

## RGB 合束信标光旋转姿态解耦测量研究

杨海马<sup>1,2\*</sup>, 金焱<sup>1</sup>, 强佳<sup>2,4</sup>, 刘瑾<sup>3</sup>, 李筠<sup>1</sup>, 张大伟<sup>1</sup>, 黄元申<sup>1</sup>, 于涌<sup>5,6</sup><sup>1</sup>上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海 200093;<sup>2</sup>中国科学院空间主动光电技术重点实验室, 上海 200083;<sup>3</sup>上海工程技术大学电子电气学院, 上海 201620;<sup>4</sup>中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083;<sup>5</sup>中国科学院上海天文台, 上海 200030;<sup>6</sup>中国科学院大学天文与空间科学学院, 北京 100049

**摘要** 从信标光链路中高效地获取运动平台的姿态信息是运动平台量子光通信成功的关键之一。针对运动平台量子光通信的实际需求,提出一种探测载体平台旋转姿态角的信标姿态解耦方法,有望显著提高量子光通信的动态链接效率。经  $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $-45^\circ$  偏振片起偏调整的 RGB 三色合束信标光,携带着载体平台的旋转姿态角信息,经自由空间传输后由地面接收系统解耦。接收端利用光电探测器获得信标光的三色光强值,根据三色光强值的差动、比值构造特征参数  $\beta$ ,建立信标光旋转角  $\theta$  与特征参数  $\beta$  间的关联曲线,利用该曲线反演载体平台的空间旋转角信息。分析  $\theta$  在  $0^\circ \sim 90^\circ$  的变化趋势及  $\beta$  的数值结果,并对不同距离下的测量结果进行误差分布分析。实验表明,所反演的信标空间姿态角度测量精度可以达到  $\pm 0.05^\circ$ 。室内实验结果的  $3\sigma$  值小于  $0.5^\circ$ ;室外实验结果的  $3\sigma$  值小于  $1^\circ$ 。综合整体性能分析,所提方法具有测量运动平台空间旋转姿态角的能力,可用于在浮空平台或类似领域中进行姿态角度测量。

**关键词** 测量;量子光通信;偏振激光;空间旋转角;三维姿态;光电探测器

**中图分类号** TN29

**文献标志码** A

**DOI:** 10.3788/CJL202249.1804001

## 1 引言

量子光通信是信息学、物理学及计算机科学中的前沿交叉领域。作为量子科学的重要分支,量子光通信以其安全性高、物理保密性好等优点,受到各国政府和科研人员的重视,获得了广泛关注和大量的科研投入<sup>[1-2]</sup>。目前包括中国在内的几个科技大国均完成了星地量子光通信实验,为量子光通信的实用化奠定了基础<sup>[3-4]</sup>。自由空间量子光通信中,在信标光的发射端与接收端之间,信标旋转角度即偏振基矢角度的保持和检测是保证自由空间运动平台下量子光通信成功的关键。如何获得运动平台上信标光发射端的旋转角度,并有效利用有限的光链路,从中获取目标的姿态信息,是未来低成本移动量子光通信的难点技术之一<sup>[5]</sup>。

目前,国内外学者从不同角度对这一问题进行了研究,从硬件或算法层面对信标旋转角度即偏振基矢角度的测量和检测精度提升进行了分析。2013年,Hinks等<sup>[6]</sup>验证了从光强曲线数据观察空间物体姿态

的可能性,但使用的方法受到探测物体表面亮度、材料、形状等因素的影响,测量精度不高。2015年,王超等<sup>[7]</sup>使用 ZEMAX 软件对一个特定的星地激光通信发射光学系统进行了偏振特性分析,给出了线偏振激光在系统传播中偏振退化的影响因素,对空间光通信系统的光路硬件设计提出了改进方案。2018年,Lei等<sup>[8]</sup>定义了一种“沙漏”强度分布图案,用多种联合算法处理图像数据,在实验中测量标准石英板的偏振方向,实测精度优于  $0.01^\circ$ ,但该方法的测量环境要求高,对噪声敏感,若图像尺寸大则需要较长的时间处理数据,不适合实时测量。2020年,Roy等<sup>[9]</sup>采用叠加不相关散斑图案的方案,使用其中一个散斑图案具有固定偏振方向的先验知识,实时测量偏振矢量旋转,但由于结构设计和测量原理的限制,其实验结果的分辨率最高为  $1^\circ$ 。2018年,Xu等<sup>[10]</sup>设计了一种条形亚波长径向偏振光栅,将偏振光偏振面的旋转直接转换为光斑的水平移动,相邻单元格栅决定的分辨率为  $30''$ ,测量范围为  $\pm 50^\circ$ ,测试表明相对误差保持在  $1\%$  以

**收稿日期:** 2021-10-12; **修回日期:** 2022-01-07; **录用日期:** 2022-01-24

**基金项目:** 国家自然科学基金天文联合基金(U1831133)、中科院空间主动光电技术重点实验室开放基金(2021ZDKF4)、上海航天科技创新基金(SAST2017-062)

**通信作者:** \*snowyhm@sina.com

内,但光栅的制备复杂且耗时长,环境条件要求高。在 2020 年和 2021 年, Yang 等<sup>[11]</sup> 和 杨江涛等<sup>[12]</sup> 以大气散射原理为基础,针对观测点与太阳的相对位置探测提出了不同的偏振角度的数值解方法,前者采用了高斯-牛顿迭代的自适应偏振角度计算方法,后者采用了 K 均值聚类算法,但前者受限于算法参数的选择,后者受限于鱼眼镜头的使用,测量结果仍会出现误差大小分布不均的现象,稳定性有待提高。在 2015 年和 2021 年, Cao 等<sup>[13]</sup> 和 Huang 等<sup>[14]</sup> 将法拉第效应运用到测量旋转角当中,磁光调制的测量结果受外界温度和激光器模式的影响较小,但测量的角度范围有限。2021 年, Chen 等<sup>[15]</sup> 制备了通过 1/4 波片增强灵敏度的滚动角测量传感器,结合 Stokes 分量及 Muller 矩阵信息,使得测量范围达到了 180°, 分辨率达到了 0.006°, 测量误差在 ±0.3° 以内。此外, 马艳娥等<sup>[16]</sup> 进行了光通信传输链路中的误差因素分析,确认了大气湍流强度、背景光强度、高斯光束发散角大小均对传输质量存在不同程度的影响。张建强等<sup>[17]</sup> 采用分布相位屏的方法对不同阶次的矢量光束在不同强度的大气湍流中传输的 Stokes 矢量、闪烁指数、光束重心径向偏移量

开展仿真分析,发现径向偏振矢量光束表现出了更好的大气湍流抗性,为建立更高效的光链路做出了筛选。

针对上述研究的不足,本文通过精简光路设计,提出了一种偏差自补偿的光学方法,利用由红(R)、绿(G)、蓝(B)三色光携带不同偏振角信息的合束信标光束,对携带载体平台的旋转姿态角度进行解耦测量,引入差分、比值的概念,构造参数  $\beta$ , 建立信标旋转角与特征参数间的  $\theta$ - $\beta$  曲线。以一种映射关系来处理光电探测器得到的三路偏振光所携带的角度信息,达到反演信标光载体平台空间旋转角信息的目的。本方法一定程度上减少了环境引入的干扰误差,扩大了信标旋转角度测量的应用场景,实现了系统的设计目标。

## 2 系统测量原理

### 2.1 系统硬件构成

本测量系统主要包括三个部分,分别是信标光产生装置、信标光探测解耦装置及信息处理终端,具体如图 1 所示。光路及探测部分主要由三色激光发射器、二向色镜、起偏器、补偿波片、扩束透镜组、检偏器、旋转台、凸透镜、光电探测器及电路控制板组成。

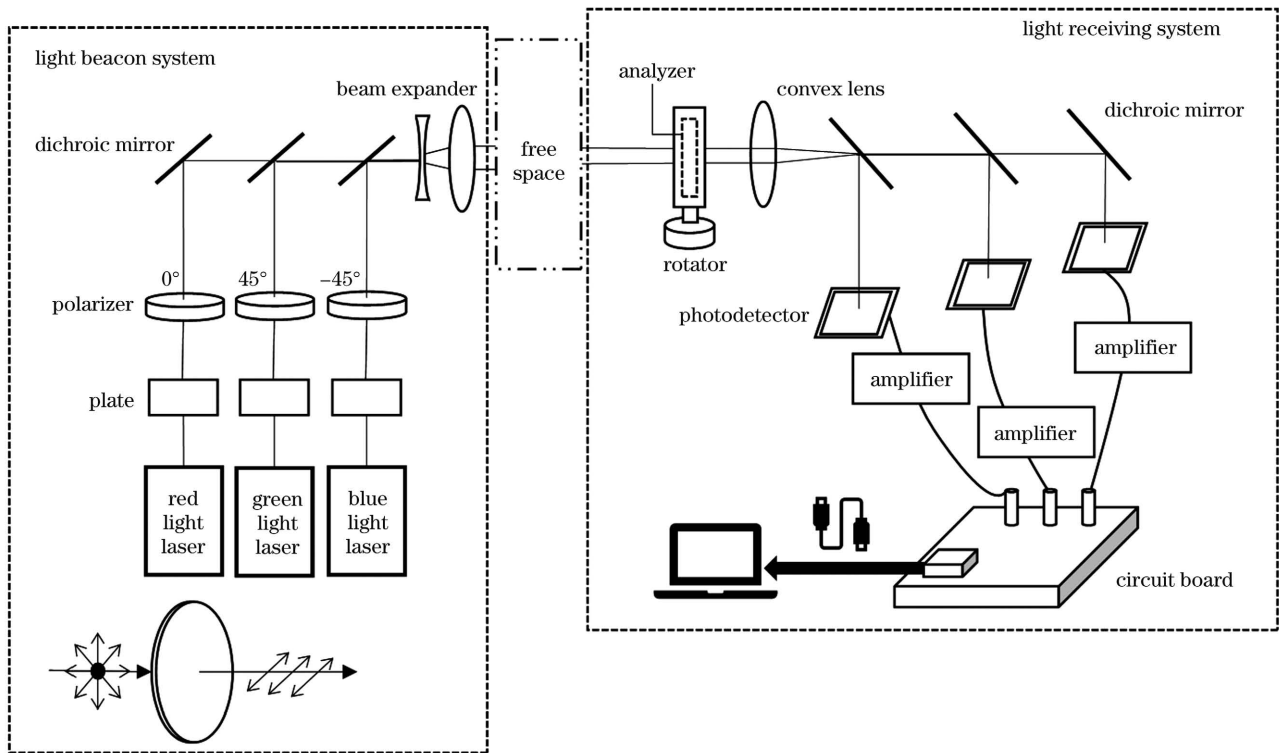


图 1 测量系统硬件组成示意图

Fig. 1 Schematic diagram of hardware components of the measurement system

从图 1 可以看出,三色激光发射器、二向色镜、起偏器、补偿波片和扩束透镜组组成了信标光产生部分。激光发生器搭载三个通道,从左至右分别对应红、绿、蓝,三个通道前固定不同偏振角度的偏振片,红光对应 0° 偏振角,绿光对应 45° 偏振角,蓝光对应 -45° 偏振角。二向色镜调整光路,反射特定波长的光,使其偏转 90°。在光束发射端的最后是扩束透镜组,用于将出射

光斑放大,后续解耦装置接收到的是扩大后光斑的一部分。选择接收部分光斑减少了光路对准的操作,精简了光路设计。

光束在自由空间传播过程中不可避免地会产生退偏现象,偏振片相对角度的偏差  $\Delta\theta$ 、镜片镀膜和其他因素使得入射偏振光束呈现近似椭圆偏振光的偏振状态,成为实验误差的主要来源之一<sup>[18]</sup>。为了补偿这个

偏差,使用 Stokes 参量对三个不同起偏角度的通道进行偏振状态的测量。利用下式比对测量到的 Stokes 参量与理论计算的 Stokes 参量:

$$I^2 = \sum_{i=1}^n \sum_{p=0}^3 \frac{1}{t} [S_p^o - S_p^c(\Delta\theta | \chi = \chi_j)]^2, \quad (1)$$

式中: $n$  表示实验的测量数;上标  $o, c$  分别表示测量到的和计算预测的 Stokes 分量;下标  $p$  表示第  $p$  个 Stokes 分量; $\chi_j$  表示偏振角状态, $j = -45^\circ, 0^\circ, 45^\circ$ 。

当  $I^2$  达到最小值时,确定  $\Delta\theta$  的结果,作为补偿波片设置的补偿值放置在光路中<sup>[17,19]</sup>。

信标光解耦部分包括旋转台、检偏器、会聚透镜、二向色镜、光电探测器及电路控制板。三束激光在一段自由空间内合束后,照射到检偏器上。检偏器固定在一电机驱动的旋转台上,如图 2 所示,旋转台上分度盘的最小分辨角度为  $1'$ ,旋转范围为  $0^\circ \sim 360^\circ$ 。旋转台由图 3 所示的电机驱动控制板驱动,可按照需要的转动时间及转动角度进行设置。考虑信标光产生装置和检偏器之间的相对运动关系,将检偏器设置为旋转一周的运动状态可以大幅度减少光路因器件装配中心不准所产生的误差,从而提高实验的准确性。

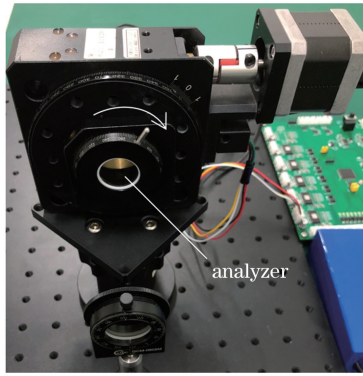


图 2 搭载检偏器的旋转台

Fig. 2 Rotator with analyzer assembled

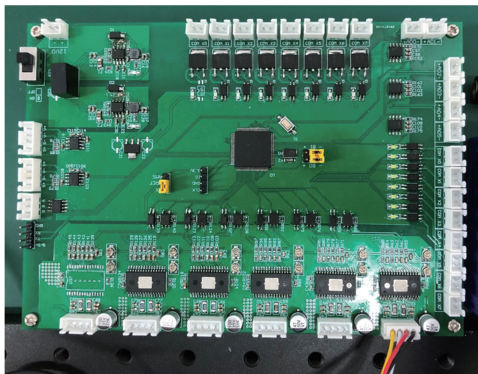


图 3 电机驱动控制板

Fig. 3 Motor drive control board

信标光解耦部分中的二向色镜从左至右分别为反蓝光、反绿光、反红光的镀膜光学器件。对应三种光束的位置,有三个光电探测器进行光强值的探测,光强值用于后续的旋转角度系数的计算。光电探测器分别配有光强-电压转换放大电路,通过数据采集卡将数据传

输至信息处理终端进行后续的数据处理。

## 2.2 系统检测方法

在如图 1 所示的 RGB 三通道空间目标姿态传递系统中,可以利用琼斯矩阵来描述信标光的偏振以及姿态信息的传递过程。用  $\mathbf{R}$  表示反射型器件的琼斯矩阵, $\mathbf{T}$  表示透射型器件的琼斯矩阵。三通道的光最终进入光电探测器的表达式为  $\mathbf{E}_{PD}$ :

$$\mathbf{E}_{PD} = \mathbf{R}_{M2} \cdot \mathbf{T}_{CL} \cdot \mathbf{T}_A \cdot \mathbf{T}_{FS} \cdot \mathbf{T}_{BE} \cdot \mathbf{R}_{M1} \cdot \mathbf{T}_{Pol} \cdot \mathbf{T}_{Plate}, \quad (2)$$

式中:右侧各系数均为系统中各光学器件的琼斯矩阵,下标  $M2$  表示接收系统中的二向色镜; $CL$  表示会聚透镜; $A$  表示检偏器; $FS$  表示自由空间; $BE$  表示扩束透镜; $M1$  表示出射光系统中的二向色镜; $Pol$  表示起偏器; $Plate$  表示补偿波片。

若所要探测的载体平台由于运动而产生了扭转,则三色信标光会出现偏振角的变化,使得扩束透镜组  $AL$  的出射光矢量坐标系  $p-s$  与自由空间  $FS$  的坐标系  $X-Y$  产生偏差。对于偏振光的变化,可以用光电探测器测量其强度分布变化来直观地表征。偏振基矢角的变化过程可用下式描述:

$$\mathbf{E}_{FS}^{XY} = \begin{bmatrix} \cos \psi & \sin \psi \\ -\sin \psi & \cos \psi \end{bmatrix} \cdot \mathbf{E}_{ALO}^{ps}, \quad (3)$$

式中: $\psi$  为所探测的载体平台相对 RGB 合束信标光旋转所产生的偏振基矢角变化值; $\mathbf{E}_{FS}^{XY}$  表示入射到  $X-Y$  坐标系的自由空间光矢量; $\mathbf{E}_{ALO}^{ps}$  表示从扩束透镜组出射的  $p-s$  坐标系光矢量。

为了定量评价三个通道在不同角度偏振光照射下探测到的光信号强度变化,定义在位于旋转角  $\theta_i (i=0, 1, \dots, 360)$  的光通道被偏振角  $\chi_j (j = -45^\circ, 0^\circ, 45^\circ)$  的线偏振光照射后,探测到的强度值的标准差为  $\sigma_j(\theta)$ :

$$\sigma_j(\theta) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [I(\chi = \chi_j | \theta = \theta_i) - \mu_j(\theta)]^2}, \quad (4)$$

式中: $\mu_j(\theta)$  代表偏振强度的平均值,

$$\mu_j(\theta) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [I(\chi = \chi_j | \theta = \theta_i)]. \quad (5)$$

物体在空间内旋转,其偏振光的强度变化符合马吕斯定律。在此基础上,用拟合函数表示的强度分布曲线可以定义为

$$I(\alpha) = \overline{L} [1 + M \cdot \cos^2(\alpha + \Delta\varphi)] = \overline{L} + L_m \cdot \cos^2(\alpha + \Delta\varphi), \quad (6)$$

式中: $\alpha$  是入射线偏振光的光振动方向和偏振片偏振化方向之间的夹角; $\overline{L}$  为平均光强度; $M$  为调制系数; $L_m$  为调制强度,且有  $L_m = \overline{L} \cdot M$ ; $\Delta\varphi$  代表入射光线经过光学系统在传播过程中所产生的相位偏差。

在实际应用中,需要考虑透镜镀膜、大气湍流、环境光等多种因素。虽然得到的出射光强曲线仍旧是一

条余弦曲线,但其包含的物理意义是多种外界因素的综合结果。利用这条余弦曲线的周期性特点,提出用强度比来表征物体在空间的旋转角度,同时强度比的概念也可以在一定程度上保证发射端与接收端之间的偏振基矢统一。

构造参数  $\beta$  使用了差分 and 比值的概念。差分是一种常见的数据处理方式,简单来讲,就是在一系列以时间序列排序的数据中,用后一个数据减去前一个数据

的操作。差分的作用是减轻数据之间的不规律波动,使曲线更加平稳。将构造的变量做比值处理是为了减轻测量环境所造成的误差。

参数  $\beta$  的具体计算流程如图 4 所示。图 4 中  $I(i, R), I(i, G), I(i, B)$  表示从数据采集卡中获取并经过预处理的三色光强数据,  $a, b$  表示差分处理后的参数。将  $a, b$  进行大小比较,并进行相应的计算,便得到初始  $\beta_{ori}$ 。

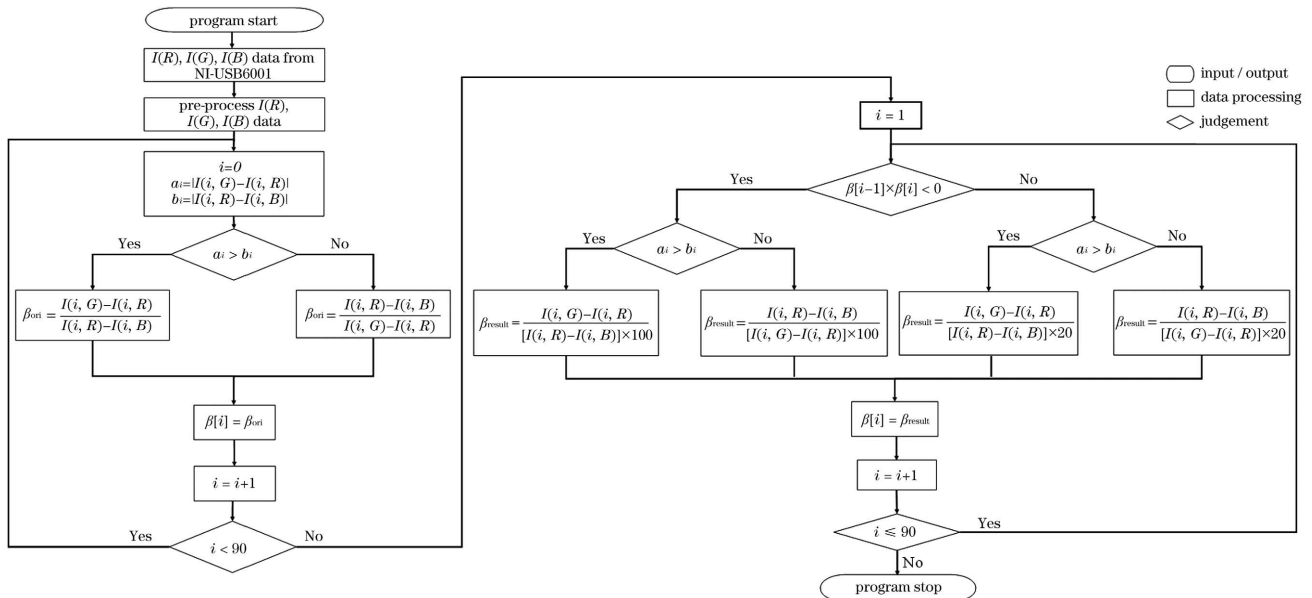


图 4 计算  $\beta_i$  流程图

Fig. 4 Flow chart for calculating  $\beta_i$

理想状态下,  $\beta_{ori}$  的计算结果如图 5 所示。在  $\beta_{ori}$  曲线中存在跳变幅度大的突变点。一方面,突变点的存在有利于辨识对应的旋转角;另一方面,突变点对应着  $\beta_{ori}$  计算过程中分式中的分母  $|I(i, G) - I(i, R)|$  或  $|I(i, R) - I(i, B)|$  极小的情形,而探测器对于极小值的探测结果是不稳定的,当分母有 0.01 量级的变化时,反映在  $\beta$  上会产生 100 倍的变化,导致巨大的偏差。因此,需要对局部的突变点进行优化计算。

根据测量原理及实际数据规律的验证,选取  $\beta_{ori}$

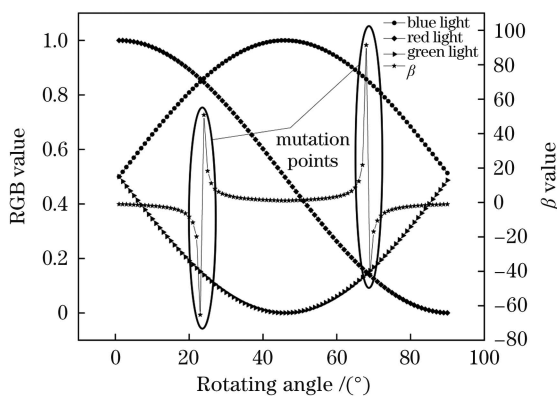


图 5 理想状态下,三色光强与  $\beta_{ori}$  对应图

Fig. 5 Correspondence between the three-color light intensity and  $\beta_{ori}$  under ideal condition

曲线上正负值变换处加入优化因子  $m = 100$  进行运算,以调整因分母值过小而带来的极大误差。此外,在  $\beta_{ori}$  曲线中的其余部分加入优化因子  $m = 20$  加以调整,使最终的  $\beta_{result}$  处于合适的范围内。

本测量系统的数据处理流程由图 6 所示。系统对载体平台进行 RGB 三通道测量,得到三组原始数据。首先需要对原始数据进行滤波处理,去除测量过程中的噪声,平滑数据,并进行归一化处理,以去除量纲对数值的影响,使三通道数据的大小范围变换到  $[0, 1]$ 。下一步,通过三色光强之间的大小关系,可以初步确定物体旋转角度的范围。更进一步地,用上文描述的  $\beta$  计算方法得到精细的角度结果,实现从光强到旋转角度的测量计算过程。其中,由于实际情况下会有多种误差因素综合影响,最主要的是相位差,故在精密到  $0.1^\circ$  及更小的量级时,确定旋转角度范围对准确性的要求更高。更精细的角度计算及误差修正项还在进一步研究当中。

### 3 旋转姿态测试的数据仿真及验证结果

#### 3.1 仿真模型的建立

根据前述内容建立了理想 RGB 模型,并根据式(6)构造了三条有规定相移的曲线,代表红、绿、蓝三

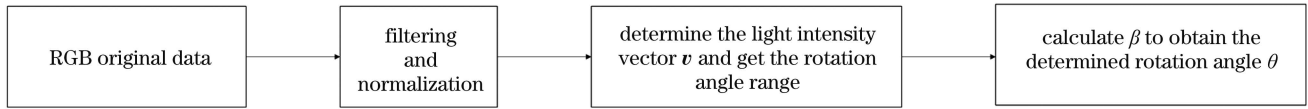


图 6 数据处理流程

Fig. 6 Data processing flow

色光在旋转 360°后的结果。为了使结果不受量纲的影响,同时考虑观察的便利,做了数据归一化处理,使光强数据在[0,1]范围之内。0°~90°的  $\beta_{\text{result}}$  仿真结果如图 7 所示。

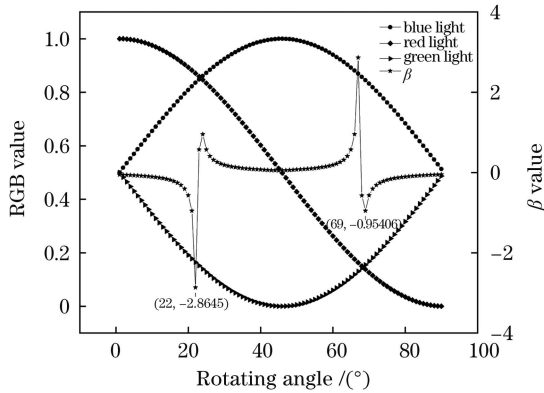


图 7 理想状态下,三色光强与  $\beta_{\text{result}}$  对应图

Fig. 7 Correspondence between the three-color light intensity and  $\beta_{\text{result}}$  under ideal condition

将  $\beta$  参数与归一化的三色光强结合,并取  $\theta$  范围  $[0^\circ, 90^\circ]$ ,从图 7 中可以看到  $\beta_{\text{result}}$  曲线具有一定的规律性。取  $\theta = 22^\circ, 45^\circ, 69^\circ$  作为特征点,进行角度范围的划分。表格中第一列的算式结果若大于零,则记为 1;若小于或等于零,则记为 0。若得到光强向量  $\mathbf{v} = (1, 1, 1)$  就说明物体旋转角度  $\theta \in (0^\circ, 22^\circ)$ ,以此类推。这样以光强向量表示角度区间的方式,主要是为了在

表 1 光强向量与角度对应表

Table 1 Correspondence table between light intensity vector and rotation angle

Category	0°	(0°, 22°)	[22°, 69°)	[69°, 90°)	90°
$I(R) - I(G)$	1	1	1	0	0
$I(B) - I(G)$	0	1	1	1	0
$I(R) - I(B)$	1	1	0	0	0

同一  $\beta$  值的情况下有效区别角度值  $\theta$ ,以免出现一个  $\beta$  值对应多个角度值  $\theta$  的问题。

### 3.2 实验验证及结果分析

为了测试  $\beta$  曲线的适用性,建立了 RGB 合束信标光旋转姿态解耦测量系统,如图 8 和图 9 所示。在实验室内进行了三个距离下的多次测量。以激光器的出射端位置为起点,并规定分束镜的位置为终点,三个距离分别为 0.5 m、1 m 和 1.5 m。在室外进行了距离为 8 m 的验证实验。

实际测量时,在室内距离为 0.5 m、1 m 和 1.5 m 的情况下,对每个距离进行 5 次重复实验,各通道激光取平均值,再进行  $\beta$  的计算处理,得到  $\theta \in [0^\circ, 90^\circ]$  的结果如图 10 所示。呈现的实验结果与理论值相比具有一致性。在  $\theta = 22^\circ, 23^\circ, 24^\circ, 67^\circ, 68^\circ$  这几个位置上,实验值存在相对较大的误差,其余位置的精度均比较高,误差不大于 0.0012。这五个存在较大误差的角度值符合估计,即在  $\theta = 22^\circ, 69^\circ$  这两个位置附近,因为仍存在退偏现象,导致相位提前或滞后产生  $\beta$  突变点。从图 11 所示误差曲线可以分析出,室内相对室外来讲数值更符合理想状态,误差相对更小。误差包含了两方面的因素:一是测量结果的随机性,由测量时的背景光、气压、温度等随机性因素导致,由于  $\beta$  的计算方式,此类原因导致的误差数值普遍较小;二是光路结构和光学器件导致相位发生偏差,使三色光之间的相位状态发生偏差,用于计算的光强值错位,此类原因导致的误差通常数值都较大。

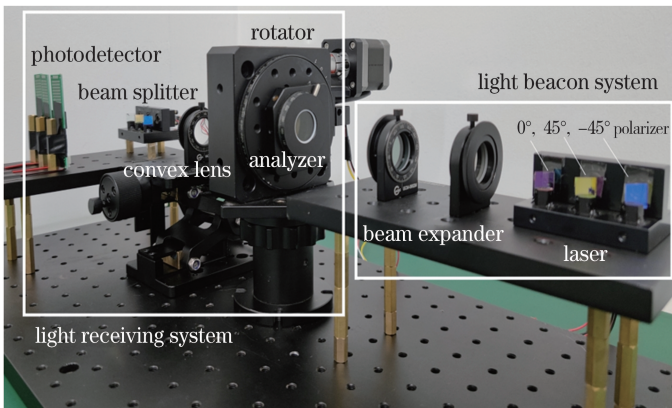


图 8 测量系统图

Fig. 8 Measurement system

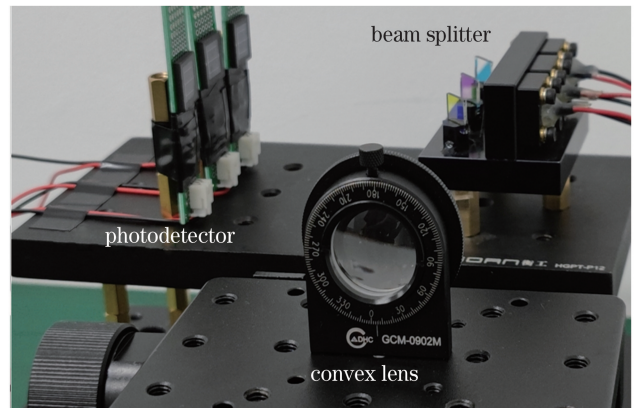


图 9 光束接收端图

Fig. 9 Light receiving system

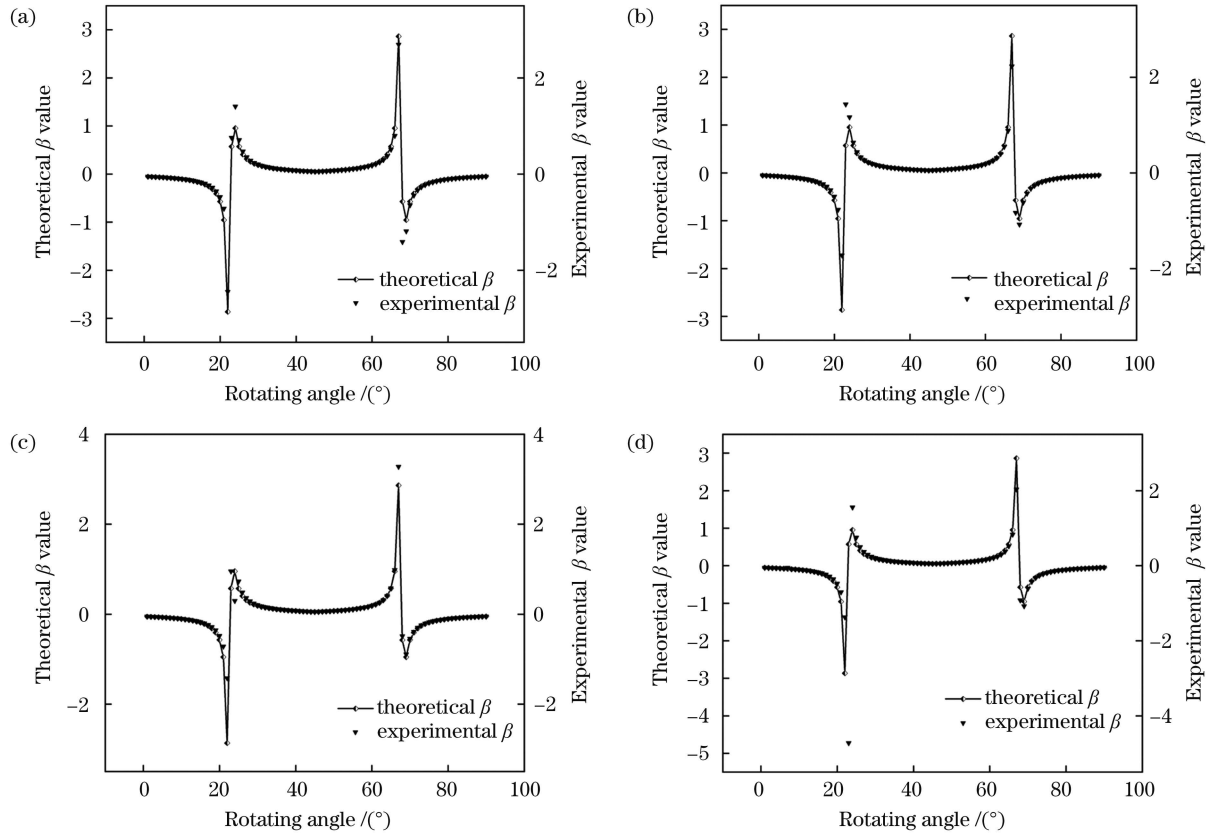


图 10 不同距离下实验值与理论值的对比。(a) 0.5 m; (b) 1 m; (c) 1.5 m; (d) 8 m

Fig. 10 Comparison of experimental and theoretical values at different distances. (a) 0.5 m; (b) 1 m; (c) 1.5 m; (d) 8 m

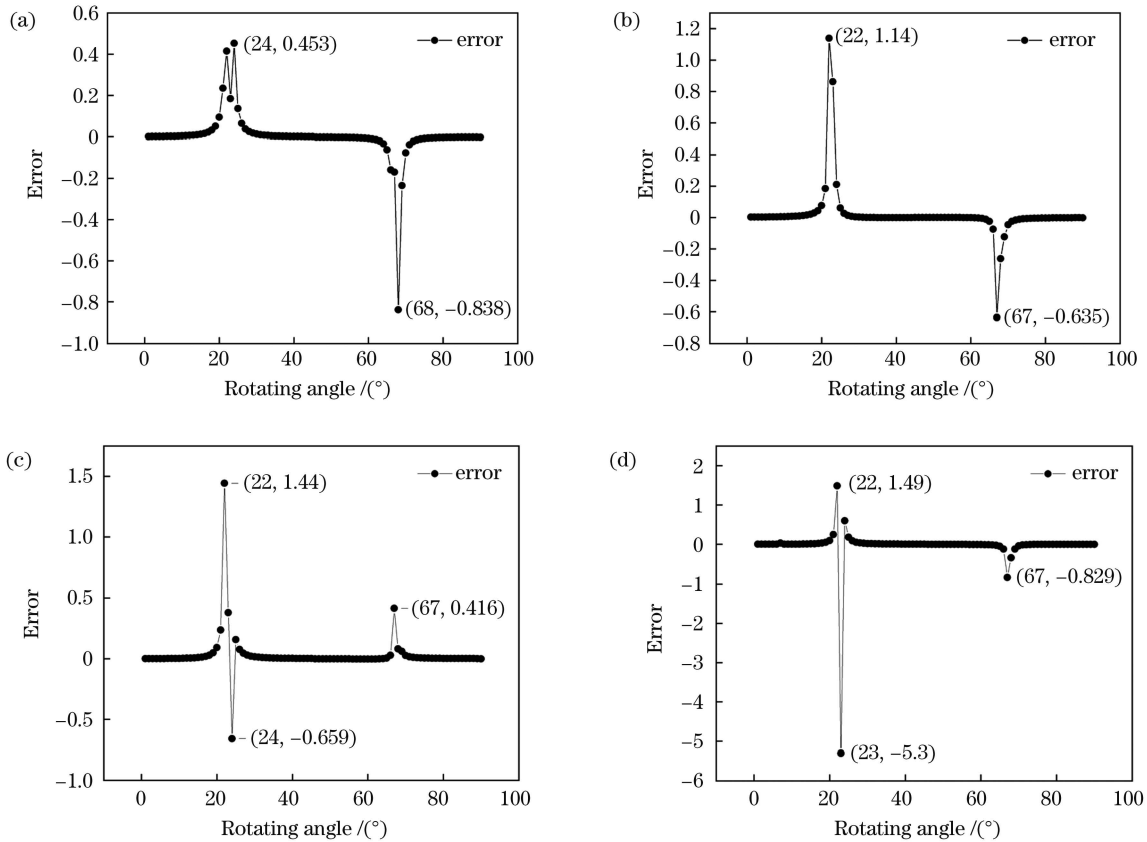


图 11 不同距离下实验值误差曲线。(a) 0.5 m; (b) 1 m; (c) 1.5 m; (d) 8 m

Fig. 11 Experimental value error curves at different distances. (a) 0.5 m; (b) 1 m; (c) 1.5 m; (d) 8 m

图 12 所示为 0.5 m 和 8 m 这两个距离下的实验误差直方图。从图 12 可以看出,无论距离远近,实验误差均服从正态分布。在室内实验距离为 0.5 m 时,误差的最高频率范围在 0.25~0.5 之间,次数为 45;在室外距离为 8 m 时,误差的最高频率范围在 -0.5~-0.25 之间,次数为 44。为了进一步分析实验结果,对理论值和

测量结果进行了详细的误差分析,各项误差特性指标如表 2 所示。从表中可以得到,室内测量结果的波动小于室外测量结果的波动。当测量条件为室外 8 m 距离时,其误差分布更广、更分散,且倾向于比理想值小。综上所述,实验系统整体平均误差较低,实验结果与仿真结果的拟合程度较高,说明所提出的方案是切实可行的。

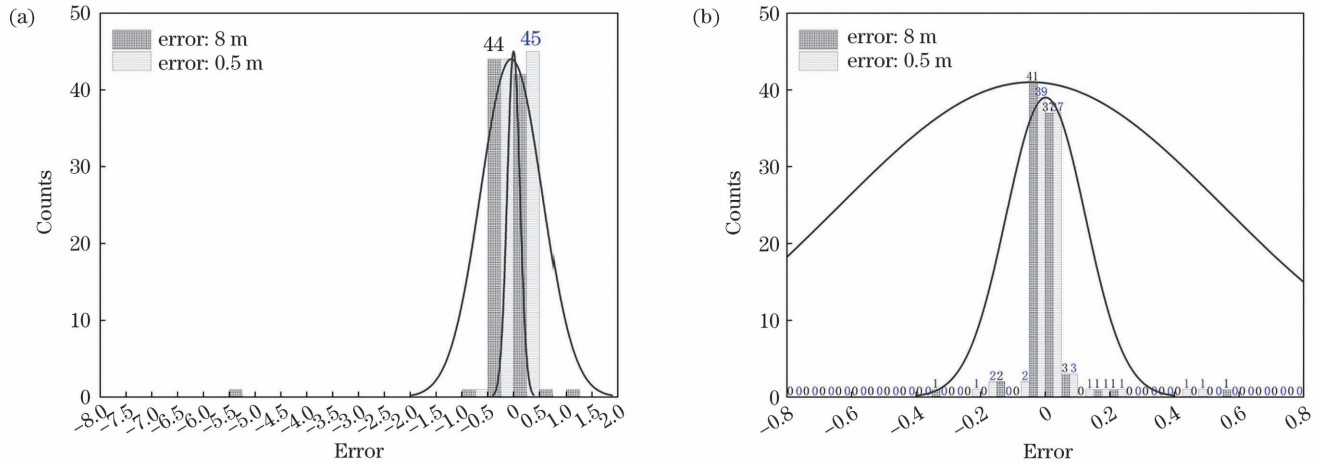


图 12 0.5 m 和 8 m 两个距离下的误差直方图。(a)实验误差直方图;(b)局部放大

Fig. 12 Error histogram at two distances of 0.5 m and 8 m. (a) Experimental error histogram; (b) partial enlarged histogram

表 2 误差特性指标

Table 2 Error characteristics indices

Distance /m	Average error /( $^{\circ}$ )	Average relative error /%	Variance /( $^{\circ}$ )	Standard deviation /( $^{\circ}$ )	$3\sigma$ /( $^{\circ}$ )
0.5	0.00133	2.34	0.01496	0.12231	0.36693
1.0	0.01673	1.10	0.02925	0.13804	0.41412
1.5	0.03019	-0.93	0.03220	0.14946	0.44838
8.0	-0.04332	-9.89	0.35350	0.31687	0.95061

## 4 结 论

本方法以规定起偏角度的红、绿、蓝三色信标光为载体,对空间运动平台进行旋转姿态角解耦测量。引入了差动、比值的思想,构造了  $\theta$ - $\beta$  关联曲线,为偏振光应用于旋转姿态角解耦提供了直观的数值仿真结果。在不同测量环境的实验中,均能维持较稳定的高精度测量结果。反演计算得到的信标空间姿态角度精度为  $0.05^{\circ}$ ,在室内条件下  $3\sigma$  为  $0.5^{\circ}$ ,在室外条件下  $3\sigma$  为  $1^{\circ}$ 。将不同测量条件下的测量结果进行了误差指标的计算,验证了 RGB 合束信标光解耦旋转姿态角的可行性。本方法对环境稳定性依赖小,测量装置复杂度低,且实验数据计算负担轻,基于实验结果可以有效测定运动平台的旋转姿态角度。目前测量系统在相位补偿方面还有待提高,通过进一步的相位补偿可以提升测量的分辨率以及实现更精细的误差修正,满足更高精度的动态测量需要。

## 参 考 文 献

[1] 张倩,李文字. 全球量子信息技术创新发展研究[J]. 信息通信技术与政策, 2020(12): 81-85.

Zhang Q, Li W Y. Insights into the development of global quantum information innovation [J]. Information and Communications Technology and Policy, 2020(12): 81-85.

[2] 董怡雯. 量子通信技术现状与应用前景分析[J]. 通讯世界, 2020, 27(6): 73-74.

Dong Y W. Analysis of the current situation and application prospects of quantum communication technology [J]. Telecom World, 2020, 27(6): 73-74.

[3] Vallone G, Dequal D, Tomasin M, et al. Satellite quantum communication towards GEO distances [J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9900: 99000J.

[4] 张子玄,贾建军,强佳,等. 基于空频域特征的白天星地信标光跟踪算法[J]. 中国激光, 2019, 46(2): 0206004.

Zhang Z X, Jia J J, Qiang J, et al. Daytime satellite-to-ground beacon tracking algorithm based on spatial and frequency domain features [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(2): 0206004.

[5] 杨海马,马彩文,王建宇,等. 量子光通信中偏振光空间姿态传递[J]. 光子学报, 2015, 44(12): 1227002.

Yang H M, Ma C W, Wang J Y, et al. The transmission of polarized light of space attitude in quantum communication [J]. Acta Photonica Sinica, 2015, 44(12): 1227002.

[6] Hinks J C, Linares R, Crassidis J L. Attitude observability from light curve measurements [C]//AIAA Guidance, Navigation, and Control (GNC) Conference, August 19-22, 2013, Boston, MA. Virginia: AIAA Press, 2013: 5005.

[7] 王超,江伦,董科研,等. 星地激光通信系统偏振特性分析[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(12): 120607.

Wang C, Jiang L, Dong K Y, et al. Analysis of the polarization

- characteristic of a satellite-to-ground laser communication optical system[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(12): 120607.
- [8] Lei B, Liu S G. Efficient polarization direction measurement by utilizing the polarization axis finder and digital image processing [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(12): 2969-2972.
- [9] Roy A, Singh R K, Brundavanam M M. Non-invasive tracking of polarization rotation from speckle contrast using uncorrelated speckle patterns[J]. *Journal of Optics*, 2020, 22(12): 125603.
- [10] Xu Q F, Xie N, Wang D J, et al. A linear optical current transducer based on Newton's ring sub-wavelength grating[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2018, 18(17): 7041-7046.
- [11] Yang T, Wang X, Pu X K, et al. Adaptive method for estimating information from a polarized skylight [J]. *Applied Optics*, 2021, 60(30): 9504-9511.
- [12] 杨江涛, 王健安, 王银, 等. 基于大气偏振模式的三维姿态角解算方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(22): 221107.  
Yang J T, Wang J A, Wang Y, et al. Calculation method of three-dimensional attitude angle based on atmospheric polarization pattern [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(22): 221107.
- [13] Cao J H, Jia H Z. Large optical rotation angles measurement using frequency spectrum analysis[J]. *Optik*, 2015, 126(20): 2433-2435.
- [14] Huang Y F, Xu Q F, Xie N, et al. A linear optical current transducer implemented with a strip aluminum polarization grating[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(6): 7532-7540.
- [15] Chen C W, Hartrumpf M, Längle T, et al. Sensitivity enhanced roll-angle sensor by means of a quarter-waveplate [J]. *Tm-Technisches Messen*, 2021, 88(s1): s48-s52.
- [16] 马艳娥, 李剑, 成慧翔. 光通信信息传输误差影响因素的筛选和建模研究[J]. *激光杂志*, 2021, 42(5): 83-87.  
Ma Y E, Li J, Cheng H X. Research on screening and modelling of influencing factors of optical communication information transmission error[J]. *Laser Journal*, 2021, 42(5): 83-87.
- [17] 张建强, 翟焱望, 付时尧, 等. 径向偏振矢量光束在大气湍流下的传输分析[J]. *光学学报*, 2020, 40(11): 1101001.  
Zhang J Q, Zhai Y W, Fu S Y, et al. Propagation properties of radially-polarized vector beams under a turbulent atmosphere [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(11): 1101001.
- [18] 南妮娜. 偏振激光在湍流大气传输中的退偏特性[D]. 西安: 西安工业大学, 2013: 42-44.  
Nan W N. Depolarization properties of polarized laser beams propagating through turbulent atmosphere [D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2013: 42-44.
- [19] Zhang S, Jiang H, Gu H G, et al. Attitude metrology based on the field-of-view effect of birefringence using high-speed polarimetry[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(7): 2074-2077.

## Decoupling Measurement of Optical Rotational Attitude of RGB Ensemble Beacons

Yang Haima<sup>1,2\*</sup>, Jin Yan<sup>1</sup>, Qiang Jia<sup>2,4</sup>, Liu Jin<sup>3</sup>, Li Jun<sup>1</sup>, Zhang Dawei<sup>1</sup>,  
Huang Yuanshen<sup>1</sup>, Yu Yong<sup>5,6</sup>

<sup>1</sup> College of Optoelectronic Information and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

<sup>2</sup> Key Laboratory of Space Active Opto-Electronics Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

<sup>3</sup> College of Electronic and Electrical Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China;

<sup>4</sup> Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

<sup>5</sup> Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China;

<sup>6</sup> School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

### Abstract

**Objective** As an important branch of quantum science, quantum optical communication has gained a lot of attention and investment in scientific research worldwide due to its advantages of high security and good physical confidentiality. In free-space quantum optical communication, the maintenance and detection of the beacon rotation angle between the transmitter and receiver of the beacon light is the key to ensure the success of quantum optical communication in the free-space motion platform. How to obtain the rotation angle of the beacon light transmitter on the moving platform and effectively use the limited optical link to obtain the attitude information of the target is one of the difficult technologies for low-cost mobile quantum optical communication in the future. The existing techniques for measuring the rotation angle of beacon light are limited by a variety of factors such as the large error of the measurement system caused by the construction of hardware equipment and the limited range of angle measurement, and the debugging of parameters in the angle calculation method using adaptive iteration has a large impact on the experimental results. In this paper, by streamlining the optical path design, an optical method of deviation self-compensation is proposed. A combined beacon beam is obtained using red (R), green (G) and blue (B) three-color light carrying different polarization angle information. The concepts of difference and ratio are introduced to construct the parameter  $\beta$  to calculate the three-color light intensity. Finally, the  $\theta$ - $\beta$  relation between the beacon rotation angle  $\theta$  and the characteristic parameter  $\beta$  is established. In this way, we decouple the measurement of the rotational attitude angle of the platform. To some extent, the scheme we propose can reduce the interference error introduced by the environment, expand the application scenario of beacon rotation angle measurement, and achieve the design goal of the system.

**Methods** In this paper, the red, green and blue combined beacon light adjusted by  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  and  $-45^\circ$  polarizer start



biases is designed to carry the rotational attitude angle information of the carrier platform. After the free-space transmission, the combined beacon light is decoupled by the ground receiving system and the three-color light intensity value of the beacon light is obtained at the receiving end using three photodetectors. The schematic diagram of the measurement system is shown in Fig. 1. The data processing flow of this measurement system involving four main steps (Fig. 6). The system performs RGB three-channel measurement on the carrier platform, and three sets of raw data will be obtained. First, the raw data need to be filtered to remove the noise in the measurement process and to be normalized to eliminate the influence of the magnitude on the values. In the next step, the magnitude relationship between the three-color light intensity values can be used to initially determine the range of the object rotation angle. Further, the characteristic parameter  $\beta$  is constructed according to the difference and ratio of the three-color light intensity values, and the calculation process of  $\beta$  is represented in Fig. 4 to establish the  $\theta$ - $\beta$  relation curve between the beacon light rotation angle  $\theta$  and the characteristic parameter  $\beta$ . In this way, fine angle results are obtained, realizing the measurement and calculation process from light intensity value to rotation angle.

**Results and Discussions** According to Malus law, the light intensity model of the scheme is established as shown in Eqs. (4)–(6). The  $\theta$ - $\beta$  relation curve under ideal condition is shown in Fig. 7. To test the applicability of the curves, the RGB ensemble beacon optical rotational attitude decoupling measurement system was established, and multiple measurements were performed at different distances both in the laboratory and outdoors. The experimental results (Figs. 10 and 11) are consistent with the theoretical values in the measurement range of  $0^\circ$ – $90^\circ$ . In the positions of  $\theta = 22^\circ, 23^\circ, 24^\circ, 67^\circ, 68^\circ$ , there are relatively large errors in the experimental values, and the accuracy of the remaining parts is relatively high, with the error no more than 0.0012. This error contains two meanings. One is the randomness of the measurement results, caused by the background light, air pressure, temperature and other random factors at the time of measurement. This kind of error is generally small. The other comes from the phase deviation among three channels, which is caused by the optical path structure and optical devices and will lead to the false  $\beta$  calculation results. This kind of error will impact the measurement results more substantially than the former. We conducted a detailed error analysis of the theoretical values and measurement results, and the error characteristic indices are shown in Table 2. The spatial attitude angle accuracy of the beacon can be  $0.05^\circ$ , with  $3\sigma$  of  $0.5^\circ$  under indoor conditions and  $1^\circ$  under outdoor conditions. In summary, the overall average error of the experimental system is low, and the consistency between the experimental results and the theoretical results is high, indicating that the proposed scheme is practical and feasible.

**Conclusions** The method is based on the red (R), green (G), and blue (B) ensemble beacon light with specified starting angle of polarization to decouple the rotational attitude angle of a space motion platform. The idea of difference and ratio is introduced, and the correlation curves are constructed to provide intuitive numerical results for the application of polarized light to rotational attitude angle decoupling. The stable and high accuracy measurement results are maintained in the experiments of different measurement environments. The accuracy of the beacon spatial attitude angle can be up to  $0.05^\circ$ , with  $3\sigma$  of  $0.5^\circ$  under indoor conditions and  $1^\circ$  under outdoor conditions. The error indices of the measurement results under different measurement conditions are calculated to verify the feasibility of the optical decoupled rotational attitude angle of the RGB ensemble beacon. The method has little dependence on environmental stability, low complexity of the measurement device, and light burden of experimental data calculation. The current measurement system still needs to be improved in terms of phase compensation, which can improve the resolution of the measurement and the error correction effects to meet the requirements of higher precision dynamic measurement.

**Key words** measurement; quantum optical communication; polarized laser; spatial rotation angle; three-dimensional attitude; photodetector