

引用格式: ZHANG Kaisheng, SU Xiuqin, LIU Kai. Correction Method of Inter Satellite Angular Distance Based on Aberration Effect[J]. Acta Photonica Sinica, 2023, 52(7):0712001

张凯胜, 苏秀琴, 刘凯. 基于像差影响的星间角距修正方法[J]. 光子学报, 2023, 52(7):0712001

基于像差影响的星间角距修正方法

张凯胜^{1,2}, 苏秀琴¹, 刘凯¹

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710119)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 为了有效地提高星模拟器的精度, 针对经典星间角距数学公式没有考虑光学系统像差影响的问题, 提出了一种基于像差影响的星间角距修正方法, 建立了相关的数学模型并推导了相应的数学公式。并以球幕投影的星模拟器平台为例进行分析和实验测试, 结合所建立的星间角距数学模型, 对各星点的方位角和俯仰角进行曲线拟合, 得到像差影响的星点位置误差拟合曲线, 从而完成星间角距修正。实验结果表明, 修正前星间角距误差为 27.56", 修正后星间角距误差为 16.96", 相对于修正前减小了 10.60"。本文方法为有效提高星模拟器的仿真精度提供了理论基础。

关键词: 像差; 星间角距; 数学模型; 曲线拟合; 修正

中图分类号: P173.4

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20235207.0712001

0 引言

星敏感器作为天文导航的一种高精度空间姿态测量设备, 是通过观测恒星角距获得空间飞行器的姿态^[1-3]。目前, 星敏感器地面测试主要设备是星模拟器, 星模拟器按照工作方式不同分为标定型星模拟器和功能检测型星模拟器。标定型星模拟器结构简单, 没有实时性要求, 对单星张角、星点位置和星等的模拟精度要求较高^[4]; 功能检测型星模拟器的核心显示器件是光阀, 由于其国内研制水平较低, 国外出口的限制制约了星模拟器的发展^[5]。因此, 球幕投影技术越来越多的在该领域展现出优越性, 它不仅能够实现高精度星敏感器功能的测试, 还可以实现复杂光背景下的性能验证测试和动态性能仿真测试^[6-7]。

星间角距作为星模拟器的关键技术参数, 是衡量其测试精度的重要指标^[8], 它是任意两星点之间所存在的角位置关系, 其大小取决于各星点位置^[9-10]。光学系统作为星模拟器的重要组成部分, 其彗差、场曲、像散和畸变均会引起星点位置发生变化, 导致由星点位置计算的星间角距与理论星间角距存在差异, 影响仿真精度, 因此, 研究光学系统像差对星间角距的影响是确保星模拟器高精度的重要保障。

本文提出了一种基于光学系统像差影响的星间角距修正方法, 即通过分析光学系统像差对星间角距的影响, 建立了相应的数学模型并进行了实验验证。

1 球幕投影的星模拟器工作原理及平台设计

1.1 工作原理

球幕投影的星模拟器工作原理如图 1 所示, 球幕坐标系等比缩放惯性坐标系, 球心代表地心, 投影仪将星图投射在球幕上, 每个星点相对于球心的方位角和俯仰角分别等于其赤经和赤纬。三轴转台坐标系代表卫星坐标系, 实时模拟卫星姿态信息。基于卫星时间、主星和目标星的初始轨道参数, 进行卫星姿态动力学方程的解算, 并将解算后的姿态信息实时传送至三轴转台。同时根据轨道信息和参数进行的高精度轨道递推, 完成主星目标星相对位置关系计算, 解算出在惯性坐标系下的目标天区指向, 实时传输给二轴转台。星

基金项目: 中国科学院战略高新技术创新基金(No. GQRC-19-19)

第一作者: 张凯胜, zhangkaisheng@opt.ac.cn

收稿日期: 2023-02-08; 录用日期: 2023-04-03

<http://www.photon.ac.cn>

传感器放置在三轴转台上,视轴指向为初始设置值,当启动搜索目标时,按照既定轨道进行搜索,当指向球幕上的投影区时,探测到目标并进行识别。动目标投影仪和恒星投影仪放置在二轴转台上,随着动力学解算出的目标星相对视线角的变化,二轴转台将跟随动力学视线角运动,带动投影仪输出方向发生变化,则投影区在球幕上的位置也发生变化,从而完成对星传感器全天区、复杂背景下的静态标定和动态性能测试。

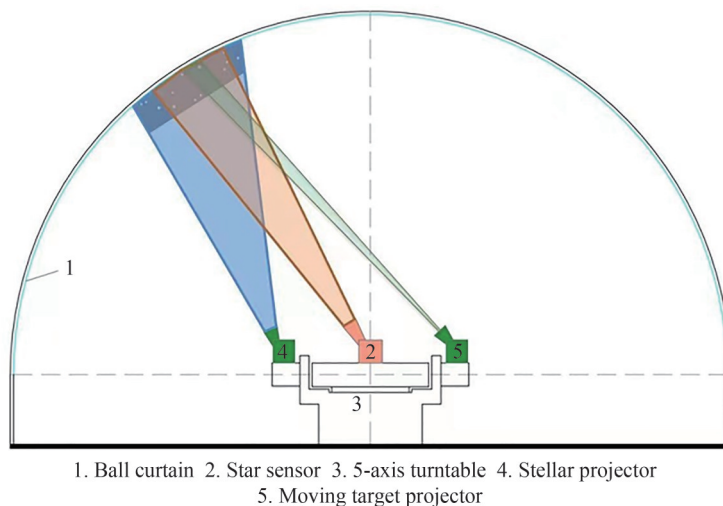


图1 球幕投影的星模拟器原理

Fig.1 Schematic diagram of star simulator for spherical screen projection

主星和目标星相对运动示意图如图2所示, $O_i-X_iY_iZ_i$ 表示惯性坐标系, R_c 为主星地心距矢量, R_t 为目标星地心距矢量, r 为目标星相对于主星的位置矢量。根据矢量关系有 $r=R_t-R_c$,矢量 r 指向的天区即是星传感器看到的天区。根据 r 的指向查找星图,并根据同一时间太阳、月亮的轨道参数,计算太阳和月亮的位置矢量与视轴矢量关系,经过坐标转换,可得到视场范围内相应的星空背景图像和目标星图像,这个图像输出给投影仪,投影仪将输入的图像投影到球幕上,当星传感器指向投影区时能够探测到图像,并与其在轨飞行期间看到的图像一致。

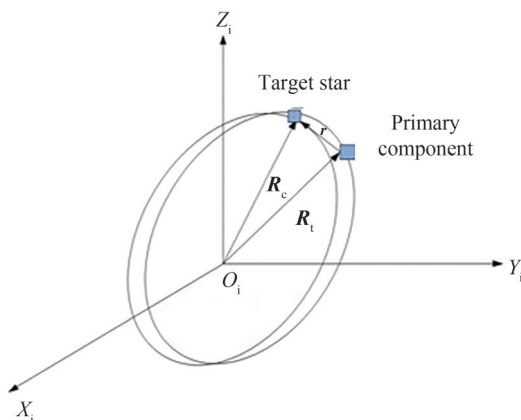


图2 主星和目标星相对运动示意图

Fig.2 Schematic diagram of relative motion of main star and target star

1.2 平台设计

如图3所示,该平台主要包括球幕、动目标投影仪、恒星投影仪、五轴飞行转台、图形工作站、实时仿真计算机等。实时仿真计算机根据轨道高度、时间及日期解算当时卫星在轨姿态,为三轴转台和两轴转台及图像生成软件提供输入数据;五轴转台由一个三轴转台和一个与之共轴安装的二轴转台及相关控制柜组成,其中三轴转台与二轴转台独立运行,互不影响,主要用于模拟卫星姿态运动,以完成星体姿态角和角速度的

模拟,并根据两星视角关系将投影仪的镜头调整到正确的投影方向上,以确保能够始终看到图像;图形工作站接收来自实时仿真计算机的时间、主星和目标星的轨道参数等数据,根据星敏感器在卫星上的安装矩阵和指向角数据,计算其视场大小,调用图像生成软件,模拟当前视场内的光学图像,并分别送给动目标投影仪和恒星投影仪。将目标星的图像和背景星空的图像投影到球幕上,呈现出恒星背景和目标星图像。

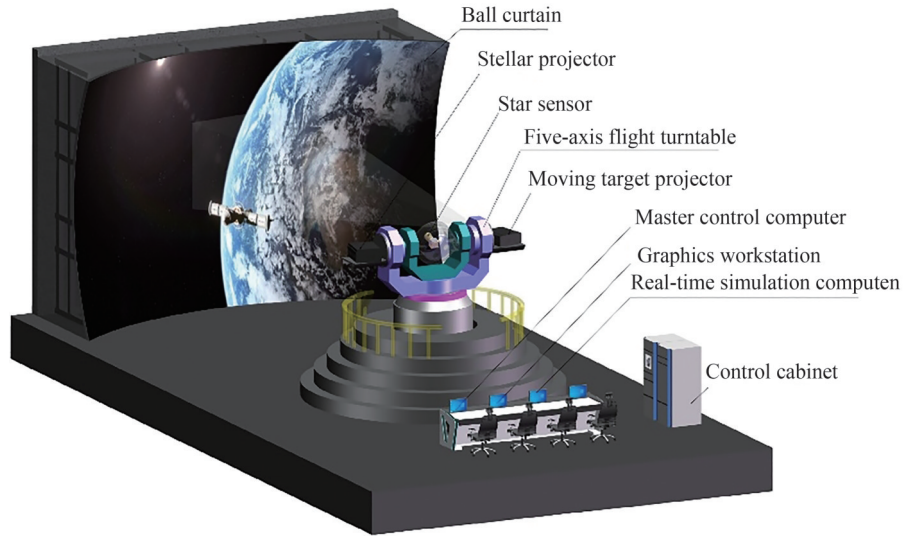


图3 平台设计图

Fig.3 Design drawing of platform

2 基于像差影响的星间角距数学模型

2.1 数学模型建立

任意两个星点所确定的角位置关系如图4所示^[11],星点经过光学系统投射在像面上的坐标关系如图5所示。

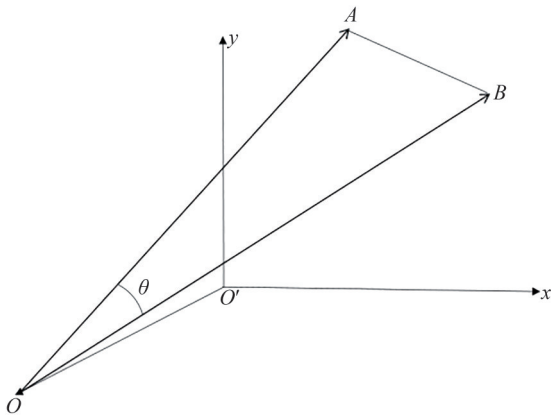


图4 任意两星点间的角位置关系

Fig.4 Angular position relationship of two star points

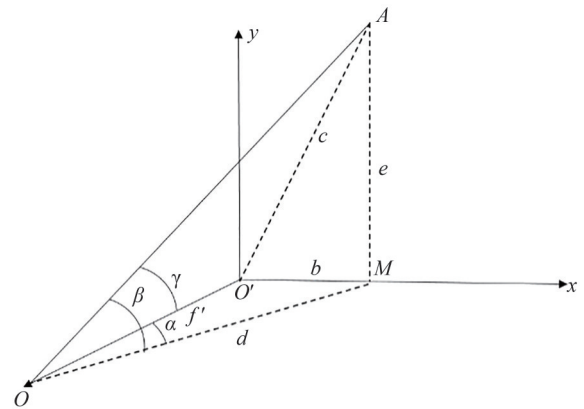


图5 星点在像面上的坐标关系

Fig.5 Coordinate diagram of star points on image plane

根据图5可知

$$b = f' \tan \alpha \quad (1)$$

$$d = \frac{f'}{\cos \alpha} \quad (2)$$

$$e = d \cdot \tan \beta = \frac{f' \cdot \tan \beta}{\cos \alpha} \quad (3)$$

$$c = \sqrt{b^2 + e^2} = \sqrt{(f' \cdot \tan \alpha)^2 + \left(\frac{f' \cdot \tan \beta}{\cos \alpha}\right)^2} \quad (4)$$

$$\tan \gamma = \frac{c}{f'} = \sqrt{(\tan \alpha)^2 + \left(\frac{\tan \beta}{\cos \alpha}\right)^2} \quad (5)$$

根据图4和图5中的几何关系及式(1)~式(5)计算得到两星点之间的星间角距为^[12]

$$\theta = \arccos[\cos \beta_1 \cdot \cos \beta_2 \cos(\alpha_1 - \alpha_2) + \sin \beta_1 \cdot \sin \beta_2] \quad (6)$$

星点位置误差是影响星间角距的主要因素,而星点位置误差产生的一个主要的原因是光学系统像差^[13-14],在高精度星模拟器系统中,分析星间角距误差时,不能单纯只考虑畸变一种像差带来的影响,应该综合整个光学系统各类像差带来的星点位置偏移所引起的星间角距误差^[13-14]。如图6所示,对于星点A,在像差影响的情况下,其位置变为A',图中的位置b,e,c相应的变为b',e',c',方位角 α 和俯仰角 β 分别变为 α' 和 β' 。对于任意两星点A和B,在像差的影响下,星点A和B的位置分别变为A'和B',O点相对A',B'两点的俯仰角分别为 β'_1 和 β'_2 ,相对A'和B'两点的方位角分别为 α'_1 和 α'_2 ,相应的 b_1, e_1, c_1 变为 b'_1, e'_1, c'_1 , b_2, e_2, c_2 变为 b'_2, e'_2, c'_2 ,如图7所示。

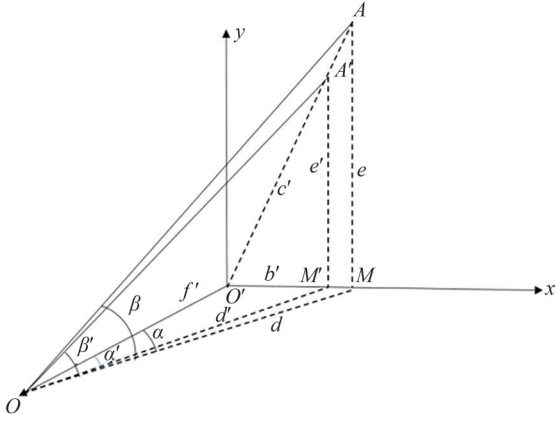


图6 像差对星点位置影响示意图
Fig.6 Schematic diagram of influence of aberration on star position

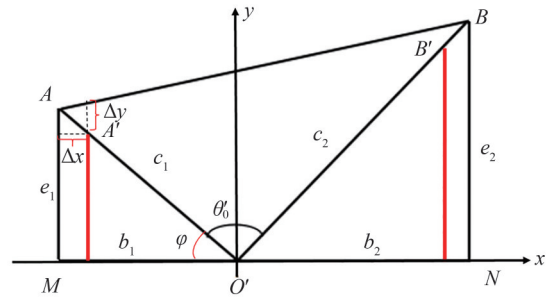


图7 像差对星点星间角距影响示意图
Fig.7 Schematic diagram of the influence of aberration on the angular distance between stars

根据图6可知,各参数之间的关系为

$$b' = f' \tan \alpha' \quad (7)$$

$$d' = \frac{f'}{\cos \alpha'} \quad (8)$$

$$e' = d' \cdot \tan \beta' = \frac{f' \cdot \tan \beta'}{\cos \alpha'} \quad (9)$$

$$c' = \sqrt{b'^2 + e'^2} = \sqrt{(f' \cdot \tan \alpha')^2 + \left(\frac{f' \cdot \tan \beta'}{\cos \alpha'}\right)^2} \quad (10)$$

$$\tan \gamma' = \frac{c'}{f'} = \sqrt{(\tan \alpha')^2 + \left(\frac{\tan \beta'}{\cos \alpha'}\right)^2} \quad (11)$$

根据图7可知,像差引起星点A、B位置变化,其偏移量与理想位置的关系可表示为

$$b' = b - \Delta x \quad (12)$$

$$e' = e - \Delta y \quad (13)$$

$$c' = c - \sqrt{\Delta y^2 + \Delta x^2} \quad (14)$$

式中, $\Delta x, \Delta y$ 是与像差有关的小量,光学系统像差的大小用 $\delta y'$ 表示,则有

$$\Delta x = \delta y' \cos \varphi \quad (15)$$

$$\Delta y = \delta y' \sin \varphi \quad (16)$$

式中, φ 为星点 A 在 x 轴上的投影与 $O'A$ 的夹角, 故有

$$\varphi = \arctan \frac{e}{b} \quad (17)$$

化简式(17)得到

$$\varphi = \arctan \frac{\tan \beta}{\sin \alpha} \quad (18)$$

联合式(1)~式(3)及式(15)~式(18)式代入到式(12)和式(13)中化简得到

$$b' = f' \tan \alpha - \delta y' \cos \left(\arctan \left(\frac{\tan \beta}{\sin \alpha} \right) \right) \quad (19)$$

$$e' = \frac{f' \cdot \tan \beta}{\cos \alpha} - \delta y' \sin \left(\arctan \left(\frac{\tan \beta}{\sin \alpha} \right) \right) \quad (20)$$

将式(19)和式(20)代入式(7)和式(9)中化简得到

$$\alpha' = \arctan \left[\frac{\delta y' \cos \left(\arctan \left(\frac{\tan \beta}{\sin \alpha} \right) \right)}{\tan \alpha - \frac{f'}{f'}} \right] \quad (21)$$

$$\beta' = \arctan \left[\cos \alpha' \left(\frac{\tan \beta}{\cos \alpha} - \frac{\delta y' \sin \left(\arctan \left(\frac{\tan \beta}{\sin \alpha} \right) \right)}{f'} \right) \right] \quad (22)$$

最终, 将式(21)和式(22)代入到星间角距公式中可以得到基于像差的星间角距, 即

$$\theta' = \arccos \left[\cos \beta'_1 \cdot \cos \beta'_2 \cos (\alpha'_1 - \alpha'_2) + \sin \beta'_1 \cdot \sin \beta'_2 \right] \quad (23)$$

因此, 像差对任意两星点的星间角距的误差为

$$\Delta \theta = \theta' - \theta \quad (24)$$

2.2 光学系统像差影响

在光学系统中, 几何像差表示实际光线在理想像平面上的交点与理想位置的差值, 其表达式为^[15]

$$\delta y' = A_1 h^3 \cos \theta + A_2 y' h^2 (1 + 2 \cos^2 \theta) + (3A_3 + A_4) y'^2 h \cos \theta + A_5 y'^3 \quad (25)$$

$$\delta x' = A_1 h^3 \sin \theta + A_2 y' h^2 (2 \sin \theta \cos \theta) + (A_3 + A_4) y'^2 h \sin \theta \quad (26)$$

式中, $\delta y'$, $\delta x'$ 表示光学系统的几何像差, A_1, A_2, A_3, A_4, A_5 分别表示球差、彗差、像散、场曲和畸变系数, h 表示光束孔径, y' 表示像高。

1) 彗差的影响

彗差是轴外物点宽光束像差, 式(25)和式(26)中的第二项表示彗差的大小, 可以看出, 彗差与 h^2 和 y' 成比例, 将式(25)和式(26)中彗差引起的星点横向偏移量代入式(21)和式(22)中得到彗差对方位角 α 和俯仰角 β 的影响为

$$\alpha' = \arctan \left[\frac{A_2 y' h^2 \cdot \cos \left(\arctan \left(\frac{\tan \beta}{\sin \alpha} \right) \right)}{\tan \alpha - \frac{f'}{f'}} \right] \quad (27)$$

$$\beta' = \arctan \left[\cos \alpha' \left(\frac{\tan \beta}{\cos \alpha} - \frac{A_2 y' h^2 \cdot \sin \left(\arctan \left(\frac{\tan \beta}{\sin \alpha} \right) \right)}{f'} \right) \right] \quad (28)$$

最后将式(27)和式(28)代入式(23)和式(24)中可计算得到彗差对星间角距的影响。

2) 场曲和像散的影响

细光束场曲会引起高斯像面的变化,不同视场像高也会随着变化,如图8所示,场曲引起星点位置的偏移记为 δy ,则

$$\delta y = \delta y' \tan \omega \quad (29)$$

式中, $\delta y'$ 为细光束场曲的大小, ω 为视场角,式(25)和式(26)中的第三项表示场曲和像散的大小。

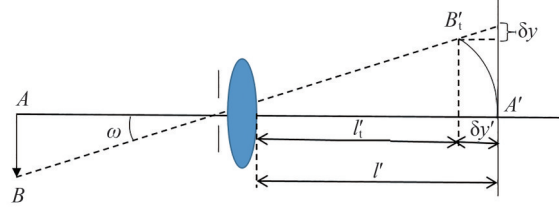


图8 场曲引起的横向偏移

Fig.8 Lateral offset caused by field curvature

将式(25)和式(26)中的场曲项代入式(29)得到场曲和像散引起的星点横向偏移为

$$\delta y = (3A_3 + A_4) y'^2 h \cos \theta \cdot \tan \omega \quad (30)$$

$$\delta x = (A_3 + A_4) y'^2 h \sin \theta \cdot \tan \omega \quad (31)$$

将式(30)、式(31)中的场曲项代入到式(21)、式(22)中得到细光束场曲对方位角 α 和俯仰角 β 的影响,即

$$\alpha' = \arctan \left[\frac{A_4 y'^2 h \cdot \tan \omega \cdot \cos \left(\arctan \left(\frac{\tan \beta}{\sin \alpha} \right) \right)}{\tan \alpha - \frac{A_4 y'^2 h \cdot \tan \omega \cdot \cos \left(\arctan \left(\frac{\tan \beta}{\sin \alpha} \right) \right)}{f'}} \right] \quad (32)$$

$$\beta' = \arctan \left[\cos \alpha' \left(\frac{\tan \beta}{\cos \alpha} - \frac{A_4 y'^2 h \cdot \tan \omega \cdot \sin \left(\arctan \left(\frac{\tan \beta}{\sin \alpha} \right) \right)}{f'} \right) \right] \quad (33)$$

将式(30)、式(31)中的像散项代入到式(21)、式(22)中得到像散对方位角 α 和俯仰角 β 的影响,即

$$\alpha' = \arctan \left[\frac{A_3 y'^2 h \cdot \tan \omega \cdot \cos \left(\arctan \left(\frac{\tan \beta}{\sin \alpha} \right) \right)}{\tan \alpha - \frac{A_3 y'^2 h \cdot \tan \omega \cdot \cos \left(\arctan \left(\frac{\tan \beta}{\sin \alpha} \right) \right)}{f'}} \right] \quad (34)$$

$$\beta' = \arctan \left[\cos \alpha' \left(\frac{\tan \beta}{\cos \alpha} - \frac{A_3 y'^2 h \cdot \tan \omega \cdot \sin \left(\arctan \left(\frac{\tan \beta}{\sin \alpha} \right) \right)}{f'} \right) \right] \quad (35)$$

最后将式(32)~式(35)分别代入式(23)和式(24)中可计算得到场曲和像散对星间角距的影响。

3) 畸变的影响

畸变是主光线的像差,根据式(25)第四项得到畸变的横向偏移量,将其代入到式(21)、(22)中得到畸变对方位角 α 和俯仰角 β 的影响,即

$$\alpha' = \arctan \left[\frac{A_5 y'^3 \cdot \cos \left(\arctan \left(\frac{\tan \beta}{\sin \alpha} \right) \right)}{\tan \alpha - \frac{A_5 y'^3 \cdot \cos \left(\arctan \left(\frac{\tan \beta}{\sin \alpha} \right) \right)}{f'}} \right] \quad (36)$$

$$\beta' = \arctan \left[\cos \alpha' \left(\frac{\tan \beta}{\cos \alpha} - \frac{A_5 y'^3 \cdot \sin \left(\arctan \left(\frac{\tan \beta}{\sin \alpha} \right) \right)}{f'} \right) \right] \quad (37)$$

最后将式(36)和式(37)分别代入式(23)和式(24)中可计算得到畸变对星间角距的影响。

3 像差对星间角距影响的实例分析

3.1 投影光学系统像差

本文以球幕投影的星模拟器平台为例,其投影光学系统参数如表1所示,光路如图9所示,投影系统焦距为52.8 mm,投射距离12 m。

表1 投影系统的技术指标
Table 1 Technical indicators of projection system

Parameter	Value
Diagonal angle of view	18°
$F\#$	2.2
Focal distance	52.8 mm
Wavelength	460~650 nm
Aberration	$\leq 1\%$

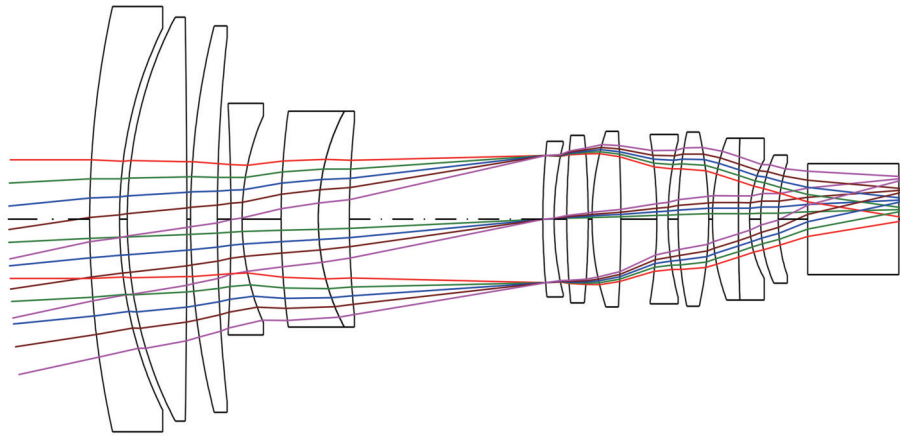


图9 焦距为52.8 mm光学系统
Fig.9 Optical system with focal length of 52.8 mm

该投影系统MTF如图10所示,从图中可以看出,MTF曲线均平滑过渡,在高频93 lp/mm时,全视场MTF均大于0.48。不同视场彗差大小可通过彗差和数计算得到,计算得到不同视场彗差大小如表2所示。

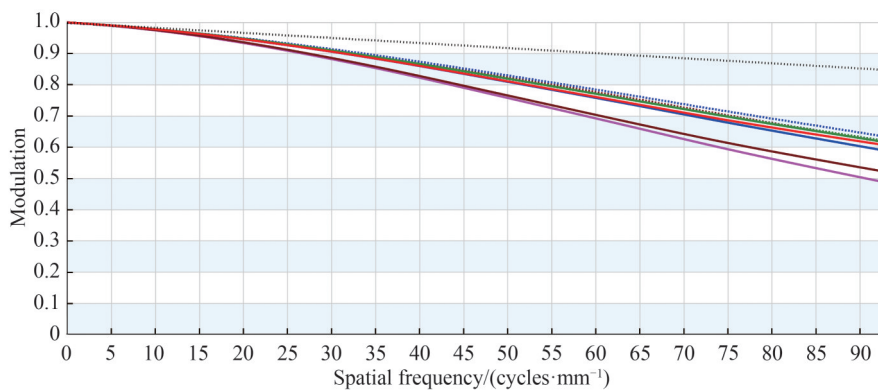


图10 光学系统MTF曲线
Fig.10 MTF curve of optical system

表2 各视场彗差和数及彗差大小
Table 2 Coma sum and coma size of each field of view

Field of view/(°)	Coma sum SII	Coma size/ μm
0.000 00	0.000 000	0.00
1.355 02	0.000 151	0.36
2.538 32	0.000 282	0.74
2.759 12	0.000 307	0.82
3.697 48	0.000 412	1.19
3.967 20	0.000 442	1.32
4.167 10	0.000 464	1.41
4.924 22	0.000 549	1.81
5.297 65	0.000 591	2.03

光学系统场曲、像散和畸变曲线如图11和图12所示,从图中可以看出,该投影系统为负畸变,畸变大小为 -0.5% 。

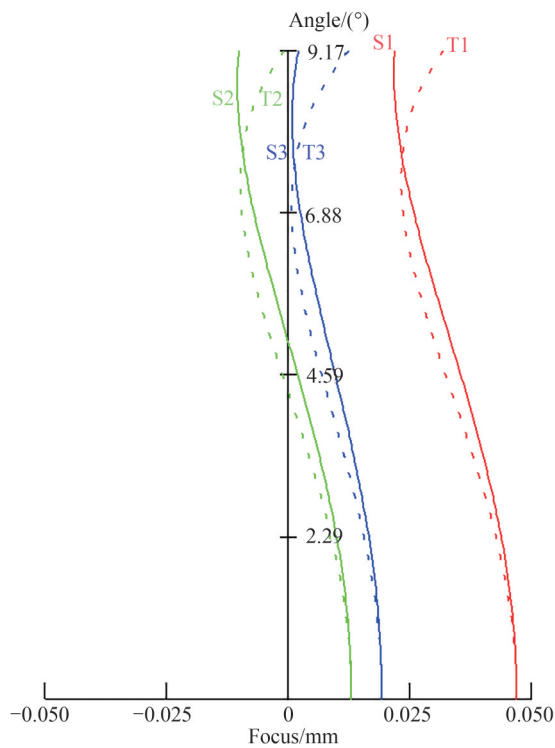


图11 场曲和像散曲线
Fig.11 Field & Astigmatism curve

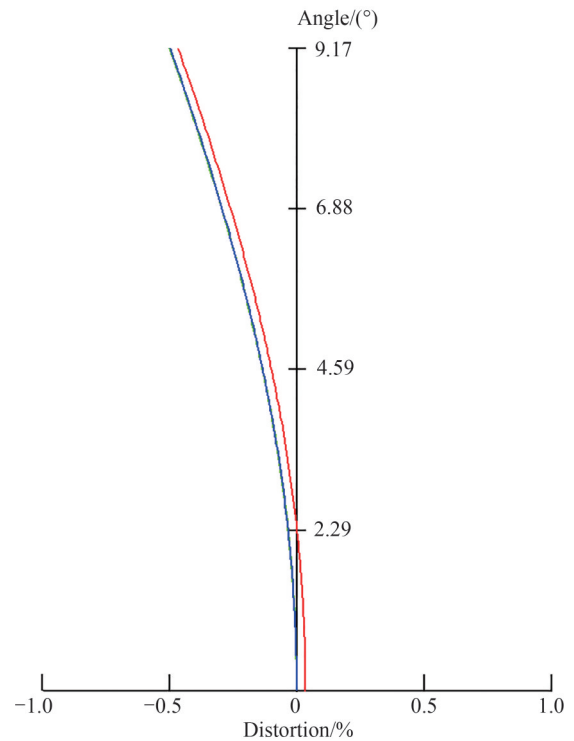


图12 畸变曲线
Fig.12 Distortion curve

3.2 结果仿真

软件生成部分星图如图13所示,该星图中各星点的理论方位角和俯仰角如表3所示。将该星图中各星点的方位角和俯仰角及其所在视场的像差代入式(27)~式(37)中,计算得到不同像差影响下的各星点的方位角和俯仰角,最后通过式(23)和式(24)计算的到像差对星间角距影响的误差,计算结果如图14所示。

由图14可以看出,彗差对星间角距影响最大为 $-10.04''$,场曲对星间角距最大影响为 $-13.07''$,像散对星间角距影响最大为 $-2.92''$,畸变对星间角距最大影响为 $34.78''$,考虑到各像差对星间角距的补偿性,得到像差对星间角距影响的总误差最大为 $16.53''$ 。

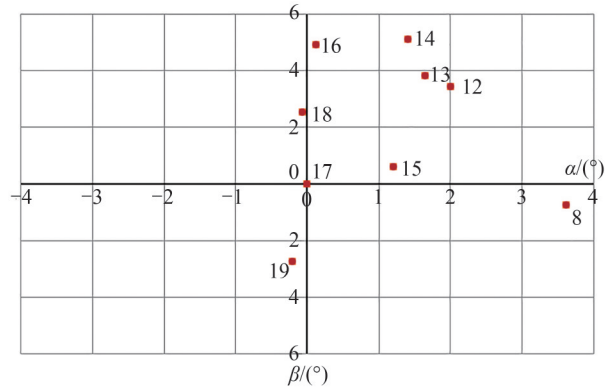


图 13 软件生成的部分星图

Fig.13 Partial star map generated by software

表 3 各星点位置
Table 3 Positions of stars

Star number	Azimuth $\alpha/(\circ)$	Angle of pitch $\beta/(\circ)$	Inter star angular distance/ (\circ)
8	3.618 56	-0.760 35	3.697 48
12	2.014 22	3.418 54	3.967 20
13	1.654 62	3.825 06	4.167 10
14	1.414 21	5.105 91	5.297 65
15	1.211 49	0.606 99	1.355 02
16	0.133 33	4.922 42	4.924 22
17	0.000 00	0.000 00	0.000 00
18	-0.068 72	2.537 39	2.538 32
19	-0.201 19	-2.751 78	2.759 12

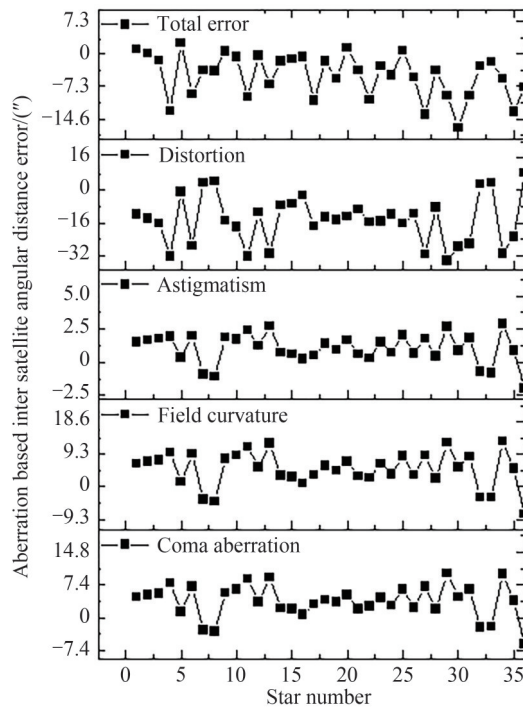


图 14 像差对星间角距影响

Fig.14 Aberration effect on inter satellite angular distance

4 实验验证与分析

4.1 实验验证

球幕投影的星模拟器实物图如图15所示,软件生成的星图经过光学系统投射到球幕上,通过调整经纬仪高度,使其与中央星点处于同一高度和水平,观测是否能看到全视场内所有星点,采用经纬仪测量球幕上显示的所有待测星点的方位角和俯仰角,如图16所示,通过测量得到各星点的方位角和俯仰角如表4所示。

通过表4中测量的方位角和俯仰角计算得到各星之间的星间角距误差如图17所示,从图中可以看出,

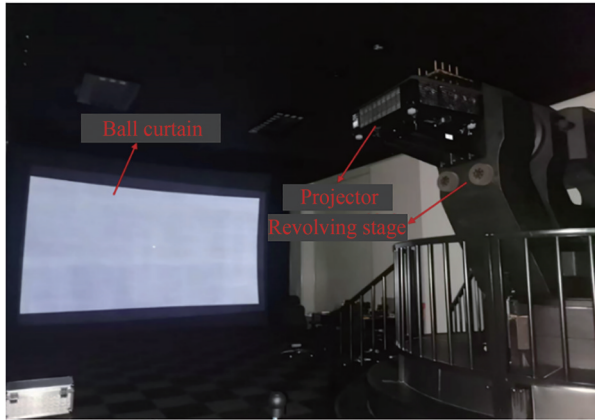


图15 平台实物图
Fig.15 Physical drawing of platform

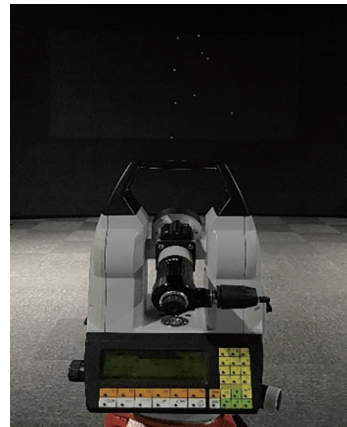


图16 投射星点测试实物图
Fig.16 Projection star point test object

表4 各星点实测位置
Table 4 Measured position of each star point

Star number	Azimuth $\alpha/(^{\circ})$	Angle of pitch $\beta/(^{\circ})$
8	3.621 82	-0.760 89
12	2.016 16	3.421 59
13	1.656 05	3.829 04
14	1.415 00	5.112 33
15	1.212 45	0.607 47
16	0.132 51	4.928 34
17	0.000 00	0.000 00
18	-0.073 17	2.538 20
19	-0.201 77	-2.752 90

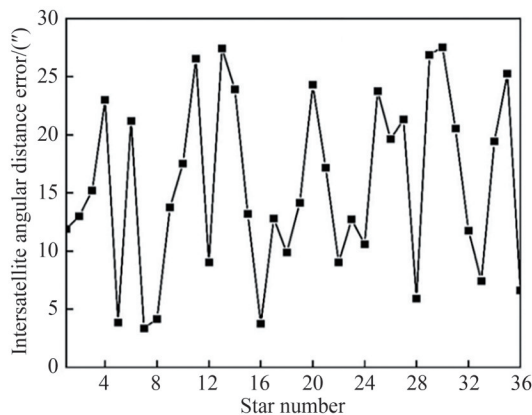


图17 星间角距误差实测值
Fig.17 Measured value of inter satellite angular distance error

实际测试所得的星间角距误差最大为 27.56",而经纬仪的固有误差为 0.5",因此,经纬仪固有误差的影响可忽略不计。

4.2 误差修正

在星间角距误差修正过程中,首先对视场分辨率大小的区域进行网格分区,本文将水平方向分了6个区域,将垂直方向分了6个区域,根据像差大小与所建立的星间角距数学模型,进行多项式曲线拟合,如图 18 所示。其中,水平灰色区域带里面星点的俯仰角按照水平 X 坐标和垂直修正量进行拟合,垂直灰色区域带中的星点的方位角按照垂直 Y 坐标和水平修正量进行拟合。对于交叉区域来说方位角和俯仰角就都进行了拟合,然后以同样的方法对其他区域进行拟合,从而完成整个区域方位角和俯仰角的拟合。

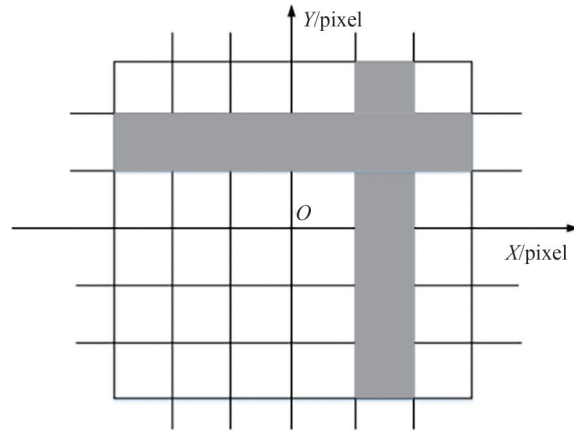


图 18 拟合示意图
Fig.18 Fitting diagram

结合所建立的星间角距数学模型,针对各星点的方位角和俯仰角进行曲线拟合,得到各星点位置误差拟合曲线如图 19 所示。其中,像差 x 向对方位角影响的拟合曲线方程为

$$\Delta x = 0.01880\alpha^5 - 0.29162\alpha^4 + 1.3627\alpha^3 - 2.2781\alpha^2 + 1.0525\alpha + 0.0957 \quad (38)$$

像差 y 向对俯仰角的拟合曲线方程为

$$\Delta y = -0.0008\beta^5 - 0.0097\beta^4 + 0.0405\beta^3 + 0.1269\beta^2 - 0.4733\beta - 0.0614 \quad (39)$$

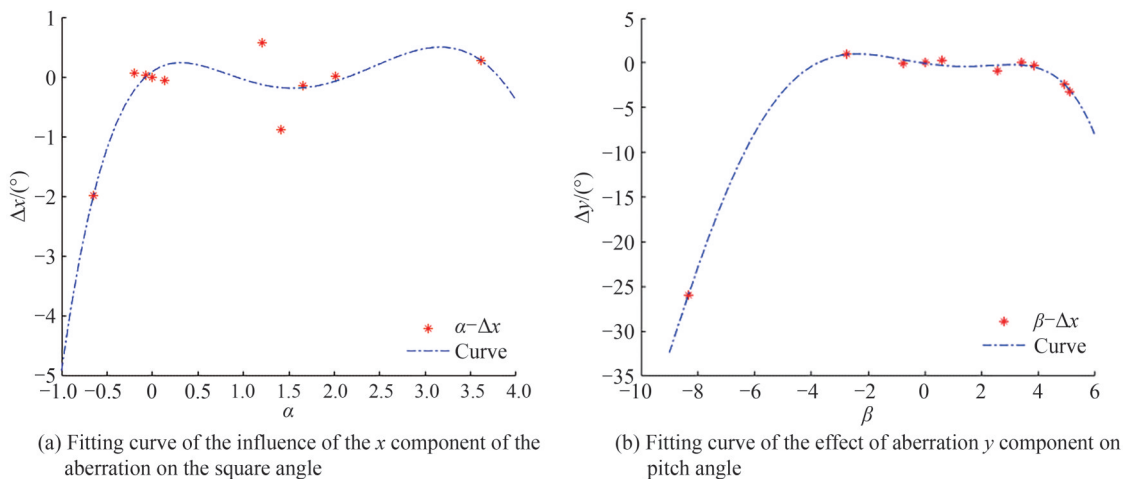


图 19 像差对方位角影响的拟合曲线
Fig.19 Fitting curve of coma effect on azimuth

根据式 (38) 和式 (39) 可得到星点位置误差与方位角和俯仰角的关系,代入下式中计算得到修正后方位角和俯仰角的大小。

$$\alpha_0 = \frac{(\Delta x + 1) \times s \times a}{f} + \alpha_i \quad (40)$$

$$\beta_0 = \frac{(\Delta y + 1) \times s \times b \times \cos(\alpha_{0i})}{f} + \beta_i \quad (41)$$

式中, Δx 和 Δy 可从拟合曲线中得到, a 和 b 是星点的理论位置, f 是焦距, α_i 和 β_i 是测量得到的方位角和俯仰角, s 为像素大小, α_{0i} 为各星点与中央星点的方位角。修正后各星点方位角和俯仰角如表 5 所示, 修正后星间角距误差如图 20 所示, 结果表明, 修正后星间角距最大误差为 16.96", 相对于修正前 (27.56") 减小了 10.60"。

表 5 修正后各星点位置
Table 5 Position of star points after correction

Star number	Azimuth $\alpha/(\circ)$	Angle of pitch $\beta/(\circ)$
8	3.618 76	-0.759 78
12	2.016 16	3.419 37
13	1.655 22	3.825 99
14	1.414 73	5.108 99
15	1.211 89	0.608 86
16	0.135 01	4.923 34
17	0.000 00	0.000 00
18	-0.067 62	2.535 42
19	-0.200 93	-2.753 45

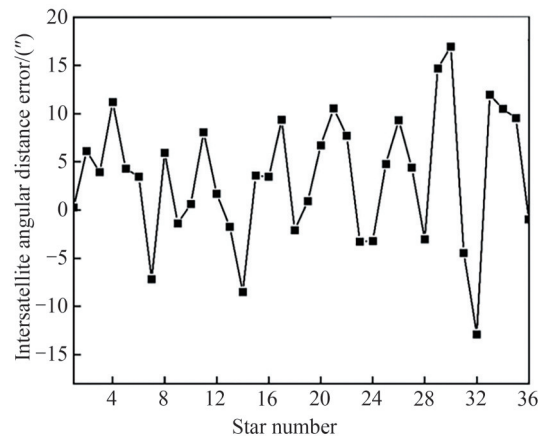


图 20 修正后星间角距误差
Fig.20 Corrected inter satellite angular distance error

5 结论

针对经典星间角距数学公式没有考虑像差影响的问题, 提出了一种基于光学系统像差影响的星间角距修正方法, 建立了相应的星间角距数学模型。以球幕投影的星模拟器平台为例, 分析了不同像差对星点位置的影响, 通过对该实例中各星点之间的星角距进行测量, 结合所建立的星间角距数学模型, 完成星间角距的修正, 从而有效地提高了星模拟器的仿真精度。

参考文献

- [1] ZHAO Hui, DE Jun, YONG Min, et al. A strap-down inertial Navigation/Spectrum Red-Shift/Star Sensor (SINS/SRS/SS) autonomous integrated system for spacecraft navigation[J]. Sensors, 2018, 18(7): 2039-2053.
- [2] LI Gang, WANG Liang, ZHENG Ren, et al. Research on partitioning algorithm based on dynamic star simulator guide star catalog[J]. IEEE Access, 2021, 15(99): 1-7.
- [3] JI Jin, GAO Yang, ZHANG An, et al. A method for calibrating thrust of satellite based on the attitude variety on-orbit [C]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 727(1): 012015-012021.
- [4] CHEN Qimeng, ZHANG Guoyu, WANG Zhe, et al. Design of calibration star simulator and test of key parameters[J].

- Journal of Changchun University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2017, 40(4): 41-44.
- 陈启梦, 张国玉, 王哲, 等. 标定型星模拟器设计与关键参数测试[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2017, 40(4): 41-44.
- [5] LI Chenhao, HE Xu, JI Qi, et al. Design of high spatiotemporal resolution dynamic star simulator[J]. Optics and Precision Engineering, 2020, 28(3): 515-525.
李成浩, 何煦, 姬琪, 等. 高时空分辨率动态星模拟器设计[J]. 光学精密工程, 2020, 28(3): 515-525.
- [6] 李光茜. 动态星模拟器星图模拟关键技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2019.
- [7] SHI Qingshao, QING Xu, LAN Cangzou, et al. Semi-physical simulation system about remote sensing satellite attitude determination based on star sensor[J]. Science of Surveying and Mapping, 2012, 37(5): 204-203.
- [8] CHANG Yong, GUO Huadong. Semi-physical simulation of the airborne InSAR based on rigorous geometric model and real navigation data[C]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2014, 17(14): 1-6.
- [9] SUN Gaofei, ZHANG Guoyu, GAO Yujun, et al. Design of star sensor ground calibration equipment[J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(10): 2822-2827.
孙高飞, 张国玉, 高玉军, 等. 星传感器地面标定设备的设计[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(10): 2822-2827.
- [10] LI Xuekui, TAN Haishu, LI Jie. New calibration method of principal distance of star sensors through diagonal distance [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2009, 30(5): 755-762.
李学夔, 谭海曙, 李杰. 利用星角距对星传感器主距进行标定的新方法[J]. 半导体光电, 2009, 30(5): 755-762.
- [11] 陶雪. 高精度静态星模拟器研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2013.
- [12] ZHANG Yong, HE Yiyang, YOU Sihai. Method of estimating star sensor attitude angle deviation based on star position error[J]. Electronic Science and Technology, 2019, 32(10): 43-47.
张勇, 何贻洋, 由四海. 基于星像位置误差估计星传感器姿态角偏差的方法[J]. 电子科技, 2019, 32(10): 43-47.
- [13] ZOU Yangyang, ZHANG Guoyu, SUN Gaofei, et al. Star position correction of dynamic star simulator based in distortion effect[J]. Chinese Journal of Space Science, 2014, 34(4): 468-473.
邹阳阳, 张国玉, 孙高飞, 等. 基于畸变影响的动态星模拟器星点位置修正方法[J]. 空间科学学报, 2014, 34(4): 468-473.
- [14] TAN Di, ZHANG Xin, WU Yanxiong, et al. Analysis of effect of optical aberration on star centroid location error[J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(2): 0217004.
谭迪, 张新, 伍雁雄, 等. 光学像差对星点质心定位误差的影响分析[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(2): 0217004.
- [15] 袁旭沧. 光学设计[M]. 北京: 科学出版社, 1983.

Correction Method of Inter Satellite Angular Distance Based on Aberration Effect

ZHANG Kaisheng^{1,2}, SU Xiuqin¹, LIU Kai¹

(1 Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Science, Xi'an 710119 China)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Star sensors are high-precision space attitude measurement devices used in astronomical navigation to obtain the attitude of space vehicles by observing the angular distance of stars. As a key technical parameter of star simulators, the angular distance between stars is an important indicator of their testing accuracy. It represents the angular position relationship between any two-star points, and its size depends on the position of each star point. As an important component of a star simulator, optical systems can cause changes in star position due to coma, field curvature, astigmatism, and distortion. These changes can lead to discrepancies between the calculated inter-star angular distance and the theoretical inter-star angular distance, thereby affecting the accuracy of the simulation. Therefore, studying the impact of optical system aberrations on the inter-star angular distance is an important guarantee for ensuring the high accuracy of the star simulator. In order to effectively improve the accuracy of the star simulator, this paper addresses the issue that the conventional mathematical formula for calculating the inter-star angular distance does not account for the impact of aberrations in optical systems. As a solution, a method for correcting the inter-star angular distance based on aberration influence is proposed in this study. The method involves establishing a relevant mathematical model and deriving the corresponding mathematical formula. Then, taking the star simulator platform of spherical screen projection as an example, analysis and

experimental testing were conducted. The test results showed the following maximum impacts of various aberrations on the inter-star angular distance: $-10.04''$ for coma aberration, $-13.07''$ for field curvature, $-2.92''$ for astigmatism, and $34.78''$ for distortion. Considering the compensation of each aberration on inter-star angular distance, the maximum total error of the influence of aberration on inter-satellite angular distance is $16.53''$. Combining the established mathematical model of inter-satellite angular distance, curve fitting is performed on the azimuth and elevation angles of each star point to obtain a fitting curve for the position error of the star point affected by aberration, thereby completing inter-satellite angular distance correction. The experimental results show that the inter-satellite angular distance error before correction is $27.56''$, and the inter-satellite angular distance error after correction is $16.96''$, which is reduced by $10.60''$ compared to the before correction. The research and experimental verification of inter-satellite angular distance correction methods for aberration effects provide a theoretical basis for effectively improving the simulation accuracy of satellite simulators.

Key words: Aberration; Interplanetary angular distance; Mathematical model; Curve fitting; Correct

OCIS Codes: 120.1880; 220.1000; 220.1010; 220.2740