

文章编号 1004-924X(2016)10-2424-08

## 用于星载激光通信终端的绝对式光电角度编码器

韩旭东<sup>1\*</sup>, 徐新行<sup>1</sup>, 刘长顺<sup>1</sup>, 于思源<sup>2</sup>

- (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;
2. 哈尔滨工业大学 可调谐激光技术国家级重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:**针对星上激光通信终端二维转台的精确控制,设计了实时测量转台旋转角度的专用型光电角度编码器。根据星载激光通信终端所需测角系统的设计指标,分别对光电角度编码器的码盘、指示光栅及光电信号的提取方法进行了设计和选择。其中,格林二进制绝对式编码结合高质量的电子学细分,实现了编码器 24 位的绝对角度测量;四象限矩阵编码方式有效地减小了码盘的径向尺寸;分体读数头式指示光栅较整周玻璃盘大幅度压缩了体积和重量。在室温条件下对安装在星载激光通信终端上的光电角度编码器进行了测角精度检测。结果表明:该测角系统的角度测量精度约为  $0.7''$  (优于  $1.0''$ )。激光通信终端设备的在轨稳定运行及捕获、跟踪和通信功能的正常发挥,进一步验证了所设计的光电角度编码器测角精度高、抗辐射能力强、工作可靠性高,满足星载激光通信终端设备的应用要求。

**关键词:**激光通信;光电角度编码器;绝对式角度编码器;角度测量;测量精度

**中图分类号:**TP212.12;TN929.1 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20162410.2424

## Absolute optical angle encoder used for laser communication terminal on satellite platform

HAN Xu-dong<sup>1\*</sup>, XU Xin-hang<sup>1</sup>, LIU Chang-shun<sup>1</sup>, YU Si-yuan<sup>2</sup>

- (1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
  2. National Key Laboratory of Tunable Laser Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)
- \* Corresponding author, E-mail: hanxd@ciomp.ac.cn

**Abstract:** To control precisely the 2D rotation stable of a laser communication terminal unit on the satellite platform, a special optical angle encoder was designed to measure the rotary angle of the 2D rotation stable to realize the close control of the terminal unit. The grating disk, index grating and a signal pick-up method were designed and chosen respectively on the basis of design requirements of angle measurement device in the laser communication terminal. An absolute type binary coding was combined with a high quality electronics dividing to implement 24 bit absolute angle measurement of the encoder, and a four quadrant matrix encoding was used to effectively reduce the radial size of encoder. Moreover, the parted reading head type indicating gratings were employed in the encoder to allow its

收稿日期:2015-06-04;修订日期:2015-08-01.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2011AA7031024G);吉林省自然科学基金资助项目(No. 201115123)

volume and weight to be smaller and lighter than that of the whole glass grating disk. The angle measurement precision of an optical angle encoder mounted on the satellite borne laser communication terminal unit was tested and analyzed after finely manufacturing, assembling and adjusting at a indoor temperature. The results show that precision of the designed encoder is about  $0.7''$  (is superior to  $1.0''$ ). The laser communication terminal unit on the satellite platform operates normally in orbit and completes capturing, tracking and communication of the signals, which verifies that the designed encoder is characterized by high precision, high resistance to radiation and high working reliability.

**Key words:** laser communication; optical angle encoder; absolute angle encoder; angle measurement; measurement precision

## 1 引言

卫星激光通信系统相比微波通信系统具有数据率高、保密性好、体积小、重量轻等优点,美国、欧空局、日本等国先后进行了星-地和星间激光通信试验<sup>[1-5]</sup>。我国于 2011 年由哈尔滨工业大学组织进行了首次星-地激光通信试验,成功实现了星地激光链路双向捕获、跟踪和通信试验<sup>[6-9]</sup>。

为了精确控制星上激光通信终端的二维转台,进而完成终端设备的捕获、跟踪和通信功能,需要采用角度测量系统对转台的旋转角度进行实时测量,并为电机控制提供反馈信号<sup>[10-13]</sup>。高精度绝对式光电角度编码器具有测量精度高、环境适应性强和易于集成等优点。星载激光通信终端采用的光电编码器码盘的粗码部分采用绝对式矩阵编码,中精码与精码部分采用空间错位移相的狭缝裂相方法进行编码,从而获得具有良好正交性和正弦特性的精码信号用于电子学细分。经过电子电路细分后,绝对式编码器的分辨率高达 24 位,地面测试结果显示系统的测角精度优于  $1.0''$ 。该光电角度编码器是国内首次采用大直径光学玻璃为基底制备航天级高精度光学码盘的一种新突破,其成功研制也为后续大尺寸光电角度编码器在航天高精度测角领域的广泛应用奠定了基础。

## 2 星载激光通信终端角度编码器的技术原理和设计指标

### 2.1 工作原理

绝对式光电角度编码器的结构原理如图 1 所示,该角度编码器主要由回转轴系、发射光源、码

盘、指示光栅、光电接收器、处理电路和壳体 7 部分组成。其中,码盘与回转轴系相固连,并跟随回转轴进行回转;指示光栅与编码器壳体相固连,保持静止;二者面对面正对,并伴随着回转轴的旋转发生相对运动,形成光栅运动副。该光栅副是光电角度编码器的测量核心部件。

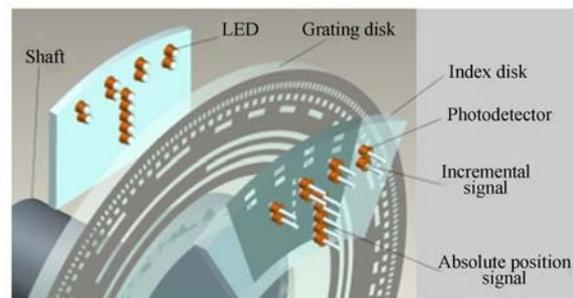


图 1 绝对式光电角度编码器结构原理

Fig. 1 Principle of absolute optical angle encoder

光电角度编码器的具体工作过程如下:首先发射光源通电发光,光线经自身封装的透镜准直后变为平行光,并垂直入射到光栅副上,进而产生与光栅栅距具有对应关系的莫尔条纹。然后,该莫尔条纹信号被光电接收器接收,并输出一组与码盘图案的位置编码具有对应关系的光电流信号。最后,将该信号传送至后续处理电路进行处理。其中,精码信号经差分放大、整形、A/D 转换器转换成数字信号;粗码信号经放大、鉴幅,由单片机将矩阵码译成自然二进制码。精码信号与粗码信号经译码、校正连接、对径相加平均等逻辑处理,形成数字代码输出,最终获得回转轴的角度位置信息,并实现数值输出。由于每个二进制码对应码盘上唯一的位置点,即实现了编码器输出位置编码与回转角度的一一对应关系,因此该角度

编码器从技术原理上实现了回转轴系绝对角度的测量。

## 2.2 设计要求

由于星载激光通信设备的作用距离较远(约 400 km),发射激光即使产生极小的角度差异也将会对遥远的地面目标产生极大的位置偏差。为了精确控制发射光束的传播方向,顺利实现星、地激光链路的双向捕获、跟踪和通信,必须对星载激光通信终端的回转角度进行精密控制,因此,对系统角度测量装置的性能,尤其是测量精度和分辨力提出了极高的要求。而圆周电位计和旋转变压器等传统的角度测量元件难以满足这种要求。考虑到星载激光通信终端狭小的安装空间,在地面二维转台中应用成熟的圆光栅等也无法满足空间设备的使用需求。因此,本文针对星载激光通信终端设计了专用型光电角度编码器。该高精度光电角度编码器的性能指标要求如表 1 所示。

表 1 星载激光通信终端角度编码器的性能要求

Tab. 1 Requisite performances of absolute angle encoder used for laser communication terminal on satellite platform

Items	Requirement
Precision/(")	优于 1.0
Resolution/(")	$\leq 0.1$
Sampling frequency/Hz	$\geq 800$
Working temperature/°C	-40 ~ +55

## 3 星载激光通信终端角度编码器的设计

### 3.1 码盘设计

码盘是光电角度编码器的核心元件之一,通俗地讲它就是一块包含若干条同心码道图的玻璃圆盘。角度编码信息通过透光与不透光的刻线在码盘表面形成对应编码的码道图。图 2 为该绝对式光电角度编码器码盘的编码原理图。为了实现星载激光通信终端回转角度的绝对测量,本码盘采用粗码、中精码和精码相结合的设计方案。

如图 2 所示,粗码设计采用四象限矩阵编码。整个圆周分为 4 个象限,每个象限的刻线密度依次相差 2 倍。粗码  $A_1 \sim A_{12}$  经四个象限编码成 4

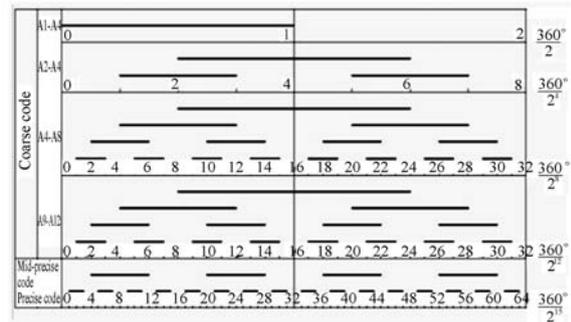


图 2 绝对式编码器的编码原理

Fig. 2 Coding principle of absolute optical encoder

条码道,相比格林码所需要的 12 条码道,在数量上成倍地减少,从而大幅度压缩了码盘的径向尺寸和重量。中精码用于连接粗码与精码。精码决定了光电角度编码器的设计精度,可以通过提高码道整周的刻线数和刻线精度来保证测量精度。但如果码盘的刻线密度过高,会发生光衍射现象,进而影响所提取光电信号的质量。因此为了兼顾二者,本文将精码码道的刻线密度定为  $2^{13}$  对线/周,中精码码道的刻线密度定为  $2^{10}$  对线/周。考虑到光电接收器在空间上布局的合理性,将两圈刻线密度较高的精码和中精码设计在码盘的中间位置。

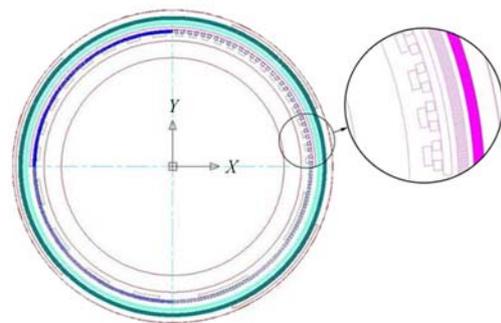


图 3 码盘的设计图样

Fig. 3 Pattern design of grating disk

图 3 和图 4 分别为玻璃码盘的设计图样及实物照片。如图所示,该码盘共有 1~15 位编码码道,但外形尺寸仅为:内径  $\Phi 126$  mm、外径  $\Phi 181$  mm,不仅保证了码盘的精度,而且大幅度压缩了码盘的尺寸。因此,这种编码方式特别适用于对空间体积要求极为苛刻的航空航天领域。



图 4 码盘的实物照片

Fig. 4 Photograph of grating disk

### 3.2 指示光栅设计

指示光栅用于扫描码盘上的位移编码信息。本文设计的指示光栅图案主要由粗码、中精码和精码 3 部分组成,如图 5 所示。其中,粗码为 4 个单缝通光窗口,分别用于扫描码盘上 4 圈不同的粗码码道;中精码为 4 个多缝通光窗口,用于扫描码盘上的中精码码道;精码也为 4 个多缝通光窗口,用于扫描码盘上的精码码道。中精码、精码的光栅节距分别与对应码盘上的中精码、精码的光栅节距相同。而且指示光栅的 4 个中精码窗口与 4 个精码窗口在沿圆弧方向各自的码道上交错排列,以最大程度地压缩单个读数头的结构尺寸。指示光栅采用分体读数头的结构形式,并与光电接收器组合成光电接收模块,不仅避免了采用整周玻璃盘使光电角度编码器的质量超标,而且大幅度提高了指示光栅的工作可靠性。图 6 为指示光栅与光电接收器组合而成的光电接收模块的实物照片。

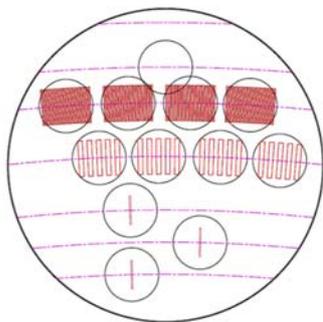


图 5 指示光栅图案

Fig. 5 Designing pattern of index grating



图 6 指示光栅的实物照片

Fig. 6 Photograph of index grating

### 3.3 光电信号的提取

在光电角度编码器的信号提取过程中,粗码采用单缝扫描的方式提取信号,中精码和精码采用多缝莫尔条纹提取信号。由于红外发射光源的峰值波长  $\lambda \approx 0.88 \mu\text{m}$ ,远小于精码的光栅节距  $p \approx 0.066 \text{ mm}$ ,因此,光栅副的间隙  $\Delta h$  可由以下经验公式计算获得:

$$\Delta h = 0.1 \frac{p^2}{\lambda}, \quad (1)$$

式中:  $p$  为光栅节距;  $\lambda$  为发射光源的波长。将  $p \approx 0.066 \text{ mm}$ ,  $\lambda \approx 0.88 \mu\text{m}$  代入式(1),可得光栅副的间隙  $\Delta h = 0.495 \text{ mm}$ 。

根据莫尔条纹的工作原理,条纹宽度为:

$$B = \frac{p}{2 \sin(\theta/2)} \approx \frac{p}{\theta}, \quad (2)$$

式中:  $B$  为莫尔条纹宽度;  $p$  为光栅节距;  $\theta$  为动、静光栅的夹角。

由式(2)可知:莫尔条纹相当于一个光学放大器,而条纹宽度  $B$  则相当于将光栅节距  $p$  放大了  $1/\theta$  倍。所以,当光栅节距  $p$  确定以后,选取的莫尔条纹宽度  $B$  越大,则动静光栅夹角  $\theta$  越小,莫尔条纹的放大倍数  $1/\theta$  越高,条纹宽度  $B$  对动静光栅夹角  $\theta$  的变化越敏感,对光机结构回转轴系的精度要求也越苛刻。因此,选用相对较窄的莫尔条纹宽度有利于减小轴系晃动的影响,从而降低信号正交性的变化,改善信号的正弦性<sup>[7-11]</sup>。在实际应用中莫尔条纹宽度  $B$  的计算公式为:

$$B = \frac{RW}{\Delta R \pm e}, \quad (3)$$

式中:  $\Delta R$  为动静光栅的偏置量;  $R$  为码盘上精码的刻划半径;  $e$  为码盘安装的偏心量。

在光电角度编码器的实际设计过程中,选取

莫尔条纹宽度  $B=0.5\text{ mm}$ ;装调时,只要保证码盘安装的偏心量  $e\leq 0.001\text{ mm}$ ,就可以获得较高质量的光电信号。同时为了消除信号中的直流分量,将精码和中精码的 4 路光电信号分别进行差分处理。其中,  $0^\circ$  信号与  $180^\circ$  信号差分后得到正弦信号,  $90^\circ$  信号与  $270^\circ$  信号差分后得到余弦信号。正余弦信号的正交性直接影响光电角度编码器后续电子学的细分精度。图 7 为星载激光通信终端角度编码器装调后正、余弦信号合成的李沙育图。由图 7 可知,该正余弦信号的正交性良好,满足电子学处理的需求。

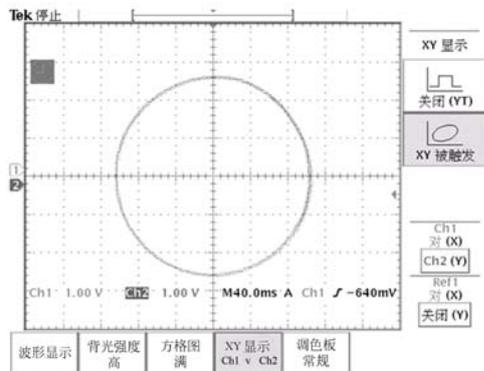


图 7 光电信号李沙育图

Fig. 7 Lissajous graph of Moiré signal

### 3.4 特殊设计

由于星载设备所运行的空间环境存在高辐射、高低温、真空及难以维修和维护等不利条件,普通的光、机、电元器件极易因氧化而失效。为了保证星载激光通信终端专用型光电角度编码器的工作可靠性,延长其在轨运行的服役寿命,本文有针对性地开展了如下特殊设计:(1)选用抗电磁辐射级光学玻璃制备码盘;(2)对完成刻划图案的码盘均匀镀覆抗空间辐射薄膜;(3)对所有电子元器件进行等级筛选;(4)对完成焊接的电子元器件进行加胶固封;(5)选择热膨胀系数小的材料制作结构件并进行冷热时效处理;(6)对所有机械连接点进行涂胶防松;(7)对信号提取系统采用冗余设计(1:1 备份)。

## 4 星载激光通信终端角度编码器的实验检测

为了尽可能地压缩星载设备的体积、降低激

光通信终端的质量,本文设计的光电角度编码器最大的技术特点之一就是:直接借用星载激光通信终端的回转轴系来实现光栅副的相对运动。图 8 为安装于星载激光通信终端方位轴系上的光电角度编码器的实物照片。

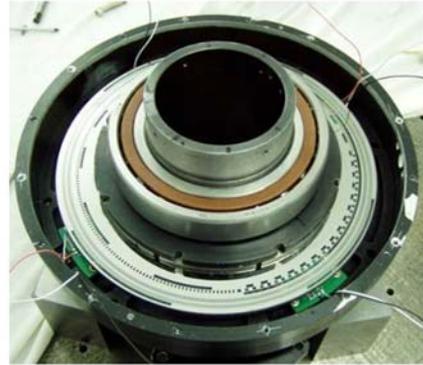


图 8 安装于设备方位轴系上光电角度编码器的实物照片

Fig. 8 Photograph of optical encoder installed on equipment

为了确保星载激光通信终端专用角度编码器的测角精度满足系统的应用要求(优于  $1.0''$ ),这里对完成安装和调整的光电角度编码器的测角精度进行了实验检测。

### 4.1 检测方法

图 9 为光电角度编码器测角精度的实验检测原理。该检测装置主要包括光电自准直仪(精度为  $\pm 0.1''$ 、分辨力为  $0.001''$ )、17 面棱体、过渡工装、电感测微仪、光电角度编码器及检测平台等。首先,将 17 面棱体通过过渡工装固连在星载激光通信终端的回转轴上,并采用电感测微仪保证棱体与回转轴系同轴。然后,转动回转轴直至光电角度编码器的读数变为 0。此时,调整自准直仪使其对准 17 面棱体的第一面,并将此位置定为测量零位。完成检测装置初始位置的调节后,再次转动回转轴直至棱体的第二面对准自准直仪。此时,光电角度编码器理论转过  $360^\circ/17$ ,而光电自准直仪的方位读数为光电角度编码器的实际转角与理论转角的偏差,二者累加获得光电角度编码器的实际转角。将该值与光电角度编码器的读数做差即可获得编码器在第一点处的测角精度。继续转动回转轴,依次使棱体的其余 15 个面与自准直仪对准,采用同样的方法获得光电角度编码器

在其余各点处的测角精度。最后,将编码器在这 17 个点处的测角精度取平均值,继而求出它们的均方差,最终获得光电角度编码器最终的测角精度。

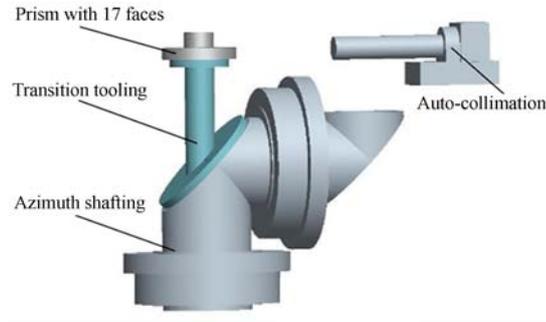


图 9 光电角度编码器测角精度测试装置

Fig. 9 Test device for precision of angle encoder

具体的计算过程如下:

光电角度编码器在 17 面棱体第  $i$  面处的理论转角为:

$$A_i = \frac{360^\circ}{17} \cdot i \quad (4)$$

光电角度编码器在 17 面棱体第  $i$  面处的实际转角为:

$$C_i = A_i + B_i \quad (5)$$

光电角度编码器在 17 面棱体第  $i$  面处的测量精度为:

$$\delta_i = D_i - C_i \quad (6)$$

光电角度编码器的平均测角精度为:

$$\bar{\delta} = \sum_{i=1}^{17} \frac{\delta_i}{17} \quad (7)$$

光电角度编码器测角精度的均方差为:

$$\sigma_\delta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{17} (\delta_i - \bar{\delta})^2}{16}} \quad (8)$$

该均方差值  $\sigma_\delta$  即为光电角度编码器最终的测角精度。

#### 4.2 检测结果

由于在地面条件下模拟空间环境对所设计的光电角度编码器进行精度检测十分困难,同时,考虑到该光电角度编码器在设计、制作过程中已采用了大量的特殊防护措施(见论文 3.4 节)以应对太空中高辐射、高低温及无法维修维护等恶劣的

工作环境,因此,在模拟空间环境不足的情况下,这里在室温条件下采用 4.1 节所述的检测方法对光电角度编码器的测角精度进行了检测,其结果仍然具备较好的参考性。检测结果如表 2 所示。

表 2 光电角度编码器测角精度的测试结果

Tab. 2 Measurement results of precision of angle encoder

No.	Selected position of encoder $A_i/(^\circ)$	Showing value of autocollimation $B_i/(\prime)$	Practical position of encoder $C_i$	Showing value of encoder $D_i$	Precision of encoder $\delta_i/(\prime)$
1	0.0°	0.0	0.0"	0.0"	0.0
2	360/17×1	0.2	21°10′35.5"	21°10′35.6"	0.1
3	360/17×2	0.3	42°21′10.9"	42°21′10.8"	-0.1
4	360/17×3	-0.2	63°31′45.7"	63°31′45.8"	0.1
5	360/17×4	0.5	84°42′21.7"	84°42′20.7"	-1.0
6	360/17×5	0.4	105°52′56.9"	105°52′55.8"	-1.1
7	360/17×6	0.5	127°03′32.3"	127°03′32.3"	0.0
8	360/17×7	-0.6	148°14′06.5"	148°14′06.6"	0.1
9	360/17×8	0.4	169°24′42.8"	169°24′43.9"	1.1
10	360/17×9	0.7	190°35′18.3"	190°35′17.9"	-0.4
11	360/17×10	0.3	211°45′53.2"	211°45′53.6"	0.4
12	360/17×11	0.2	232°56′28.4"	232°56′27.8"	-0.6
13	360/17×12	0.8	254°07′04.3"	254°07′03.8"	-0.5
14	360/17×13	0.5	275°17′39.3"	275°17′38.1"	-1.2
15	360/17×14	0.5	296°28′14.6"	296°28′14.1"	-0.5
16	360/17×15	-0.2	317°38′49.2"	317°38′49.8"	0.6
17	360/17×16	0.4	338°49′25.1"	338°49′25.7"	0.6

将表 2 中的检测结果  $\delta_i$  代入式(7)和式(8),获得光电角度编码器最终的测角精度  $\sigma_\delta = 0.7'' < 1.0''$ ,满足设计指标要求。

## 5 结 论

本文根据星载激光通信终端对测角元件的功能需求及空间恶劣的工作环境展开专用型光电角度编码器的设计。在通过一系列先进技术手段实现光电角度编码器高精度、小体积、轻量化的基础上,又采用了大量的特殊防护措施以应对空间恶劣的工作条件,保证光电角度编码器的工作可靠性。最后,在室温条件下对安装在星载激光通信终端上的光电角度编码器进行了测角精度检测。地面检测结果表明:该光电角度编码器的测量精度约为  $0.7''$ ,优于  $1.0''$ ,满足星载激光通信终端

的设计指标要求。该编码器系统的设计思路及装配工艺满足航天环境的应用需求,在一系列针对空间环境的特殊防护措施的辅助下,光电角度编码器在地面常温条件下的检测精度具有较好的参

考性。而激光通信终端设备在轨稳定运行及其捕获、跟踪、通信等功能的正常发挥,进一步证明了所设计光电角度编码器的测角精度高、抗辐射能力强、工作可靠性高。

#### 参考文献:

- [1] 王卫兵,王挺峰,郭劲. 星载光电捕获跟踪瞄准控制技术分析[J]. 中国光学, 2014, 7(6): 879-888.  
WANG W B, WANG T F, GUO J. Analysis for opto-electrical acquisition tracking and pointing control technology on satellite [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(6): 879-888. (in Chinese)
- [2] 左洋,龙科慧,刘金国,等. 非均匀采样莫尔条纹信号的分析与处理[J]. 光学精密工程, 2015, 23(4): 1146-1152.  
ZUO Y, LONG K H, LIU J G, *et al.*. Analysis and processing of Moré fringe signals based on non-uniform sampling [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(4): 1146-1152. (in Chinese)
- [3] 张鹏,秦开宇,蒋大钢,等. 临近空间相干激光通信链路外差效率分析[J]. 强激光与粒子束, 2015, 27(4): 041006-1-041006-5.  
ZHANG P, QIN K Y, JIANG D G, *et al.*. Analysis of heterodyne efficiency of near earth coherent laser communication links [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, 27(4): 041006-1-041006-5. (in Chinese)
- [4] 杨名宇. 利用激光主动探测技术实现光电窥视设备检测[J]. 中国光学, 2015, 8(2): 255-262.  
YANG M Y. Detecting of photoelectric peeping devices based on active laser detection [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(2): 255-262. (in Chinese)
- [5] 杨秀清,陈海燕. 光通信技术在物联网中的应用[J]. 中国光学, 2014, 7(6): 889-896.  
YANG X Q, CHEN H Y. Application of optical communication technique in the internet of things [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(6): 889-896. (in Chinese)
- [6] WANG Y, DU F, MA J, *et al.*. Research on collimating characteristics of the emitted laser beam in free space optical communication system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(3): 1008-1014.
- [7] 宋婷婷,马晶,谭立英,等. 美国月球激光通信演示验证——终端设计[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(5): 21-27.  
SONG T T, MA J, TAN L Y, *et al.*. Lunar laser communication demonstration in USA: terminal design [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(5): 21-27. (in Chinese)
- [8] 谭立英,吴世臣,韩琦琦,等. 潜望镜式卫星光通信终端的 CCD 粗跟踪[J]. 光学精密工程, 2012, 20(2): 270-276.  
TAN L Y, WU SH CH, HAN Q Q, *et al.*. Coarse tracking of periscope-type satellite optical communication terminals [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(2): 270-276. (in Chinese)
- [9] 孟立新,赵丁选,张立中,等. 机载激光通信中气动光学的影响及补偿[J]. 光学精密工程, 2014, 22(12): 3231-3238.  
MENG L X, ZHAO D X, ZHANG L ZH, *et al.*. Boundary layer effect and compensation in airborne laser communication [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(12): 3231-3238. (in Chinese)
- [10] 安东,陈李,丁一飞,等. 光栅投影相位法系统模型及标定方法[J]. 中国光学, 2015, 8(2): 248-254.  
AN D, CHEN L, DING Y F, *et al.*. Optical system model and calibration of grating projection phase method [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(2): 248-254. (in Chinese)
- [11] 冯英翘,万秋华,王树洁. 小型光电编码器长周期误差的修正[J]. 光学精密工程, 2014, 22(9): 2491-2497.  
FENG Y Q, WAN Q H, WANG SH J. Correc-

- tion of long-period error for small photoelectric encoders [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(9): 2491-2497. (in Chinese)
- [12] MATSZOE Y, YOSHIZAWA T. High-performance absolute rotary encoder using multitrack and M-code [J]. *SPIE*, 2003, 42 (1):124-130.
- [13] 刘昱, 张宇, 潘军, 等. 重力梯度测量中光栅角编码器安装误差的影响及分析[J]. *中国惯性技术学报*, 2015, 23(1): 6-8.
- LIU Y, ZHANG Y, PAN J, *et al.*. Influence and analysis of optical angular encoder's installation error in gravity gradiometry[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2015, 23(1): 6-8. (in Chinese)

作者简介:



韩旭东 (1975—),男,山东博兴人,研究员,1998年于长春理工大学获得学士学位,2001年、2007年于中科院长春光机所获得硕士和博士学位,主要从事光电对抗技术的研究。E-mail: hanxd@ciomp.ac.cn

(本栏目编辑:曹 金)  
(版权所有 未经许可 不得转载)