

文章编号 2095-1531(2016)06-0687-08

三同心球光学系统跟瞄误差分析

安岩^{1*}, 李欣航^{1,2}, 赵义武¹, 董科研¹, 楚玉刚³, 谢岩³

(1. 长春理工大学空间光电技术研究所, 吉林 长春 130022;

2. 长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022)

3. 国网黑龙江省电力有限公司鸡西供电公司华瑞集团公司, 黑龙江 鸡西 158100)

摘要:针对独有的跟踪方式,具体讨论了激光通信三同心球光学系统的跟瞄方案,并进行了具体规划。通过对通信跟踪光路和通信接收光路的视场和精度分析,给出了二者的相关参数,作为 Matlab 理论计算跟踪像面轨道的依据。利用 Tracepro 软件模拟了引入相关误差量后的通信跟踪和通信接收像面光斑质心偏移和光斑大小变化情况。仿真结果显示:随着角度的旋转,通信接收的质心偏差在 $\pm 4 \mu\text{m}$ 范围内,通信跟踪的质心偏差在 $\pm 50 \mu\text{m}$ 范围内;通信接收像面光斑直径小于 $80 \mu\text{m}$,通信跟踪像面光斑直径均在 $400 \mu\text{m}$ 以内。系统所引入的误差在允许范围之内,不影响相关跟踪通信功能。

关键词:激光通信;三同心球系统;通信接收;通信跟踪

中图分类号: TN929.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/CO.20160906.0687

Analyse of pointing and tracking error with three concentric spheres optical system

AN Yan^{1*}, LI Xin-hang^{1,2}, ZHAO Yi-wu¹, DONG Ke-yang¹, CHU Yu-gang³, XIE Yan³

(1. *Institute of Space Photoelectric Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;*

2. *School of Opto-electronics Engineer, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;*

3. *Huarui Group, Jixi Power Company, Heilongjiang Electric Power Co. Ltd, State Grid Corporation of China, Jixi 158100, China)*

** Corresponding author, E-mail: anyan_7@126.com*

Abstract: According to unique tracking mode, the specific tracking program of three concentric spherical optical system which used in laser communication is discussed. By analyzing field of view and precision in the communication tracking optical path and the communication receiving optical path, the main relating param-

收稿日期:2016-06-20;修订日期:2016-07-26

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 91338116);兵器基金资助项目(No. 62201070152);长春市科技局资助项目(No. 14DR003);吉林省教育厅“十三五”科学技术研究项目(吉教科合字第 368 号)

Supported by National Natural Science Foundation of China NSFC(No. 91338116); Weapon Preparatory Fund of China(No. 62201070152); Project of Science and Technology of Changchun(No. 14DR003); The “13th-Five-Year” Science and Technology Research of the Education Department of Jilin Province(No. 368)

ters are given on the basis of theoretical calculation of tracking trajectory with Matlab. Using the software of Tracepro, the optical simulation of spot centroid and spot size of image plane in communication tracking optical path and the communication receiving optical path are performed after the introduction of relevant error. The simulation results show that centroid deviation of communication reception and communication tracking are in the ranges of $\pm 4 \mu\text{m}$ and $\pm 50 \mu\text{m}$, respectively. Spot diameter deviation of communication reception and communication tracking are less than $80 \mu\text{m}$ and $400 \mu\text{m}$ respectively, which do not affect the relating function on tracking and communicating.

Key words: laser communication; three concentric spheres system; communication reception; communication tracking

1 引言

近年来,自由空间的激光通信受到广泛关注^[1-3],其在军用领域(作战训练通信、侦查通信)^[4-6]和民用领域(电力现场通信、紧急通信)^[7-9]的应用不断扩大。

在空间激光通信一对多原理方法研究中^[10],区别于传统设计结构,三同心球天线属于特种天线结构,作为空间激光通信组网结构中的节点,可以用于多个光端机之间的通信,便于实现信息中转和处理。三同心球天线结构无需大范围的跟踪转台,结构简单、质量轻、体积小,适用于短距离、要求灵活机动的激光通信网络。其工作方式并未采用以 PZT 振镜为核心的跟踪系统^[11],而是借助于三同心球光学系统自身的无畸变像面,且像差均能够被很好地校正。

本文针对三同心球光学天线结构中独有的轨道跟踪像面,对跟踪视场和跟踪精度指标进行了分析。通过理论计算系统像面跟瞄误差以及相关光学系统仿真验证,对三同心球光学激光通信跟瞄误差进行了分析,为激光通信试验方案的设计以及工程化样机的研制工作奠定了理论基础。

2 跟瞄方案系统分析

2.1 跟瞄方案的规划

三同心球激光通信的组网方案如图 1 所示,主要包括合作通信目标、三同心球、收发子光路(包括分光镜、通信跟踪单元、通信接收单元和通信发射单元)。合作目标用于提供指定运行轨迹

和激光通信信号源,通信终端数量和运行轨迹根

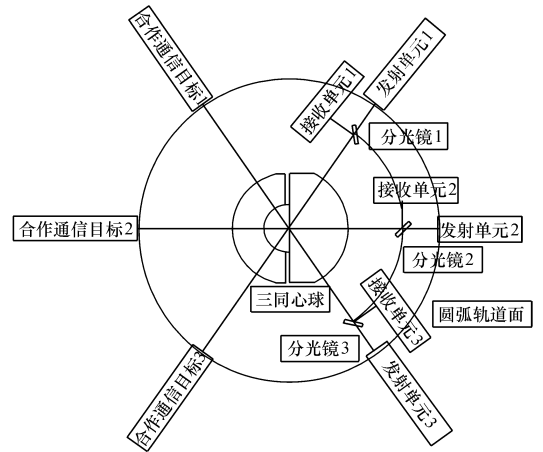


图 1 三同心球天线结构总体方案示意图

Fig. 1 Schematic diagram of antenna structure with three concentric sphere

据具体情况进行设计规划;三同心球用于提供节点中继功能。由于三同心球的本身光学结构特性,即使在大视场的情况下,其像面仍为跟踪瞄准轨迹,在该轨迹处的球差、彗差、均能够被很好地校正,与 APT 系统的功能相近,可实现多目标跟踪功能;收发子光路用于实现不同合作通信目标的通信收发,根据合作通信目标的数量划分子光路移动视场范围,三同心球总视场为 120° ,当合作通信目标数量为 6 时,每个收发子光路的移动通信视场可以达到 $120^\circ \times 20^\circ$ 。

由于三同心球系统的像面为球面,将其在弧矢面“赤道”处等距划分成多块两头尖、中间粗的长条形区域,如图 2 所示。像面处布置多套接收发射分系统,每套系统负责一长条形区域。当某

一接收分系统捕获通信目标后,随着目标在像面上成的像沿像面移动,该分系统也随之滑动。对目标在像面上的坐标进行识别,当目标移出该分系统管辖的区域边缘到达另一区域时,另一区域的分系统滑动至该处“接管”对通信目标的跟瞄任务。由此便可实现整个目标视场中的多点间同时激光通信。

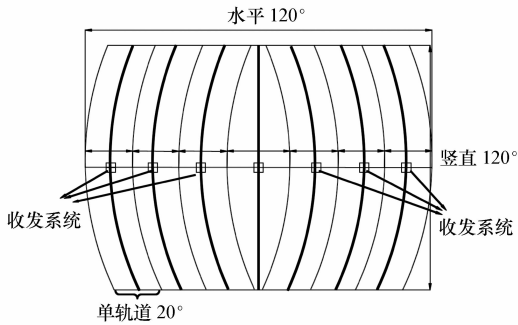


图2 收发系统像面示意图

Fig.2 Schematic diagram of image plane in transmit-receive system

根据通信需求情况设定规划系统的移动视场后,在具体设计过程中,需要对通信接收光路和通信跟踪光路的视场和精度进行分析。

2.2 视场和精度分析

考虑到由光学、机械等元件的安装、加工导致的同心球面位置偏差,分光镜引入的光轴偏移,均对系统实际移动像面产生一定影响,因此,需要保证通信接收光路和通信跟踪光路两个子单元所接收到的光斑偏离量在设计视场允许范围内。

在通信跟踪视场方面,系统中的通信跟踪光路采用了粗精信标共用思想的方案。通信跟踪视场需要考虑原粗跟踪功能中与平台姿态精度衔接的原则。星载和机载平台的 GPS/INS 系统所测的姿态外方位参数(如速度、位置)存在一定的定位误差;对于 GPS/INS 捷联导航单元而言,INS 存在一定的姿态测量误差。GPS/INS 在仰俯方向和横滚方向控制精度一般小于 0.87 mrad,在偏航方向的控制精度稍大,其精度为 2.7 mrad,同时,通信跟踪视场的视场角需要考虑 CCD 的像元大小、系统焦距、空间背景光等。通信跟踪视场角的增加,会造成相机像元分辨率的降低,系统焦距变长,空间背景光的过多引入会导致跟踪精度和捕

获概率的降低。通信跟踪光路的视场定为 3 mrad。

在通信跟踪精度方面,主要包括经 CCD 探测器测量误差和动态滞后误差分析后所给出的总误差值。(1)一般情况下,跟踪 CCD 单个像元对应的分辨率约为 10 μrad ,探测器的测量误差在考虑大气湍流散斑效应对跟踪检测影响下(5 ~ 15 μrad),如果信噪比满足跟踪要求,光斑检测误差约为 $3\sigma_1 = 12 \sim 18 \mu\text{rad}$ 。(2)动态滞后误差:对于跟踪系统,由于伺服带宽和伺服刚度的限制,致使输出滞后于输入。这种由于目标运动而造成的误差称为动态滞后误差。这项误差不仅与运动参数特性(保精度运动角速度)有关,而且还与伺服系统参数(速度品质因素和加速度品质因素)有关。考虑加速度动态滞后, $\Delta\theta_d \approx 80 \mu\text{rad}$,因此,通信跟踪误差约为 100 μrad 。

在通信接收光路方面,对于视场的选取,应在满足信噪比下适当放大视场。一般情况下,选取视场的安全裕量应是通信跟踪光路误差的三倍以上且大于通信发射束散角,通信接收光路全视场内的光斑均在探测器接收面内。由于通信接收光路和通信跟踪光路均在同一跟踪驱动内,需要保证通信接收的跟踪精度,因此,通信接收视场拟定为 1.5 mrad。

3 理论分析及仿真

3.1 理论分析

三同心球系统兼顾收发功能,在后续像面轨迹位置,放置后续收发子光路,包括激光发射光路、通信跟踪光路和通信接收光路,如图 3 所示。

三同心球的像面设定为球面,且和前球面透镜 1、中球面透镜 2、后球面透镜 3 的球面具有相同的球心,能校正场曲和像散。根据设计实例,像面的半径为 R_4 ,视场角为 2ω ,像面轨迹中的垂轴高度公式如下:

$$y = R_4 \times \sin\omega, \quad (1)$$

轴向距离公式如下:

$$x = R_4 \times \cos\omega. \quad (2)$$

根据式(1)和式(2)可以进行轨道像面的理论计算。针对具体所设计的光学系统进行分析计

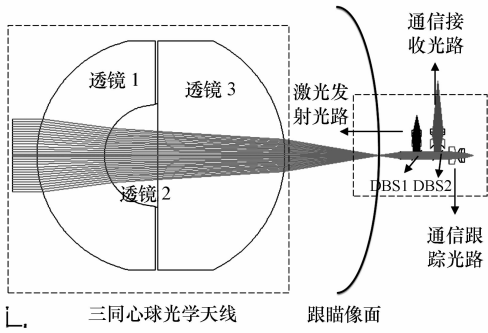


图3 三同心球系统光路示意图

Fig.3 Optical layout of three concentric sphere system

算,初始相关参数如表1所示。

表1 三同心球光学系统参数表

Tab.1 Parameters of three concentric sphere system

分系统名称	指标	参数
三同心球光路	视场/(°)	120
	像面半径/mm	158.4
通信跟踪光路	视场/mrad	3
	跟踪精度/ μ rad	100
通信接收光路	视场/mrad	1.5

由于在具体实际设计中,轨道跟瞄像面的曲率半径与实际曲率有一定偏差,主要体现在两方面,一是在加入分光镜 DBS1 和 DBS2 之后,通信跟踪和通信接收两光路相对于三同心球并非同轴,而是与其平行的基础上有一定的平行偏移,因

此,若完全按照设计中的轨道像面曲率半径 158.4 mm 进行轨道面的理论计算,会产生的一定的像面偏差;二是宽光束下进入到三同心球后,其像面光斑会产生弥散,同时考虑光学、机械等元件的安装加工误差,以上因素造成的随机误差会导致三同心球像面产生一定的离焦。跟踪轨道轨迹与所设计的轨道曲率半径存在一定偏差。变化偏差具有一定的随机性,相比于理想情况,主要考虑了同心球轨道像面中心与子光路旋转中心轴向距离存在偏移距离下的系统影响。

3.2 光学仿真

在像面跟瞄理论计算和现有光学设计结果的基础上,利用 Tracepro 软件,仿真模拟引入偏移距离后相关光学参数的变化。通过对不同入射角度光线进行采样仿真,计算在不同角度下的轨道半径偏差,对轨道跟瞄像面产生的误差进行准确分析。本文主要仿真了不同角度下,通信接收光路

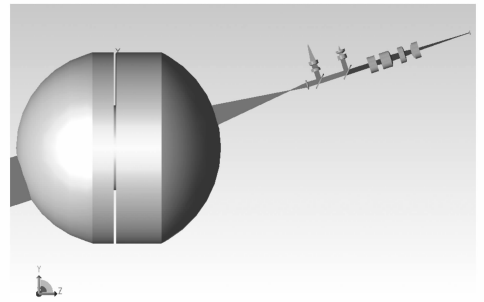
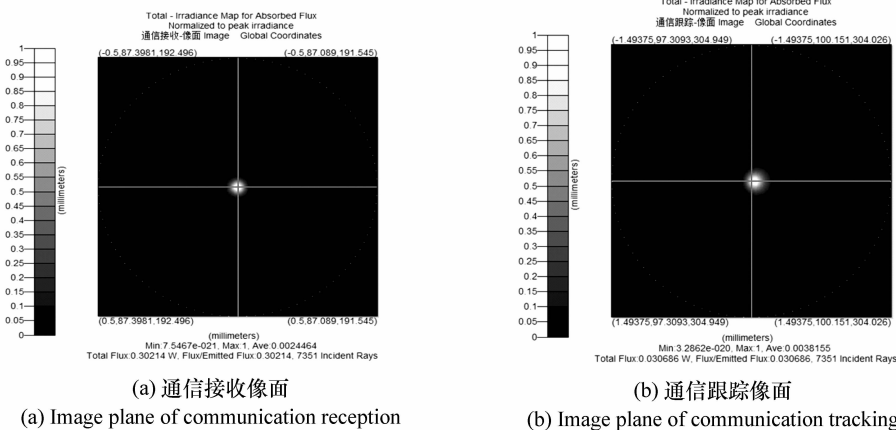


图4 旋转18°后光路仿真图

Fig.4 Simulation of the light path after rotating 18°



(a) 通信接收像面

(a) Image plane of communication reception

(b) 通信跟踪像面

(b) Image plane of communication tracking

图5 18°下通信跟踪和通信接收像面

Fig.5 Image planes of communication reception and communication tracking under 18 degree

和通信跟踪光路各自像面处光斑的形状、坐标及质心等变化情况。图4给出了旋转18°的仿真效果,后续子光路即旋转半球后,通信接收和通信跟踪光路所接收到的光斑在探测器像面中心位置会产生偏移,如图5所示。

由前文分析可知,跟瞄过程中产生像面轨道变化属于随机误差,因此,为尽量模拟真实情况变化,对轨道半径加入一定的随机变量,如表2所示。在此基础上,利用光学软件进行仿真,模拟不同角度下的像面变化情况。

表2 不同角度下的轨道半径偏离表

Tab.2 Orbit radius deviation under the different angles

	X 坐标	Y 坐标	跟踪面轨道半径/mm
0°	0	158.043 2	158.043 1
18°	48.863 5	150.386 5	158.125 7
30°	79.134 5	137.064 9	158.268 9
42°	106.041 0	117.770 4	158.475 7
50°	121.538 7	101.974 7	158.644 4
60°	137.597 7	79.442 1	158.884 2
平均值	/	/	158.407 0

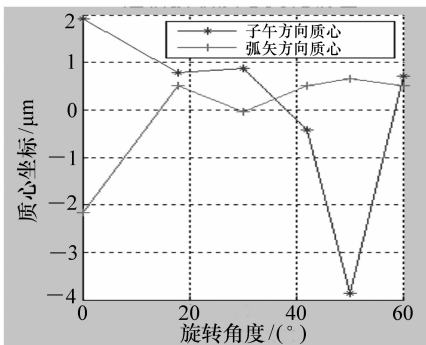
经过仿真,可以计算得到不同角度变化下,通信跟踪和通信接收两路的像面光斑质心均产生变

化,如表3所示,变化趋势如图6所示。

表3 通信接收和通信跟踪光斑中心偏差

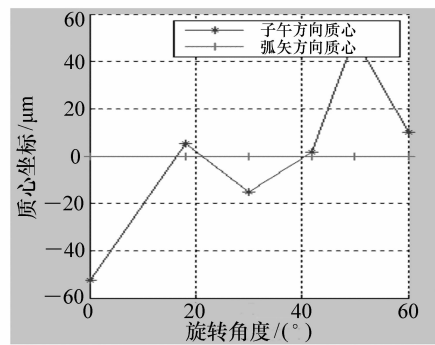
Tab.3 Light spot center deviation of communication reception and communication tracking

角度/(°)	通信接收光路像面		通信跟踪光路像面	
	子午偏差/ μm	弧矢偏差/ μm	子午偏差/ μm	弧矢偏差/ μm
0	1.92	-2.15	-52.32	0
18	0.79	0.51	5.39	0
30	0.87	-0.04	-15.09	0
42	-0.42	0.51	1.78	0
50	-3.86	0.66	50.02	0
60	0.70	0.51	10.23	0



(a) 通信接收质心变化偏差

(a) Barycenter deviation of communication reception



(b) 通信跟踪质心变化偏差

(b) Barycenter deviation of communication tracking

图6 通信接收及通信跟踪光斑质心变化偏差图

Fig.6 Barycenter deviation of communication reception and communication tracking

其中,通信接收光路的质心偏差在 $\pm 4 \mu\text{m}$ 范围内,通信跟踪的子午方向质心变化较大,质心偏差在 $\pm 50 \mu\text{m}$ 范围内。

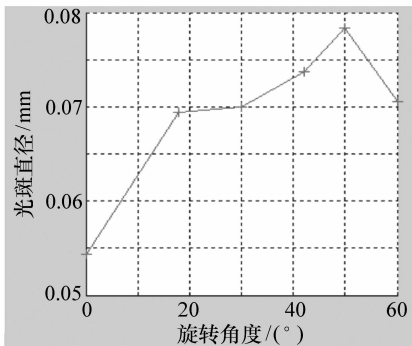
不同角度下,相同口径光束进入光学系统,通信跟踪和通信接收光路所产生的光斑大小变化,如表4所示,变化趋势如图7所示。

随着角度的旋转,系统通信接收像面光斑大小略有变化,最大光束半径为 $80 \mu\text{m}$,对近距离通信的影响可以忽略。系统通信跟踪像面光斑半径变化范围在 $400 \mu\text{m}$,完全在像面内,没有能量损失。

表4 通信接收和通信跟踪光斑大小偏差

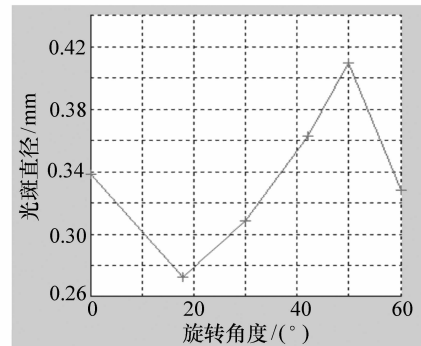
Tab.4 Light spot deviation of communication reception and communication tracking

角度/(°)	通信接收光斑	通信跟踪光斑
	直径/mm	直径/mm
0	0.054 3	0.338 7
18	0.069 4	0.272 3
30	0.070 0	0.308 4
42	0.073 8	0.362 6
50	0.078 4	0.409 7
60	0.070 5	0.328 2



(a) 通信接收

(a) Communication reception



(b) 通信跟踪

(b) Communication tracking

图7 像面光斑直径变化

Fig.7 Light spot diameter of image plane

通过以上光学跟瞄仿真分析,研究了通信接收和通信跟踪两光路的光斑大小和光斑质心。随着角度转动所产生的变化不尽相同,且各自变化无明显规律,按随机误差进行模拟仿真,质心略有偏差,但不影响系统工作。

4 结 论

针对三同心球光学天线独有的跟踪方案,具体讨论了跟瞄方案的规划。分析了通信跟踪光路和通信接收光路的视场和精度,给出了合理的通信接收视场、通信跟踪视场以及相关精度。考虑

了系统中的光机等结构的位置偏差、分光镜引入的光轴偏移等误差;提出像面轨道计算公式,进行了理论模型分析与光学仿真,对引入一定误差量之后通信接收光路和通信跟踪光路中的各自光斑大小和光斑质心变化情况进行了仿真,结果显示,随着角度的旋转,在质心偏差方面,通信接收光路的偏差在 $\pm 4 \mu\text{m}$ 范围内,通信跟踪的偏差在 $\pm 50 \mu\text{m}$ 范围内;在光斑大小方面,通信接收像面光斑直径小于 $80 \mu\text{m}$,通信跟踪像面光斑直径均在 $400 \mu\text{m}$ 以内。可见,系统引入的误差在允许范围之内,两光路中光斑大小和质心变化影响可以忽略,其结果可以为实际跟瞄工作提供理论依据。

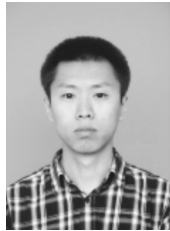
参考文献:

- [1] 姜会林,安岩,张雅琳,等.空间激光通信现状、发展趋势及关键技术分析[J].飞行器测控学报,2014,34(3):207-217.

- communication[J]. *J. Spacecraft TT&C Technology*,2014,34(3):207-217. (in Chinese)
- [2] 张靓,郭丽红,刘向南,等.空间激光通信技术最新进展与趋势[J].飞行器测控学报,2013,32(4):286-293.
ZHANG L, GUO L H, LIU X N, *et al.*. Latest progress and trends of development of space laser communication[J]. *J. Spacecraft TT&C Technology*,2013,32(4):286-293. (in Chinese)
- [3] 曾飞,高世杰,伞晓刚,等.机载激光通信系统发展现状与趋势[J].中国光学,2016,9(1):65-73.
ZENG F, GAO SH J, SAN X G, *et al.*. Development status and trend of airborne laser communication terminals[J]. *Chinese Optics*,2016,9(1):65-73. (in Chinese)
- [4] 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 compensation in airborne laser communication[J]. *Opt. Precision Eng.*,2014,22(12):3231-3238. (in Chinese)
- [5] 张巍.激光对潜通信技术的发展分析[J].舰船电子工程,2014,34(4):4-7.
ZHANG W. Development analysis of submarine laser communication technology[J]. *Ship Electronic Engineering*,2014,34(4):4-7. (in Chinese)
- [6] 高天元,胡源,姜会林,等.机载空间激光通信大气附面层影响及补偿技术研究[J].兵工学报,2015,36(12):2278-2283.
GAO T Y, HU Y, JIANG H L, *et al.*. The effect of atmosphere boundary layer on airborne space laser communication and its compensation technology[J]. *Acta Armamentarll*,2015,36(12):2278-2283. (in Chinese)
- [7] 姜会林,胡源,宋延嵩,等.空间激光通信组网光端机技术研究[J].航天返回与遥感,2011,32(5):52-59.
JIANG H L, HU Y, SONG Y S, *et al.*. Research on space laser communication network[J]. *Spacecraft Recovery Remote Sensing*,2011,32(5):52-59. (in Chinese)
- [8] 姜会林,胡源,丁莹,等.空间激光通信组网光学原理研究[J].光学学报,2012,32(10):1006003.
JIANG H L, HU Y, DING Y, *et al.*. Optical principle research of space laser communication network[J]. *Acta Optica Sinica*,2012,32(10):1006003. (in Chinese)
- [9] 王超,江伦,董科研,等.星地激光通信系统偏振特性分析[J].激光与光电子进展,2015,52:120607.
WANG CH, 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*,2015,52:120607. (in Chinese)
- [10] 张雅琳,安岩,姜会林,等.空间激光通信一点对多点光学原理与方法比较研究[J].兵工学报,2016,37(1):165-171.
ZHANG Y L, AN Y, JIANG H L, *et al.*. A comparative research on optical principles and methods of one-point-to-multi-point space laser communication[J]. *Acta Armamentarll*,2016,37(1):165-171. (in Chinese)
- [11] 于笑楠,佟首峰,董岩,等.空间激光通信组网单光束跟踪子系统[J].光学精密工程,2014,22(2):3348-3353.
YU X N, TONG SH F, DONG Y, *et al.*. Single beam tracking subsystem of space laser communication network[J]. *Opt. Precision Eng.*,2014,22(2):3348-3353. (in Chinese)
- [12] 金光,李艳杰,钟兴,等.空间成像与激光通信共口径光学系统设计[J].光学精密工程,2014,22(8):2067-2074.
JIN G, LI Y J, ZHONG X, *et al.*. Design of co-aperture optical system for space imaging and laser communication[J]. *Opt. Precision Eng.*,2014,22(8):2067-2074. (in Chinese)
- [13] 董登峰,周维虎,纪荣祎,等.激光跟踪仪精密跟踪系统的设计[J].光学精密工程,2016,24(2):309-318.
DONG D F, ZHOU W H, JI R Y, *et al.*. Design of precise tracking system of laser tracker[J]. *Opt. Precision Eng.*,2016,24(2):309-318. (in Chinese)
- [14] 江伦,胡源,安岩,等.星载激光目标指示器光学系统研究[J].激光与红外工程,2016,46(5):542-546.
JIANG L, HU Y, AN Y, *et al.*. Research on optical system of space borne laser target indicator[J]. *Laser & Infrared*,2016,46(5):542-546. (in Chinese)
- [15] 徐新行,刘廷霞,时魁,等.提高万向轴系式快速反射镜指向精度的装置[J].光学精密工程,2015,23(6):1689-1694.

XU X X, LIU T X, SHI K , *et al.* . Device for improving pointing precision of fast steering mirror with spherical gemel [J]. *Opt. Precision Eng.* ,2015,23(6) :1689-1694. (in Chinese)

作者简介:



安 岩(1986—),男,吉林长春人,博士,讲师,2014年于中国科学院长春精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事激光通信及光学系统设计方面的研究。E-mail: anyan_7@126.com

《光学 精密工程》(月刊)

- 中国光学开拓者之一王大珩院士亲自创办的新中国历史最悠久的光学期刊
- 现任主编为国家级有突出贡献的青年科学家曹健林博士
- Benjamin J Eggleton, John Love 等国际著名光学专家为本刊国际编委

《光学 精密工程》主要栏目有现代应用光学(空间光学、纤维光学、信息光学、薄膜光学、光电技术及器件、光学工艺及设备、光电跟踪与测量、激光技术及设备);微纳技术与精密机械(纳米光学、精密机械);信息科学(图像处理、计算机应用与软件工程)等。

- * 美国工程索引 EI 核心期刊
- * 中国出版政府奖期刊提名奖
- * 中国精品科技期刊
- * 中文核心期刊
- * 百种中国杰出学术期刊
- * 中国最具国际影响力学术期刊

主管单位:中国科学院

主办单位:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所

中国仪器仪表学会

地址:长春市东南湖大路 3888 号

邮编:130033

电话:0431-86176855

传真:0431-84613409

电邮:gxjmgc@sina.com

网址: <http://www.eope.net>

定价:100.00 元/册