

光电工程

Opto-Electronic Engineering

中文核心期刊 中国科技核心期刊
Scopus CSCD

空间引力波望远镜内部光场计算方法研究

刘烨, 华喆, 彭韶婧, 吴兰, 刘东, 刘崇

引用本文:

刘烨, 华喆, 彭韶婧, 等. 空间引力波望远镜内部光场计算方法研究[J]. 光电工程, 2023, 50(11): 230186.

Liu Y, Hua Z Y, Peng S J, et al. Research on optical field calculation methods in the space gravitational wave telescope[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, 50(11): 230186.

<https://doi.org/10.12086/oe.2023.230186>

收稿日期: 2023-07-26; 修改日期: 2023-11-14; 录用日期: 2023-11-15

相关论文

微结构薄膜望远镜研究进展分析

杨伟, 吴时彬, 汪利华, 范斌, 罗先刚, 杨虎

光电工程 2017, 44(5): 475 doi: 10.3969/j.issn.1003-501X.2017.05.001

大矢高凸柱面的超精密车削轨迹计算方法研究

雷茸粮, 李云, 林妮媚, 张帅, 青建宏, 唐林峰

光电工程 2021, 48(3): 200192 doi: 10.12086/oe.2021.200192

利用超大视场光电望远镜观测GEO中的目标识别方法

罗浩, 毛银盾, 于涌, 唐正宏

光电工程 2017, 44(4): 418 doi: 10.3969/j.issn.1003-501X.2017.04.006

望远镜光学结构对自适应光学校正能力的影响分析

高洋, 魏凯, 张雨东

光电工程 2017, 44(6): 593 doi: 10.3969/j.issn.1003-501X.2017.06.004

更多相关论文见光电期刊集群网站 



光电工程
Opto-Electronic Engineering

<http://cn.ojournal.org/oe>



OE_Journal

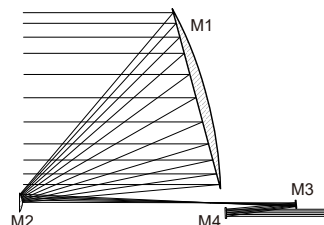


Website

DOI: 10.12086/oe.2023.230186

空间引力波望远镜内部光场计算方法研究

刘 烨, 华喆, 彭韶婧, 吴 兰, 刘 东, 刘 崇*

浙江大学 光电科学与工程学院 现代光学仪器国家重点实验室,
浙江 杭州 310027

摘要: 在空间引力波探测系统中, 望远镜系统出瞳处的复振幅光场分布仿真准确性密切影响着干涉测量的准确性和 TTL 噪声控制分析有效性, 因此对其内部光场传输进行高精度衍射仿真计算十分必要。本文论证了采用基于矢量光线追迹的衍射积分算法建立仿真算法的必要性, 结合离轴无焦四反望远镜模型进行了算法流程说明。基于该算法建立了仿真程序, 带入望远镜系统设计参数, 进行了波前计算精度的验证, 并展示了矢量光场仿真计算结果。基于该系统模型, 对输入高斯光场参数、元件表面复折射率两个因素对输出光场矢量特性带来的影响进行了仿真讨论。

关键词: 空间引力波望远镜; 矢量光场仿真; 矢量衍射理论; 矢量光线追迹

中图分类号: O436; TH743

文献标志码: A

刘烨, 华喆, 彭韶婧, 等. 空间引力波望远镜内部光场计算方法研究 [J]. 光电工程, 2023, 50(11): 230186

Liu Y, Hua Z Y, Peng S J, et al. Research on optical field calculation methods in the space gravitational wave telescope[J].

Opto-Electron Eng, 2023, 50(11): 230186

Research on optical field calculation methods in the space gravitational wave telescope

Liu Ye, Hua Zheyi, Peng Shaojing, Wu Lan, Liu Dong, Liu Chong*

State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, College of Optical Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China

Abstract: In the space gravitational wave detection system, the accuracy of the complex amplitude field distribution simulation at the telescope exit pupil closely affects the accuracy of the interferometric measurement and impacts the effectiveness of TTL noise control analysis. Therefore, it is necessary to carry out the high-precision diffraction calculation for the field propagation. This paper demonstrates the necessity of the vectorial ray-based diffraction integral algorithm for simulation and illustrates the algorithm flow combining the telescope model. A computational model was established based on the algorithm. The telescope system parameters were substituted to verify the wavefront calculation accuracy, and the vectorial field simulation results were presented. Based on the system model, the effects of the input Gaussian field parameters and the complex refractive index on the output vectorial optical field characteristics are simulated.

Keywords: space gravitational wave telescope; vectorial optical field simulation; vectorial diffraction theory; vectorial ray tracing

收稿日期: 2023-07-26; 修回日期: 2023-11-14; 录用日期: 2023-11-15

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2021YFC2202001)

*通信作者: 刘崇, chongliu@zju.edu.cn。

版权所有©2023 中国科学院光电技术研究所

1 引言

引力波是物质与能量剧烈运动和变化所产生的一种物质波, 承载了引力相互作用的基本自由度。1916年, 爱因斯坦基于广义相对论预言了引力波的存在^[1], 此后一系列引力波探测与研究为揭示宇宙演化、基础物理学规律提供了新的途径。美国激光干涉引力波天文台 LIGO 于 2016 年首次报道探测到了双黑洞合并引力波^[2], 其基于臂长数公里的迈克耳逊干涉仪, 当引力波经过时探测器周围的空间发生扰动, 导致空间在一个方向上拉伸而在另一个方向上压缩, 两束干涉光走过的路程产生细微的差异, 反映在干涉强度上, 通过解调相位信息的变化进行探测。宇宙中存在大量引力波源, 覆盖了 10^{-18} Hz 到 10^4 Hz 极为宽阔的频段, 然而受地表震动、噪声以及干涉臂长的限制, 大多数地面引力波探测项目仅能探测到 10 Hz 以上频段。20 世纪 90 年代以来, 空间引力波探测计划使得探测 0.1 mHz~1 Hz 频段丰富的引力波源成为可能^[3]。其采用外差干涉测量技术, 由 3 颗相同卫星组成非独立的夹角为 60° 的迈克尔逊干涉仪, 如图 1 所示, 测量间距百万公里级别的两自由悬浮测试质量

间 10 pm 量级的变化量^[4]。国际上, 欧洲空间局 (ESA) 的激光干涉空间天线 LISA 计划已于 2015 年将关键技术验证卫星 LISA-Pathfinder 送上太空, 展示了惊人的性能^[5]; 国内则有由中山大学牵头发起的“天琴计划”^[6]和由中国科学院与欧洲航天局合作发起的“太极计划”^[7]。

在空间引力波探测计划中, 引力波望远镜是激光干涉测量系统的重要组成部分, 起到激光信号收发与扩缩束的作用, 它由多个复杂光学表面构成, 不同于传统的几何成像望远镜, 除了具备大倍率、高像质、杂光抑制能力强、波前误差一致性好的一系列技术要求外, 其波前质量及稳定性直接影响收发信号的强度及相位分布, 从而影响引力波信号的解算精度, 因而有着 pm 量级的光程稳定性及苛刻的杂散光要求^[8]。以 LISA 项目为例, 其设计的望远镜系统采用离轴无焦四反系统结构, 如图 2 所示。其中主镜 M1 是离轴抛物面, 次镜 M2 为离轴双曲面, 后面的三镜 M3 和四镜 M4 为平面或球面, 系统在 M2 和 M3 之间设计有一次像面, 在此位置设置消杂光光阑可以有效抑制杂散光^[9]。

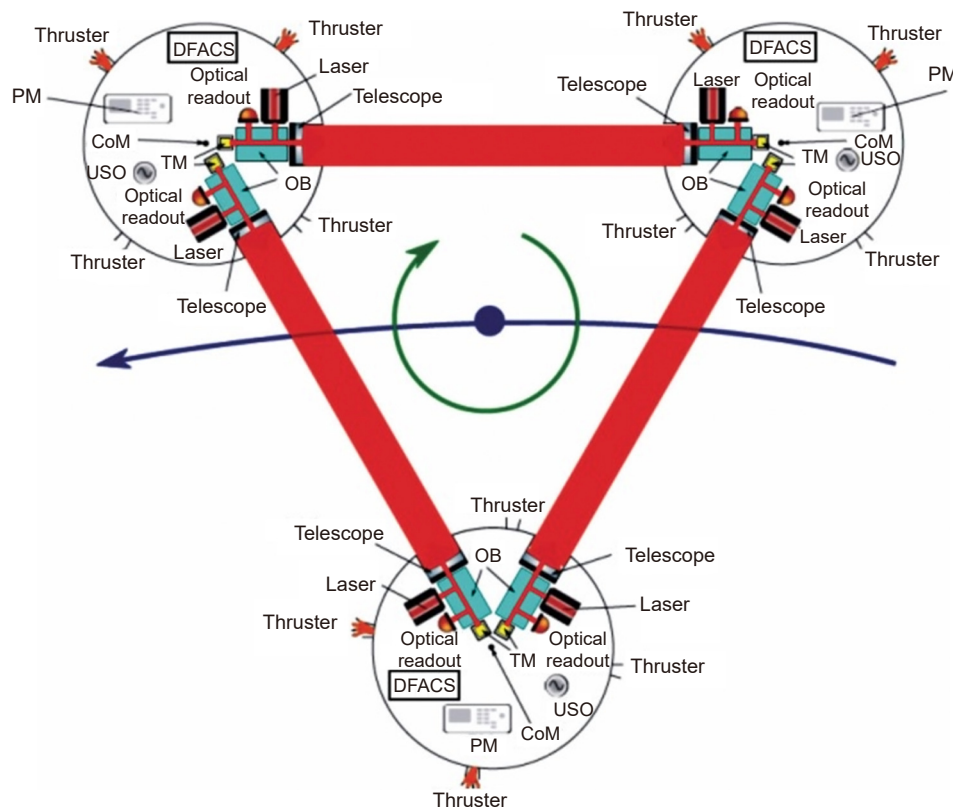
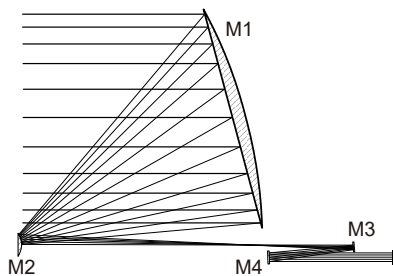


图 1 空间引力波探测系统示意图^[4]

Fig. 1 Schematic diagram of the space gravitational wave detector^[4]

图2 引力波望远镜光学结构示意图^[9]Fig. 2 Schematic diagram of the optical structure of the gravitational wave telescope^[9]

在激光信号发射端, 望远镜系统将高斯光场进行扩束中继, 出瞳处的近场复振幅光场信息作为超长空间链路的输入, 若不考虑光场的矢量特性导致出瞳处相位、振幅分布计算产生误差, 会对接收端远场振幅、波前与光程稳定性的仿真产生影响, 降低远场波前指标评价合理性。在接收端, 望远镜出瞳波前误差与抖动光程 (tilt-to-length, TTL) 噪声耦合, 成为探测系统第二大噪声源。为控制噪声需采用复振幅计算相位信息^[8], 对望远镜波前误差与光束抖动角耦合关系进行研究。若该仿真过程存在误差, 会对噪声控制产生影响, 劣化干涉测距解算稳定性, 反过来影响系统设计指标分解有效性。

尽管基于几何光学仿真的光学设计已经可以将引力波望远镜系统的设计波前质量与全视场波前稳定性优化至低于 1/30 波长 RMS^[9], 现阶段的光学设计并未考虑激光作为高斯光束在光学系统中的光场传输特性。从物理光学角度出发, 光阑尺寸与位置、各元件结构与表面参数等都会影响光场衍射传输过程, 不同性质的激光光束甚至不同参数高斯光场经过特定系统传输后的其特性也会有所不同^[10]。特别地, 由于偏振光场的矢量特性和离轴光学系统非近轴传播特点, 望远镜出瞳处偏振光场的相位分布会呈现与几何光学的波前分布不同的特点, 复振幅光场更携带了几何光学没有的信息。因此更应考虑真实边界条件对于光场作用, 采用严格的矢量衍射计算, 使仿真贴合物理情形。

本文论述了在空间引力波望远镜系统仿真需求中进行严格矢量衍射光场传输计算的必要性, 基于矢量光线追迹衍射积分算法 (vectorial ray-based diffraction integral, VRBDI) 建立了矢量光场衍射仿真计算程序, 将一离轴无焦四反空间望远镜设计参数作为模型, 对程序波前计算精度进行了验证, 展示了光场仿真计算

结果。基于该系统模型, 对输入高斯光场参数、元件表面复折射率两个因素可能对输出光场矢量特性带来的影响进行了仿真讨论。

2 引力波望远镜光场衍射算法与模型

在空间超长链路激光干涉测量系统中, 望远镜系统出瞳处的复振幅光场及其相位、光程稳定性密切影响着耦合进入接收端干涉系统的远场波前振幅与 TTL 噪声控制水平, 进而影响干涉测量的准确性和系统指标分解有效性。因而对于高斯光束在望远镜系统内部的衍射传输过程, 使用高精度、全接口的算法进行精密的光场仿真分析非常必要。本章通过讨论不同衍射理论适用范围及其局限性, 说明了在空间引力波望远镜系统仿真场景中基于偏振光线追迹进行严格矢量衍射光场传输计算的必要性, 论述了 VRBDI 算法的可行性, 结合望远镜系统进行了算法具体流程的阐述。

2.1 不同衍射理论适用范围与局限性

对于像差光学系统, 根据是否考虑光场矢量特性, 其光场传输算法可分为标量与矢量衍射理论。对于矢量衍射理论, 根据系统复杂度、元件类型、计算精度要求等可细分更多的具体算法。在一定的条件下, 标量衍射理论可用于某些简单光学系统的设计和分析。然而当傍轴近似条件失效时, 与近轴标量衍射理论相比, 矢量衍射理论显然更为严格, 它考虑了偏振与非近轴传播, 是研究具有高数值孔径、离轴系统或使用特定偏振的光学系统的理论基础^[11], 例如光刻系统、激光直写系统、自适应光学等领域。

矢量衍射积分计算需要被积分面 (如出瞳) 的边界和光场信息, 对于简单的聚焦光学系统, 可以基于几何参数近似计算边界场参数, 例如基于 Debye 近似的 Richards-Wolf 矢量衍射理论^[12] 等。然而对于光束传播过程中会经过离轴、偏振化表面的系统, 其具体光场的边界信息需要通过光线追迹得到。Foreman 等采用 3×3 琼斯矩阵三维偏振光线追迹^[13] 的方法进行矢量衍射计算, 对于一些简单的光学系统, 例如平面镜、棱镜式折反系统等^[14], 它能够不进行完善的光线追迹从而简单地实现对瞳孔处的光场有效计算^[15]。然而对于复杂光学系统, 这种方法缺少对于每个特定光束在具体边界处的角度、符号等信息, 会导致计算不准确。Denis 等在 Richards-Wolf 积分形式上进行了扩展, 研究了任意形状旋转对称曲面的非近轴聚焦精确

矢量模型^[16]。但其建立在光瞳坐标系下, 对于光场与元件形状参数非旋转对称的离轴系统, 该方法不能准确表征每个矢量光场分量在特定表面上的作用情况。表 1 总结了不同衍射理论适用范围与各自局限性。

作为对于光瞳处矢量光场分布有高精度解算需求的空间望远镜系统, 其并非经典聚焦成像系统, 且元件具多种面型, 没有统一的衍射计算解析表达式。其次作为非旋转对称的离轴系统, 处理过程中不能使用旋转对称系统常用的柱坐标系, 对于不同空间位置光场或元件需要基于直角坐标系进行处理。因而, 将严格的三维直角坐标系下偏振矩阵光学与高精度矢量衍射积分计算结合, 进行系统内部矢量光场传输的精确计算十分必要。

2.2 望远镜系统模型算法流程

综合上节分析, 基于矢量光线追迹的衍射积分 (VRBDI) 算法^[17-19]是一种适用于空间引力波望远镜系统内部矢量光场衍射传输计算的方法。VRBDI 考虑了系统各元件的精确几何形状、边界参数以及输入矢量电磁场等多参量接口, 能够模拟复杂光学系统内部矢量偏振光场非傍轴传播过程。该算法以偏振矩阵光学和矢量射线追迹为基础, 将输入平面上的单色连续波电磁场进行平面波分解, 用一个同时包含几何特性与偏振特性的三维偏振射线矩阵表征一个矢量平面波分量, 进而对光线与场分量通过整个光学系统进行序列的跟踪计算, 最后在设置的输出平面上进行分量复振幅场的合成, 从而实现光学系统内部矢量光场衍射传播的仿真分析。

将 VRBDI 算法应用于空间引力波望远镜中, 仿真矢量光场经过整个光学系统衍射传输过程, 最终得到输出探测面上的矢量光场分布, 如图 3 所示。

首先在输入面上对于输入矢量光场进行傅里叶变

换, 得到各角谱平面波分量, 对于各个分量在输入面上进行采样, 得到具有几何光线信息和光场复振幅信息的微分光矢量矩阵。在经过了坐标变换的各局部坐标系下建立对应元件与探测面, 根据序列光线追迹原理, 对每个光矢量分量进行从输入面到 M1 反射面的几何追迹, 在 M1 反射面边界上进行光矢量计算, 得到与边界作用后的光矢量分量。依据系统 M1、M2、M3、M4 元件次序, 在各个界面间进行光线追迹和光矢量迭代计算, 最终在输出探测面上进行各角谱分量的衍射积分合成, 得到输出面上矢量光场分布。

3 望远镜系统模型光场仿真

基于 VRBDI 算法编写了仿真程序, 建立了光学系统内部严格矢量光场衍射传输计算模型。该模型输入量有输入面和探测面全局坐标、输入矢量光场、系统参数、各元件参数等, 输出量为探测面矢量光场复振幅。本章将空间引力波望远镜系统设计参数输入仿真模型, 进行了理想设计波前的计算验证与光场仿真计算。

3.1 空间望远镜光学设计结构

结合空间引力波望远镜的设计要求, 在商用光学设计仿真软件 ZEMAX 中设计并优化了缩束比 1: 100, 入瞳直径 300 mm 的四镜离轴无焦系统, 如图 4 所示。考虑到空间望远镜光机结构与杂散光抑制等要求, 口径 300 mm 的光阑设置于主镜 M1 前 100 mm 处。获取各系统参数与元件参数输入仿真程序, 将其作为波前与衍射光场仿真模型, 主要参数如表 2 所示。

由于空间望远镜光学系统设计与优化传统逻辑为主镜开始至次镜再到 M3、M4, 设计得到的为接收望远镜端光学结构, 第二节涉及的仿真内容主要为针对

表 1 不同衍射理论适用范围与局限性
Table 1 Application scope and limitations of different diffraction theories

计算方法	应用范围	局限性
标量衍射理论	一般非偏振、小NA成像系统	不能表征矢量偏振特性
经典Richards-Wolf矢量衍射理论	大NA系统焦平面附近半解析矢量场	理想球面波聚焦, 强像差不适用, 德拜近似精度受限
Rayleigh-Sommerfeld矢量衍射理论	大NA紧聚焦系统焦平面场、二元衍射元件聚焦场、离轴光束非近轴传输等	计算量大, 泛用性低
基于3×3偏振矩阵追迹的矢量衍射理论	近轴薄元件偏振系统、平面偏振系统等	处理光场与边界作用时忽略了面形随位置变化
扩展Richards-Wolf积分的光线追踪矢量衍射理论	任意形状旋转对称曲面的非近轴聚焦	不能表征非旋转对称元件、离轴系统

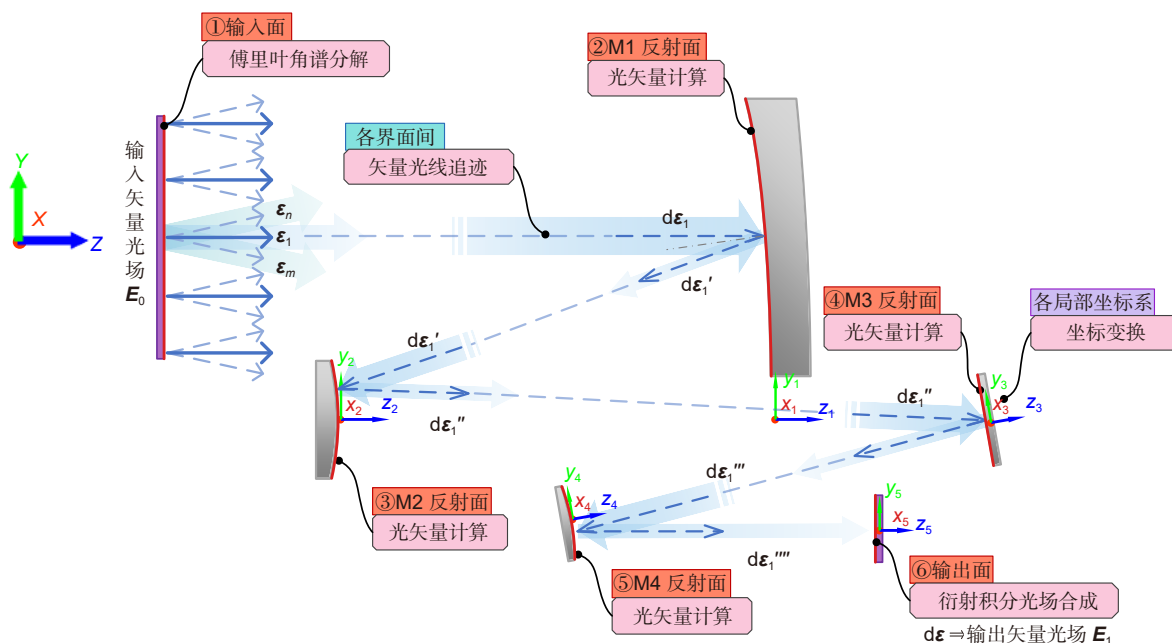


图 3 引力波望远镜系统模型算法流程示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the algorithm flow of the gravitational wave telescope system model

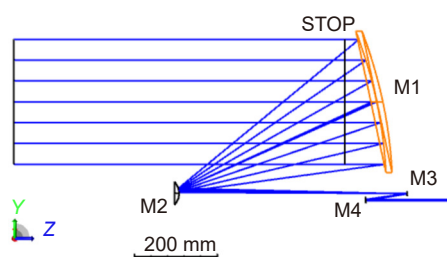


图 4 望远镜系统结构示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the telescope system structure

表 2 望远镜系统主要参数

Table 2 Main parameters of the telescope system

系统参数	数值
波长	1064 nm
孔径	300 mm
缩束比	0.01
面型	M1:离轴抛物面 M2:双曲面 M3:平面 M4:球面

发射望远镜进行光场仿真与计算, 因此在程序中首先进行系统倒置处理, 得到发射望远镜系统结构, 再进行后续的仿真计算。

3.2 波前与光场仿真计算

在 0 度视场下对于倒置望远镜系统进行光程数据

的计算, 得到光程数据可作为系统波前的参考。在商用光学设计软件 ZEMAX 中通过接口批量调用操作数, 以获取内置程序计算得到的光线数据, 将其作为光程计算数据的参考, 对光场计算程序的波前计算精度进行验证。图 5(a-c) 分别为全局坐标出瞳位置下光程仿真程序计算、ZEMAX 光程计算结果、两者作差的 xy 二维伪彩图, 其中图 5(a)、5(b) 共用颜色坐标。

比较两个光程数据分布图, 其分布一致, 作为波前分布计算 PV 值为 0.0214 λ , RMS 值为 0.00496 λ 。从作差图看, 两者差值在 10^{-6} pm 量级, 验证了光场仿真模型程序的光程计算精度。

将高斯光束光场作为输入经过望远镜系统得到光场输出, 展示仿真程序计算有效性。设置束腰半径 1 mm, 束腰位置处于输入面上的 X 线偏高斯光场, 在设计出瞳位置即输出面进行 400 mm $\times$ 400 mm 尺寸的光场探测。图 6 为输入面高斯光场强度分布, 图 7 为仿真计算得到经过发射望远镜系统的输出面矢量光场分布结果。

在图 7(c) 中, X 偏振分量相位分布图区别于波前, 单位采用弧度 (rad), 进行比较可以发现 X 偏振分量相位分布与出瞳光程数据计算的波前分布趋势大致相同, 振幅基本符合经过系统截断后高斯光场的振幅分布形式。计算相位分布图 PV 值与 RMS 值分别为 0.1320 rad 和 0.0302 rad, 对应到波长值为 0.0210 λ 和

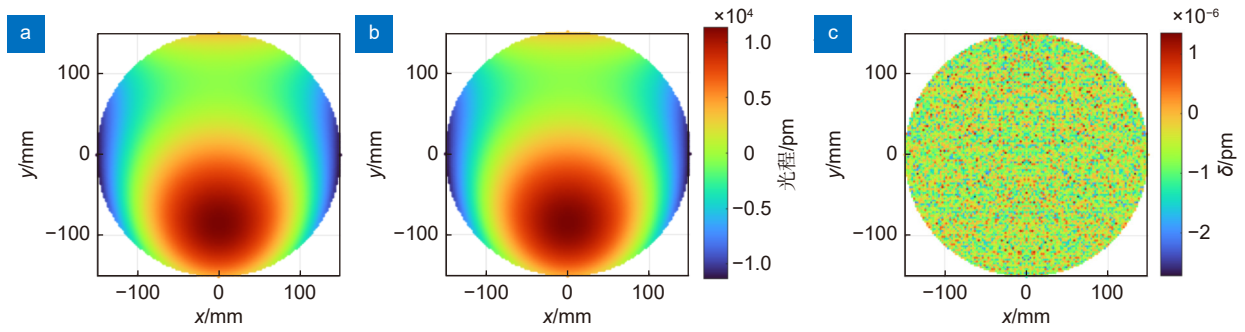


图5 零视场下发射望远镜在出瞳光程数据。(a) 光场仿真程序计算结果;
(b) 仿真软件 ZEMAX 光程计算结果; (c) 两者作差

Fig. 5 Optical path data at the exit pupil of the transmitting telescope at the 0 degree field angle. (a) Calculation results of the optical field simulation model; (b) Calculation results of the simulation software ZEMAX; (c) The difference between (a) and (b)

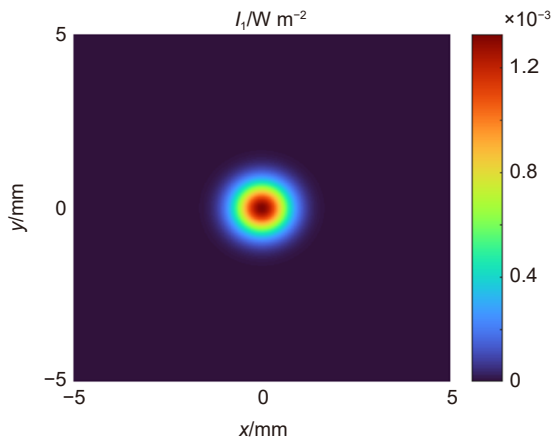


图6 输入面光强分布图

Fig. 6 Intensity distribution map on the input surface

0.0048 λ , 相比使用几何光线追迹得到的波前分布结果略微降低。从光场分解角度看, 几何光线追迹等效于单个理想平面波, 而高斯光场在入射面上将分解为发散的多个平面波组合, 该光学系统设计并非理想无光焦度, 实际上存在微小的正光焦度。对于高斯光场情况, 其发散降低了系统对光束的会聚作用, 使其相

位分布相比理想几何光线追迹产生变化。

4 光场矢量特性仿真影响

上一章基于空间引力波望远镜, 进行了特定参数、理想 X 线偏高斯光场输入下输出复振幅光场的仿真。但在实际工程环境中, 激光器性能、前置系统稳定性、环境动态变化等因素都会导致输入光场具体分布发生变化, 进而影响输出光场复振幅。对矢量光场进行完善仿真需考虑各偏振光场分量, 当光场与系统作用的边界条件发生变化时, 特别的, 不同元件材料对应表面复折射率有所区别, 出射光场的矢量特性也将产生相应变化。本章基于系统仿真模型对于以上两方面进行了讨论, 仿真了高斯光场参数变化对发射望远镜出射光场振幅和相位分布影响, 并以表面材料金属铝为例比较了其理想反射情况下出射光场 XY 偏振相位分布的变化。

4.1 输入高斯光场参数对发射望远镜出射光场影响

在实际工程中, 激光高斯光束作为发射望远镜的

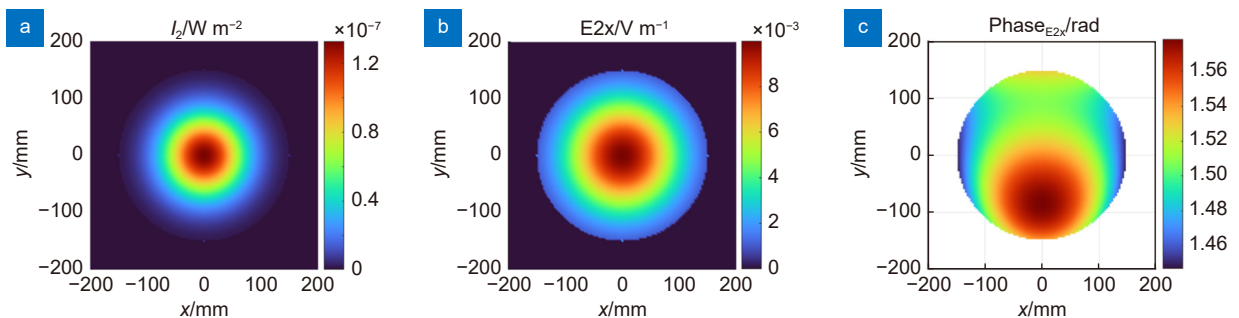


图7 仿真计算输出面矢量光场分布。(a) 光强分布图; (b) X 偏振分量振幅分布图; (c) X 偏振分量相位分布图

Fig. 7 Vectorial optical field distributions on the output surface of simulation calculation. (a) Intensity distribution map; (b) X polarization component amplitude distribution map; (c) X polarization component phase distribution map

入射光场, 其参数可能存在不确定性, 随环境温度等也可能发生动态变化, 出射光场也会因此产生一定变化。利用仿真系统模型, 改变输入二维高斯光场的参数, 仿真该情形下出射光场变化及其规律。在定义输入二维高斯光场时, 两个重要的参数为高斯束腰半径 ω_0 和束腰距离 z_w , 束腰半径定义了光束的光斑尺寸大小, 束腰距离为束腰位置到输入面的距离, $z_w = 0$ 时代表束腰恰好处于输入面上, 正值代表在输入面上是发散光束, 负值则代表聚焦。

在输入面上设置 X 线偏、峰值振幅归一化高斯光场, 对于 3 mm 输入口径的发射望远镜系统, 分别进行两组情况仿真。设置束腰半径为 1 mm 不变时, 对束腰距离从 -80 mm 至 200 mm 进行 8 组等间距采样, 仿真得到输出光场振幅和相位分布随束腰距离变化, 如图 8、图 9 所示。设置束腰距离为 200 mm 不变时, 对束腰半径从 0.8 mm 到 2.2 mm 进行 8 组等间距采样,

仿真得到输出光场振幅和相位分布随束腰距离变化, 如图 10、图 11 所示。

比较束腰半径为 1 mm 不变时输出光场随束腰距离变化, 其振幅分布符合高斯光束被光阑截断后分布规律且变化较小, 相位分布发生较明显变化。从数值统计上看, 相位分布 PV 值和 RMS 值随束腰距离数值增大而增大, 对应到波长值, 束腰距离 $z_w = -80$ mm 时 PV 为 0.0157λ 、RMS 为 0.0041λ , 束腰距离 $z_w = 200$ mm 时 PV 为 0.0416λ 、RMS 为 0.0100λ 。将其作为波前分布考虑变化规律, 可以使用低阶 Zernike 多项式进行拟合, 发现其明显变化项为 Z5(离焦) 项系数。做出其曲线变化图如图 12(a) 所示, Z5 项系数绝对值随束腰距离数值等间距增大而增大, 且在仿真范围内近乎呈线性, 其中 Z5 项分布形式如图 12(c) 所示。

比较束腰距离为 200 mm 不变时输出光场随束腰

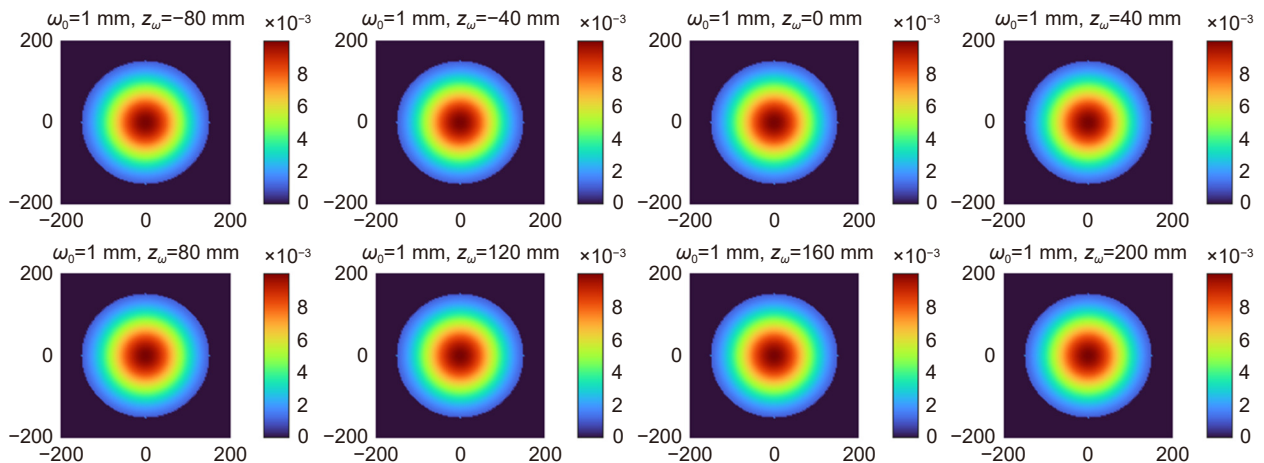


图 8 输出光场振幅分布随束腰距离变化 (单位: V/m)

Fig. 8 The amplitude distributions of the output field change with the waist distance (unit: V/m)

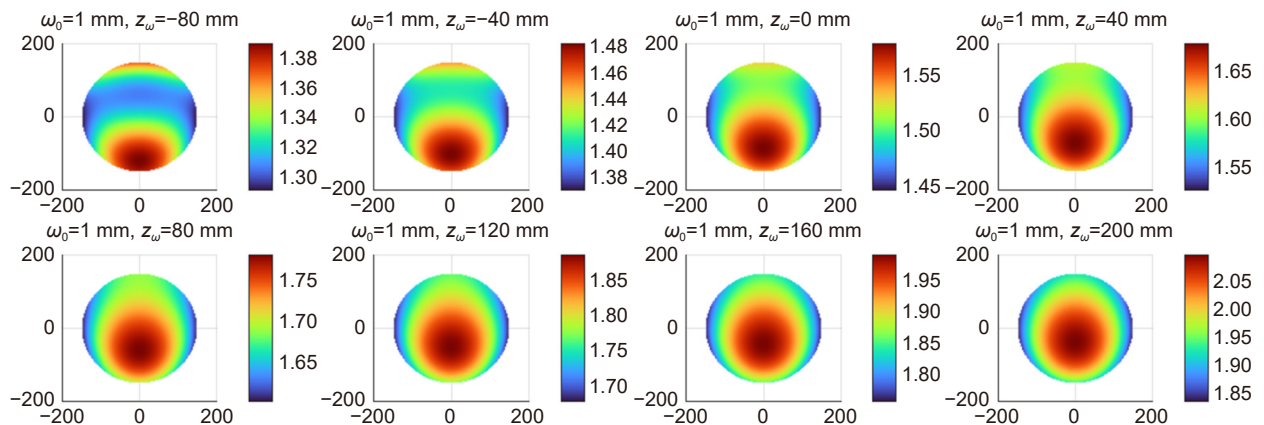


图 9 输出光场相位分布随束腰距离变化 (单位: rad)

Fig. 9 The phase distributions of the output field change with the waist distance (unit: rad)

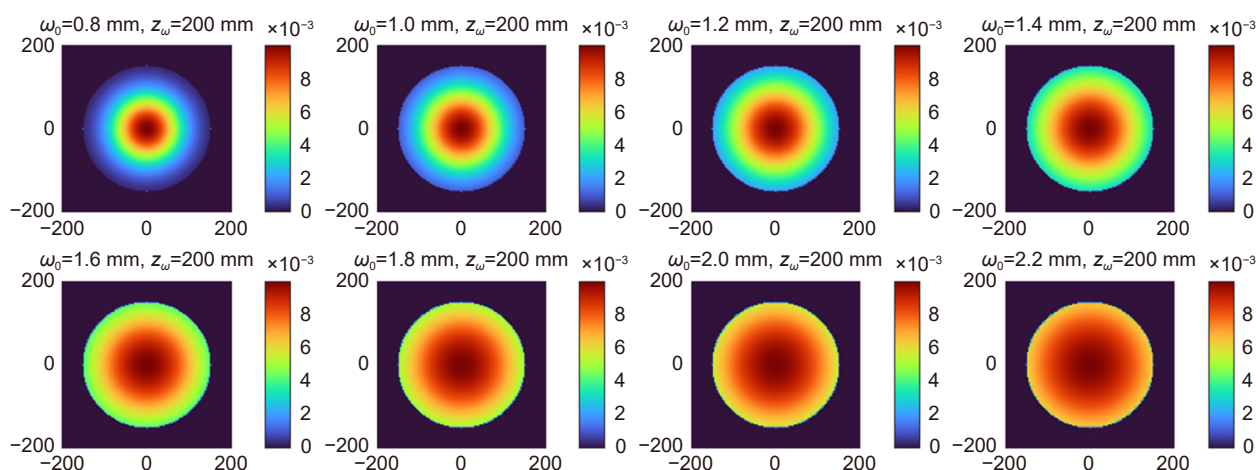


图 10 输出光场振幅分布随束腰半径变化 (单位: V/m)

Fig. 10 The amplitude distributions of the output field change with the waist radius (unit: V/m)

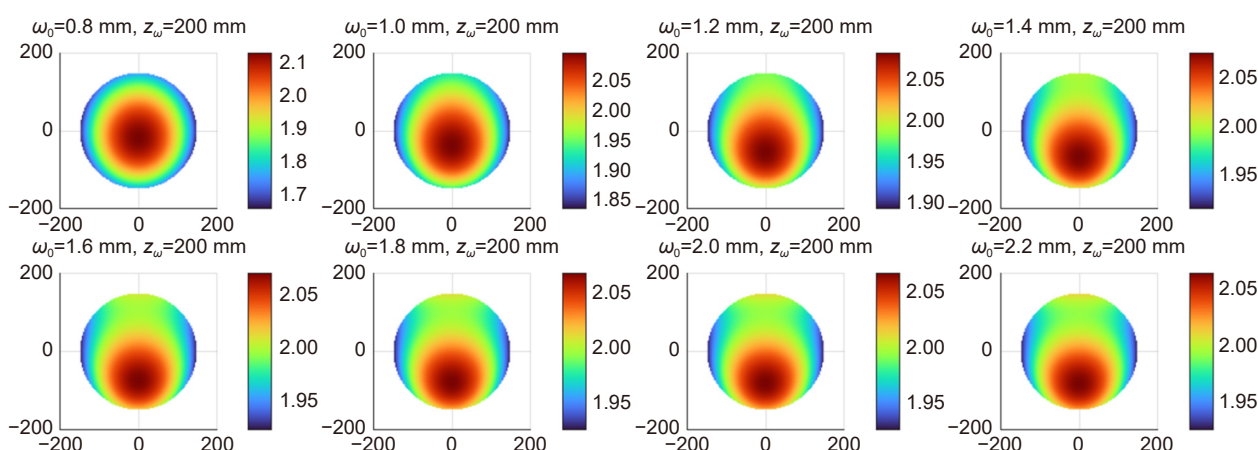


图 11 输出光场相位分布随束腰半径变化 (单位: rad)

Fig. 11 The phase distributions of the output field change with the waist radius (unit: rad)

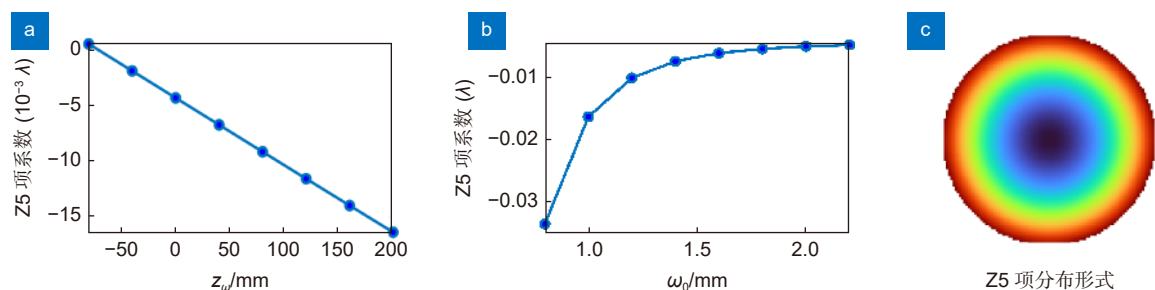


图 12 Z5 项系数变化。(a) 相位分布中 Z5 项系数随束腰距离变化;

(b) 相位分布中 Z5 项系数随束腰半径变化; (c) Z5(离焦)项分布形式

Fig. 12 The changes of Z5 coefficient. (a) Z5 coefficient in the phase distribution changes with the waist distance;

(b) Z5 coefficient in the phase distribution changes with the waist radius. (c) Z5 (defocus) term distribution form

半径变化, 其振幅分布符合高斯光束被光阑截断后分布, 且随着束腰半径增大, 经过系统传输后保留的能量比值逐渐降低。从数值统计上看, 相位分布 PV 值和 RMS 值随束腰半径值增大而减小, 对应到波长值, 束腰半径 $\omega_0 = 0.8 \text{ mm}$ 时 PV 为 0.0750λ 、RMS 为 0.0198λ , 束腰半径 $\omega_0 = 2.2 \text{ mm}$ 时 PV 为 0.0218λ 、RMS 为 0.0050λ 。将其作为波前分布考虑变化规律, 进行低阶 Zernike 多项式拟合, 发现其在 Z5 项系数上也有明显变化。做出其曲线变化图如图 12(b) 所示, Z5 项系数绝对值随束腰半径等间距增大而减小, 在仿真范围内变化梯度逐渐降低。

4.2 表面复折射率对出射光场相位分布影响

在本节前对于望远镜系统的仿真将四镜元件均视为理想反射镜, 将光场在其界面上的作用视为理想反射。然而在实际工程中, 为提高大型空间望远镜系统性能, 反射镜元件表面往往需进行镀膜处理。相比于介质膜, 金属膜能有效提升元件在特定波段反射率,

但其会对光场偏振特性产生一定影响, 即相比于理想反射情况的输出复振幅光场会产生变化。

为使仿真贴合实际情况, 特别是在偏振矢量光场情况下计算发射望远镜出瞳光场精确偏振相位分布, 在仿真模型中设置表面复折射率接口, 对相应复折射系数与光场界面作用公式进行修正。介质的折射率一般是一个正实部, 而金属的折射率是复数, 由负实部和比较大虚部组成。以金属铝为例, 该材料在望远镜系统工作波长 1064 nm 下复折射率 $n_{\text{AL}} = 1.373 - 7.618i$ 。设置发射望远镜的入射高斯光场束腰半径为 1 mm , 束腰距离为 0 mm , 考虑 X、Y 偏振分量振幅比值为 $1:1$ 的情况, 仿真理想反射与铝镜两种情况下出射光场 X、Y 偏振分量的相位分布情况, 得到 X 偏振相位分布如图 13 所示, Y 偏振相位分布如图 14 所示。其中 (a) 为理想反射情况下两偏振分量相位分布, (b) 为铝镜反射情况下两偏振分量相位分布, (c) 为铝镜反射与理想反射情况下相位分布之差。

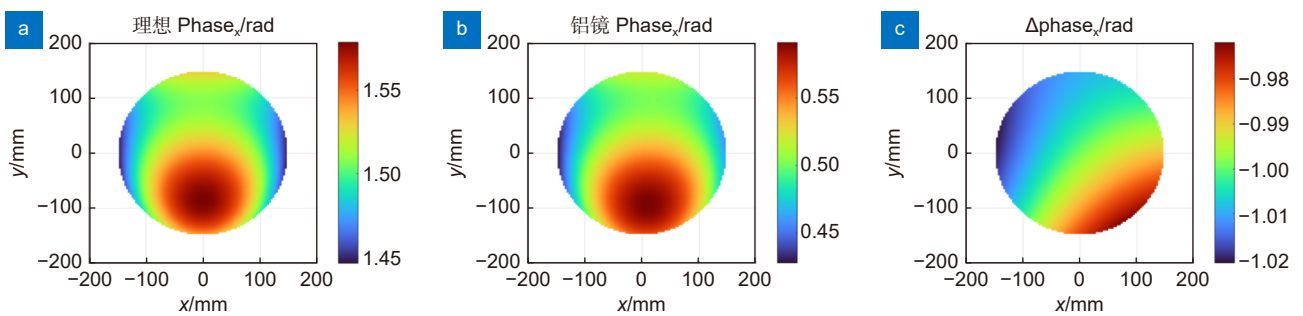


图 13 出射 X 偏振光场相位分布。(a) 理想反射情况下 X 偏振相位分布; (b) 铝镜反射情况下 X 偏振相位分布; (c) X 偏振分量铝镜与理想反射下相位分布之差

Fig. 13 Phase distributions of the output X polarization field. (a) X polarization phase distribution under the ideal reflection; (b) X polarization phase distribution under the aluminum mirror reflection. (c) The difference in X polarization phase distribution between the aluminum mirror reflection case and the ideal reflection case

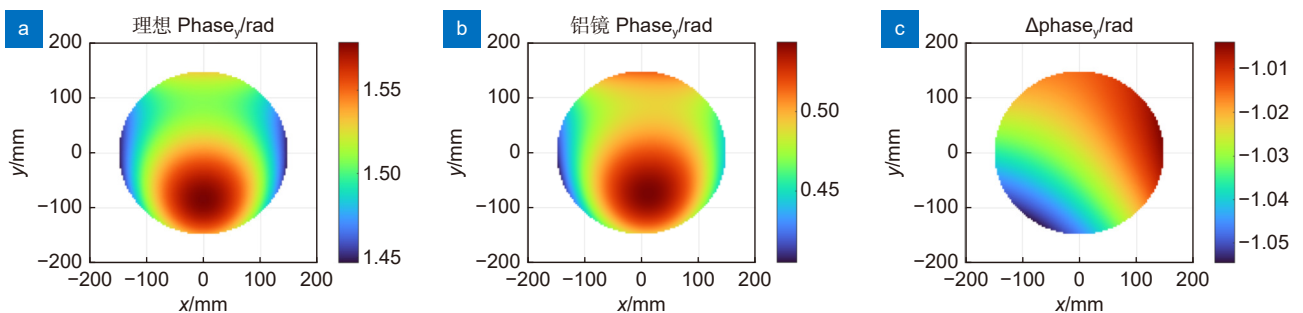


图 14 出射 Y 偏振光场相位分布。(a) 理想反射情况下 Y 偏振相位分布; (b) 铝镜反射情况下 Y 偏振相位分布; (c) Y 偏振分量铝镜与理想反射下相位分布之差

Fig. 14 Phase distributions of the output Y polarization field. (a) Y polarization phase distribution under the ideal reflection; (b) Y polarization phase distribution under the aluminum mirror reflection; (c) The difference in Y polarization phase distribution between the aluminum mirror reflection case and the ideal reflection case

可以发现理想反射情况下 X 、 Y 偏振分量的输出相位分布趋势与第三章中仅仿真 X 偏振分量时输出相位分布保持一致。比较理想情况与铝镜反射情况下两偏振分量相位分布趋势, 均发生了明显变化。从数值统计上看, X 偏振分量相位分布 PV 值由理想情况下 0.0210λ 上升到 0.0260λ , RMS 值由 0.0048λ 上升到 0.0059λ ; Y 偏振分量相位分布 PV 值由理想情况下 0.0210λ 上升到 0.0221λ , RMS 值由 0.0048λ 下降到 0.0043λ 。图 13(c)、图 14(c) 分别展示了 X 、 Y 偏振分量在铝镜与理想反射下输出相位差值分布趋势, 对其进行低阶 Zernike 多项式 ($Z1$ - $Z15$) 拟合得到图 15, 条形图蓝色和红色代表 X 和 Y 偏振。两偏振分量相位差值分布 Zernike 项主要集中在 $Z2$ (x 倾斜)、 $Z3$ (y 倾斜)、 $Z4$ (0 度像散)、 $Z6$ (45 度像散), 其中两分量相位差值 $Z2$ 、 $Z3$ 系数绝对值大小相近, $Z2$ 项均为正值, $Z3$ 项正负相反, $Z4$ 、 $Z6$ 系数绝对值大小相近, $Z4$ 项正负相反, $Z6$ 项均为负值。

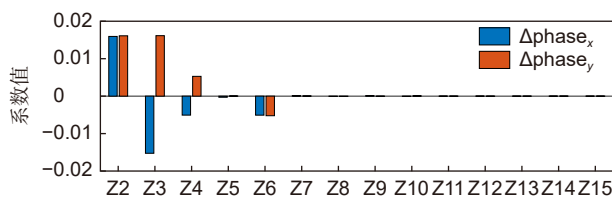


图 15 X 、 Y 偏振相位差值分布 $Z2$ - $Z15$ 项系数比较图

Fig. 15 Comparison of $Z2$ - $Z15$ coefficients of the X and Y polarizations phase difference distribution

5 结 论

在空间引力波激光干涉测量系统中, 发射望远镜系统出瞳处的复振幅光场与光程稳定性密切影响着耦合进入接收端干涉系统的远场波前与振幅, 进而影响干涉测量的准确性; 同时在接收端, 望远镜系统出瞳相位分布与 TTL 噪声控制水平密切相关, 忽略光场矢量特性导致的相位仿真误差将降低噪声控制指标分解的可信性。对于望远镜系统内部的矢量光场衍射传输高精度仿真需求, 本文基于矢量光线追迹衍射积分算法编写了程序, 将一空间引力波望远镜初始设计作为系统模型参数输入, 对出瞳波前进行了仿真, 与商用光学仿真软件 ZEMAX 结果进行比较, 验证了仿真程序 10^{-6} pm 量级的光线追迹计算精度, 设置了特定参数输入高斯光场, 进行了光场仿真计算结果的展示。对于可能导致输出矢量光场仿真偏差的两个因素, 输

入高斯光场参数与元件表面复折射率, 进行了一系列仿真讨论, 展示了输出光场矢量特性随高斯光束束腰半径、束腰距离两参数的变化规律, 比较了元件表面为金属铝材料时输出 X 、 Y 偏振分量相对理想反射时的矢量特性变化。

利益冲突: 所有作者声明无利益冲突

参考文献

- [1] Einstein A. *Näherungsweise Integration der Feldgleichungen der Gravitation*[M]. Berlin: Königlich-Preußische Akademie der Wissenschaften, 1916: 688–696.
- [2] Abbott B P, Abbott R, Abbott T D, et al. Observation of gravitational waves from a binary black hole merger[J]. *Phys Rev Lett*, 2016, **116**(6): 061102.
- [3] Wang Z, Ma J, Li J Q. Space-based gravitational wave detection mission: design highlights of LISA system[J]. *Chin Opt*, 2015, **8**(6): 980–987.
王智, 马军, 李静秋. 空间引力波探测计划-LISA系统设计要点[J]. *中国光学*, 2015, **8**(6): 980–987.
- [4] Luo Z R, Bai S, Bian X, et al. Gravitational wave detection by space laser interferometry[J]. *Adv Mech*, 2013, **43**(4): 415–447.
罗子人, 白珊, 边星, 等. 空间激光干涉引力波探测[J]. *力学进展*, 2013, **43**(4): 415–447.
- [5] Giulicchi L, Wu S F, Fenal T. Attitude and orbit control systems for the LISA Pathfinder mission[J]. *Aerosp Sci Technol*, 2013, **24**(1): 283–294.
- [6] Liu Z Y. Tianqin project captures cosmic ripples in space[J]. *Sci Technol Rev*, 2016, **34**(3): 53–54.
刘志远. “天琴计划”太空中捕捉宇宙涟漪[J]. *科技导报*, 2016, **34**(3): 53–54.
- [7] Luo Z R, Zhang M, Jin G, et al. Introduction of Chinese spaceborne gravitational wave detection program “Taiji” and “Taiji-1” satellite mission[J]. *J Deep Space Explor*, 2020, **7**(1): 3–10.
罗子人, 张敏, 靳刚, 等. 中国空间引力波探测“太极计划”及“太极1号”在轨测试[J]. *深空探测学报*, 2020, **7**(1): 3–10.
- [8] Li J C, Lin H A, Luo J X, et al. Optical design of space gravitational wave detection telescope[J]. *Chin Opt*, 2022, **15**(4): 761–769.
李建聪, 林宏安, 罗佳雄, 等. 空间引力波探测望远镜光学系统设计[J]. *中国光学(中英文)*, 2022, **15**(4): 761–769.
- [9] Wang Z, Sha W, Chen Z, et al. Preliminary design and analysis of telescope for space gravitational wave detection[J]. *Chin Opt*, 2018, **11**(1): 131–151.
王智, 沙巍, 陈哲, 等. 空间引力波探测望远镜初步设计与分析[J]. *中国光学*, 2018, **11**(1): 131–151.
- [10] Lu X Q. Research on effects of the aperture of the optical system on transmission properties of laser beams[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2016.
鲁茜倩. 光学系统中光阑对激光传输特性影响研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2016.
- [11] Sheppard C J R, Matthews H J. Imaging in high-aperture optical systems[J]. *J Opt Soc Am A*, 1987, **4**(8): 1354–1360.
- [12] Richards B, Wolf E. Electromagnetic diffraction in optical systems. II. Structure of the image field in an aplanatic system[J]. *Proc Roy Soc A Math Phys Eng Sci*, 1959, **253**(1274): 358–379.

- [13] Foreman M R, Török P. Computational methods in vectorial imaging[J]. *J Mod Opt*, 2011, **58**(5-6): 339–364.
- [14] Yun G, Crabtree K, Chipman R A. Three-dimensional polarization ray-tracing calculus I: definition and diattenuation[J]. *Appl Opt*, 2011, **50**(18): 2855–2865.
- [15] Török P, Varga P, Laczik Z, et al. Electromagnetic diffraction of light focused through a planar interface between materials of mismatched refractive indices: an integral representation[J]. *J Opt Soc Am A*, 1995, **12**(2): 325–332.
- [16] Panneton D, St-Onge G, Piché M, et al. Exact vectorial model for nonparaxial focusing by arbitrary axisymmetric surfaces[J]. *J Opt Soc Am A*, 2016, **33**(5): 801–810.
- [17] Andreas B, Mana G, Palmisano C. Vectorial ray-based diffraction integral[J]. *J Opt Soc Am A*, 2015, **32**(8): 1403–1424.
- [18] Andreas B. A vectorial ray-based diffraction integral for optical systems[J]. *Proc SPIE*, 2015, **9630**: 96300C.
- [19] Kim J, Wang Y, Zhang X. Calculation of vectorial diffraction in optical systems[J]. *J Opt Soc Am A*, 2018, **35**(4): 526–535.

作者简介



刘焯 (1999-), 女, 硕士研究生, 研究方向为干涉检测。

E-mail: 3170103635@zju.edu.cn



【通信作者】刘崇 (1979-), 男, 博士, 教授, 博士生导师。2007 年获浙江大学博士学位, 现任浙江大学光电科学与工程学院光学工程研究所副所长。主要研究方向包括固体激光技术、激光雷达技术、光学检测技术等。

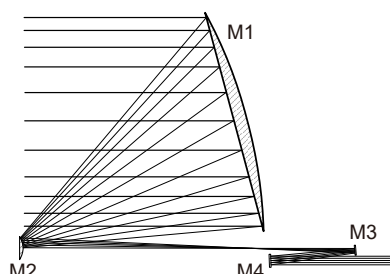
E-mail: chongliu@zju.edu.cn



扫描二维码, 获取PDF全文

Research on optical field calculation methods in the space gravitational wave telescope

Liu Ye, Hua Zheyi, Peng Shaojing, Wu Lan, Liu Dong, Liu Chong*



Schematic diagram of the optical structure of the gravitational wave telescope

Overview: The space gravitational wave detection program breaks through the limitation of the detection frequency band of the ground-based gravitational wave program and opens a new era of gravitational wave detection. The gravitational wave telescope is an important part of the laser heterodyne interferometry system, which plays a role in receiving and transmitting the laser signals, relaying and transforming the beam size. The complex amplitude field distribution at the telescope exit pupil closely affects the far-field phase and the amplitude distribution coupled into the receiving laser interferometer system, in turn, affects the accuracy of interferometric measurement. Meanwhile, the accuracy of the phase distribution simulation of the receiving telescope affects the effectiveness of TTL noise control analysis. Therefore, it is necessary to carry out the high-precision diffraction calculation for optical field propagation simulation. Due to the vector characteristics of the polarized light field and the non-paraxial propagation characteristics of the off-axis optical system, the phase distribution of the optical field at the telescope exit pupil will show different characteristics from the wavefront distribution of geometric optics. Therefore, the effects of the true boundary conditions on the field should be considered, and the strict vectorial diffraction calculation should be adopted. This paper explains the necessity of the strict vectorial diffraction field calculation based on polarization ray tracing in the space gravitational wave telescope, demonstrates the feasibility of VRBDI algorithm, and illustrates the algorithm flow combining the off-axis four-mirror afocal telescope model. A computational model was established based on the algorithm, and a set of telescope design parameters were substituted. The exit pupil wavefront was simulated in comparison with the result of ZEMAX, a commercial optical simulation software, verifying the ray tracing calculation accuracy of the simulation program reaching 10^{-6} pm level, and the results of optical field simulation were presented. Aiming at the two factors that may lead to the simulation deviation of the output vectorial field, the input Gaussian field parameters and the complex refractive index of the component surface, a series of simulation discussions were carried out. It is shown that the output vectorial field characteristics will vary with the input Gaussian beam waist radius and the waist distance. The variation of the phase distribution is analyzed by low order Zernike decomposition, and the Z5 term has the most positive correlation. The phase distributions of the output *X* polarization and *Y* polarization components when the elements are aluminum mirrors were simulated and were compared with the ideal reflection condition, and the phase difference of the two polarizations has some similarity in low-order aberration distributions.

Liu Y, Hua Z Y, Peng S J, et al. Research on optical field calculation methods in the space gravitational wave telescope[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, 50(11): 230186; DOI: [10.12086/oee.2023.230186](https://doi.org/10.12086/oee.2023.230186)

Foundation item: Project supported by National Key Research and Development Program of China (2021YFC2202001)

State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, College of Optical Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China

* E-mail: chongliu@zju.edu.cn