijing: China Machine Press, 2012: 9-39.



Research on the Influence of the Adjustment Error of the Gravitational Wave Telescope on the TTL Noise

Cui Xinxu¹, Fang Chao¹, Wang Zhi^{1*}

¹ *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences ChangChun, 130033, JinLin China*

Abstract

Objective The influence of the adjustment error of the gravitational wave telescope on the TTL coupling noise of the telescope is studied. Since the TTL coupling noise is the second largest noise source, during the actual engineering process of the gravitational wave telescope, the installation and adjustment will have an impact on the TTL coupling noise, but there is little correlation between the installation and adjustment of the telescope and the TTL coupling noise. Therefore, the research on the relationship between the telescope's setup tolerance and TTL coupling noise is very important for the engineering of gravitational wave telescopes, and how the gravitational wave telescope's setup tolerance will affect the TTL coupling noise determines the final gravitational wave telescope Whether it meets the requirements for use, the research results can guide the installation and adjustment of the gravitational wave telescope.

Methods In this paper, by simulating and designing a gravitational wave telescope that meets the requirements of the wave-front difference index, calculating the TTL coupling noise of the designed gravitational wave telescope, and analyzing the influence of the telescope's installation and adjustment tolerance on the TTL coupling noise, it is possible to judge the process of installing and adjusting the gravitational wave telescope. Adjustment error variable sensitive to TTL coupled noise. By controlling the variable method, keeping other parameters unchanged, only assigning a certain adjustment tolerance in the gravitational wave telescope, and simulating and analyzing the influence of a certain adjustment tolerance in the gravitational wave telescope on the change of the exit pupil position, and then calculating the laser when the interference signal passes through the laser interferometer and finally interferes on the four-quadrant detector, the variation of the TTL coupling noise due to the installation and adjustment tolerance of the gravitational wave telescope. The relationship between the TTL coupling noise of the intersatellite laser interferometry system and the sensitivity of the telescope installation and adjustment tolerance is established, and the requirement of the TTL coupling noise is used as the criterion to establish the model relationship between the installation and adjustment tolerance item and the change of the TTL coupling noise.

Results and Discussions Through comparison, it is found that the distance tolerance between the primary mirror and the secondary mirror of the gravitational wave telescope has more influence on the TTL coupling noise of the gravitational wave telescope than the distance tolerance between other optical elements has on the TTL coupling noise. The change in TTL coupling noise due to the distance tolerance between the primary and secondary mirrors is opposite in sign to the change in TTL coupling noise due to the distance tolerance between the secondary and third mirrors, and between the third and fourth mirrors; The adjustment tolerance

of the distance between the diaphragm and the primary mirror has little effect on the variation of the TTL coupling noise and can be ignored. The variation of the TTL coupling noise caused by the distance adjustment tolerance of each optical element and the jitter angle are distributed in a parabolic law. Through the analysis of the installation and adjustment tolerance of the gravitational wave telescope, the analysis of the installation and adjustment tolerance of the gravitational wave telescope and the change of TTL coupling noise is established. Through the above analysis and discussion, the sensitivity of the TTL coupling noise of the gravitational wave telescope is known. The primary and secondary distance sensitivity of the mirror is the highest, which is 15.489 times the sensitivity of the secondary mirror and the third mirror, and 9.311 times the sensitivity of the third mirror and the fourth mirror. And the TTL coupling noise caused by the position error between the primary and secondary mirrors can be reduced by the secondary mirror and the third mirror. And the TTL coupling noise caused by the position error between the primary and secondary mirrors can be reduced by the position error between the third mirror and the fourth mirror.

Conclusions When adjusting the space gravitational wave telescope, we should focus on controlling the distance error between the primary mirror and the secondary mirror. And the TTL coupling noise caused by the distance adjustment error between the secondary mirror and the third mirror, and the distance adjustment error between the third mirror and the fourth mirror can be used to partially offset the TTL coupling caused by the distance error between the primary mirror and the secondary mirror noise. When actually installing and adjusting the gravitational wave telescope, the distance tolerance between the primary and secondary mirrors should be considered firstly, then the distance tolerance between the third and fourth mirrors should be considered, and finally the position tolerance between the secondary mirror and the third mirror should be guaranteed. Through the analysis of this paper, the sensitivity of the installation and adjustment tolerance of the gravitational wave telescope to the influence of the TTL coupling noise is analyzed, which can guide the actual installation and adjustment process of the gravitational wave telescope. At present, this paper only considers the influence of installation and adjustment tolerances on the TTL coupling noise of gravitational wave telescopes, and the influence of processing tolerances on TTL coupling noises will be discussed later, so as to guide the processing and installation of gravitational wave telescopes.

Key words optics; gravitational waves; interferometry; telescopes; adjustment tolerances;

网络首发:

标题: 引力波望远镜的装调误差对TTL噪声的影响研究

作者: 崔新旭, 方超, 王智

收稿日期: 2023-03-14

录用日期: 2023-04-17

DOI: 10.3788/AOS230675

引用格式:

崔新旭, 方超, 王智. 引力波望远镜的装调误差对TTL噪声的影响研究[J]. 光学学报, 2023, 43(19): 1912001.

网络首发文章内容与正式出版的有细微差别, 请以正式出版文件为准!

您感兴趣的其他相关论文:

空间引力波望远镜远场相位噪声抑制方法

陈胜楠 王春艳 孙浩 姜会林

长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130033

光学学报, 2023, 43(6): 0636001

基于1.2 m望远镜系统实时自动调焦的清晰度评价算法

杨梦雪 李祝莲 李荣旺 李语强

中国科学院云南天文台, 云南 昆明 650216

光学学报, 2023, 43(6): 0612006

抑制移相干涉仪中相干噪声的多模光纤扩展光源研究

胡晨辉 陈磊 黄晨 马致遥 钱月 张喆 李若琨 郑东晖

南京理工大学电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094

光学学报, 2022, 42(19): 1906001

偏振态对涡旋光束拓扑荷识别的影响

邢昊 罗清 蔡和 许凌飞 安国斐 杨蛟 房瑞娜 王卫江 黄云 任天荣 王淑

西南技术物理研究所, 四川 成都 610041

光学学报, 2022, 42(17): 1726001

基于空间调制的星体观测张角强度关联干涉测量

谈志杰 尹少齐 喻虹 陆荣华 韩申生

中国科学院上海光学精密机械研究所量子光学重点实验室, 上海 201800

光学学报, 2022, 42(7): 0712005