

测距成像通信一体化光学系统参数分析

张雅琳¹, 付强^{1,2*}, 姜会林^{1,2}, 王超^{1,2}, 韩龙¹

¹长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022;

²长春理工大学空间光电技术研究所, 吉林 长春 130022

摘要 近年来, 航天技术的蓬勃发展使得空间碎片日益增多, 严重影响在轨航天器的安全运行, 因此需要对空间碎片进行探测和清除。随着对空间碎片探测要求的不断提高, 空间碎片探测系统逐渐向一体化和多功能化的方向发展。提出了一种测距成像通信一体化的光学系统, 通过分析成像跟踪的最大探测距离以及测距通信的接收功率, 优化选取一体化光学系统中的最佳参数。分析得到的最佳遮拦比在 0.144~0.172 范围内, 次镜膜层透射率在 0.3~0.6 范围内, 且最佳透射率为 0.462。该研究为用于空间碎片探测的一体化系统的研究提供参考。

关键词 光通信; 空间碎片; 激光测距; 光学系统

中图分类号 TN929.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0306001

Analysis of Parameters of Integrated Optical System of Ranging, Imaging and Communication

Zhang Yalin¹, Fu Qiang^{1,2}, Jiang Huilin^{1,2}, Wang Chao^{1,2}, Han Long¹

¹College of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China;

²Institute of Space Opto-Electronic Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

Abstract In recent years, space debris is increasing with the development of space technology, and has a serious effect on the safety operation of on-orbit spacecraft. Therefore, it is urgent to detect and remove the space debris. With the increasing demand for space debris detection, the space debris detection system gradually develops to a integrated and multifunctional system. An integrated optical system of ranging, imaging and communication is proposed. The maximum detection range of imaging tracking and the received power of ranging communication are analyzed, and the optimum parameters of the integrated optical system are chosen. The results show that the best obscure ratio is in the range of 0.144-0.172, the transmittivity of secondary mirror film is in the range of 0.3-0.6, and the optimal transmittivity is 0.462. This study provides a reference for the study on the integrated system used for space debris detection.

Key words optical communications; space debris; laser ranging; optical system

OCIS codes 060.4510; 120.6085; 280.3400; 120.3620; 110.2970

1 引言

航天技术的发展使空间碎片日益增多, 空间碎片给航天器带来的危害引起诸多学者的关注。由于受探测距离和大气环境的影响, 以及对微小空间碎片的探测需求越来越多, 空间碎片探测手段逐渐从地基向天

收稿日期: 2016-08-15; 收到修改稿日期: 2016-10-13

基金项目: 国家自然科学基金(91338116)

作者简介: 张雅琳(1987—), 女, 博士研究生, 主要从事激光通信及光学设计方面的研究。E-mail: yalinjs@163.com

导师简介: 姜会林(1945—), 男, 博士, 教授, 院士, 主要从事光学系统设计、光电检测技术及激光通信方面的研究。

E-mail: strich@sina.com

* 通信联系人。E-mail: cust_fuqiang@163.com

基、由单一向复合过渡。天基探测系统的自重和载荷有一定限制,因此对系统的集成性、功能性及多元化的需求日益增多,单一的激光测距与成像探测已经不能满足人类航天快速发展的需求。因此,激光测距成像通信一体化技术是空间碎片天基探测系统发展的必然趋势^[1-4]。美国的 X2000 飞行终端可以实现双向通信、双向激光测距和科学成像等功能。在喷气推进实验室的激光通信和空间成像一体化(ACLAIM)方案中,激光通信天线和空间相机共用一个前置望远镜,以探测器阵列作为捕获跟踪系统,并同时作为成像接收器。^[5-6]。姜会林等^[7]提出了一个可同时实现激光测距、多维成像和激光通信的多功能光学系统。在此基础上,设计了一个用于探测空间碎片的测距成像通信一体化系统,该系统使用一个折反混合卡塞格林系统来实现测距、成像和通信。该系统进一步减小了载荷负担,提高了工作效率和同轴一致性,同时可实现对空间碎片的运行轨道、运行状态、形状、材料组成等信息的快速获取,并对己方光端机进行实时信息传输,满足了卫星载荷的多功能化、小型化和集成化的应用需求。

2 系统组成及原理

测距成像通信一体化系统由成像跟踪分系统、测距分系统和通信分系统三部分组成,三个分系统共用一个折反混合卡塞格林系统。其中,通信分系统又分为粗跟踪单元、精跟踪单元和通信单元。测距成像通信一体化系统示意图如图 1 所示。测距分系统通过测距探测器、跟踪 CCD、处理单元及转台完成对碎片的跟踪和对距离的实时测量,从而确定空间碎片的运行轨迹,为空间碎片的编目提供基础。成像跟踪分系统可对空间碎片进行成像,获得空间碎片的形状、尺寸和类型等信息,以识别空间碎片,并对编目进行铺垫。通信分系统中的粗跟踪单元和精跟踪单元为通信单元提供实时对准,通信单元将测距成像分系统所接收到的空间碎片信息进行处理后调制到通信光中,并将通信光传回地面站或空间站以建立空间碎片的编目数据库,或者可将通信光直接传输至在轨运行的航天器,从而为在轨运行的航天器规避空间碎片提供保障。

2.1 折反混合卡塞格林系统

由图 1 可见,折反混合卡塞格林系统(也称天线系统)由一个旋转分光镜和一个卡式系统组成,其中旋转分光镜可使 400~700 nm 的成像波段和波长为 1064 nm 的测距光波段透射,而使波长为 800 nm 的粗跟踪波段和波长为 1550 nm 的精跟踪波段和通信波段反射。卡式系统的次镜后表面镀膜后,只允许 50% 的可见光通过,其他波长均被反射。因此,该系统可以同时实现两种工作模式:1)反射模式,光线通过主镜后再经次镜反射进入各分系统,具有小视场、高准直度和大口径的特点,可用于成像、测距和通信,视场角约为 0.057° ; 2)折射模式,折反混合卡塞格林系统的折射模式示意图如图 2 所示,光线直接通过次镜折射进入光学系统,具有相对较大的视场,可用于对空间碎片进行扫描和跟踪,视场角约为 $3^\circ \times 3^\circ$ 。

2.2 测距分系统

图 1 所示的测距分系统由发射单元、接收单元、处理单元、透镜及分光片组成,其工作波长为 1064 nm。测距分系统采用位置分光的形式将发射光和接收光分开,所采用分光片的中心为平面反射镜,边缘为平面透射镜。天线系统采用反射模式,光线由发射单元发射并经旋转分光镜透射后发出,经旋转分光镜透射的光被目标反射,利用天线的反射模式接收反射光,利用接收单元接收信息,再通过处理单元对信息进行处理,最终得到测距信息。

2.3 成像跟踪分系统

图 1 所示的成像跟踪分系统由偏振/光谱成像单元、信息融合单元、跟踪接收系统、透镜及分光片组成,其工作波段为可见光,空间碎片的一部分反射光被天线系统的透射模式接收,并到达跟踪接收系统,通过跟踪转台(图中虚线连接)跟踪目标;另一部分反射光被天线系统中的反射光学系统接收,并到达光谱/偏振成像单元,从而得到空间碎片成像的大小、形状、光谱和偏振等信息。

2.4 通信分系统

通信分系统由粗跟踪单元、精跟踪单元和通信单元组成。粗跟踪单元的工作波长为 800/820 nm,粗信标光经过天线系统的反射模式并由旋转分光镜反射后发出,将己方光端机粗信标光的脱靶量提供给旋转分光镜控制单元,并建立连接(图中虚线连接)。精跟踪单元的工作波长为 1545/1555 nm,通信单元的工作波长为 1560/1575 nm,精信标光经过天线系统的反射模式并由旋转分光镜反射后发出,己方精信标光原路返

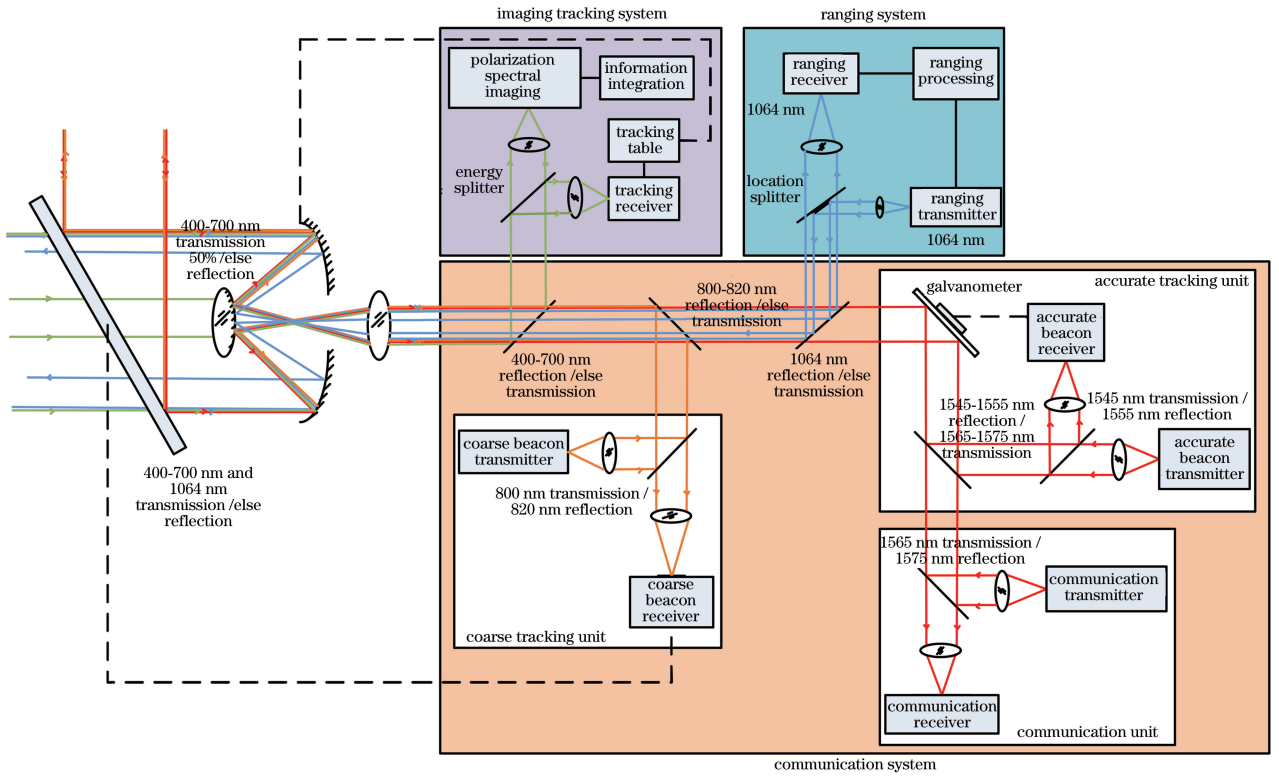


图 1 测距成像通信一体化系统示意图

Fig. 1 Diagram of integrated system of ranging, imaging and communication

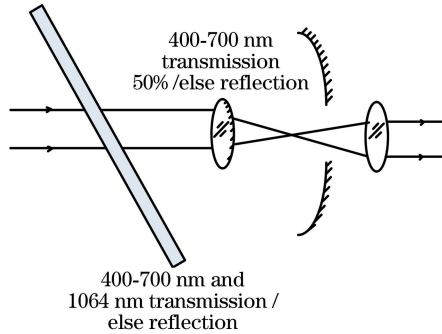


图 2 折反混合卡塞格林系统的折射模式示意图

Fig. 2 Diagram of refractive mode of fold hybrid Cassegrain system

回,并利用振镜(图中虚线连接)实现对准,由通信单元将测距分系统和成像跟踪分系统所得的信息传送给己方光端机。

天线系统中次镜的光学口径为透射模式系统的口径,反射模式的光学口径与透射模式的光学口径相互制约,以下针对主次镜遮拦比以及次镜膜层透射率进行分析与计算。

3 主次镜的遮拦比计算

3.1 测距分系统及通信分系统对遮拦比的要求

3.1.1 测距分系统

在测距分系统中,将空间碎片作为漫反射小目标来进行计算,探测器接收的信号功率 P_r [8-11] 为

$$P_r = P_t \frac{KA_r \delta \rho \cos \phi}{\theta^2 R^4} T_t T_r T_a, \quad (1)$$

式中 P_t 为发射单元的发射功率; K 为光速轮廓函数; A_r 为有效接收面积; δ 为目标反射截面; ρ 为目标表面

的反射效率; ϕ 为目标反射法线与发射光束之间的夹角, $\cos \phi = 1$; θ_i 为发散角; R 为空间目标与探测器之间的距离, 设 $R = 100 \text{ km}$; T_t 为发射光学系统的透射率; T_r 为接收光学系统的透射率; T_a 为良好天气下的大气透射率。

设主镜口径为 D , 次镜口径为 d , 遮拦比 $k = d/D$, $0 < k < 1$ 。探测器接收的信号功率为有效接收面积 A_r 的函数, 有效接收面积 A_r 与遮拦比 k 的关系满足

$$A_r = S_D - S_d = \frac{\pi}{4} (D^2 - k^2 D^2), \quad (2)$$

式中 S_D 为主镜面积, S_d 为次镜面积。设 $D = 500 \text{ mm}$, 则 $d = 500k$ 。

3.1.2 通信分系统

对于通信分系统, 通信链路的传输方程为^[12-14]

$$P_r = P_t G_t \eta_{ot} L_r \eta_s L_{APT} G_r \eta_{or} \eta_a, \quad (3)$$

式中 G_t 为发射光学天线的增益; η_{ot} 为发射单元的光学效率; L_r 为自由空间损耗; η_s 为信道引起的功率损失; L_{APT} 为捕获跟踪瞄准系统对准失配引起的功率损耗; G_r 为接收光学天线的增益; η_{or} 为接收单元的光学效率; η_a 为实际束散角与衍射极限角的额外功率损耗。通信分系统的接收功率为发射光路损耗 η_{ot} 的函数, 发射光路损耗与遮拦比 k 的关系为

$$\eta_{ot} = 10 \lg(S_d/S_D) = 10 \lg k^2. \quad (4)$$

根据(1)、(2)式, 可以得到测距分系统的接收功率与遮拦比的变化关系, 如图 3(a) 所示。根据(3)、(4)式, 可以得到通信分系统的接收功率与遮拦比的变化, 如图 3(b) 所示。由图 3 可知, 当系统的遮拦比增加时, 即次镜面积增大时, 测距分系统的接收功率随遮拦比的增加而减小, 通信分系统接收的能量随遮拦比的增加而减小。此外, 遮拦比的大小对接收功率的影响很小, 在遮拦比的变化范围内, 测距分系统的接收功率和通信分系统的接收功率均可被探测器接收。速率为 2.5 Gbit/s 的激光通信接收器的最低响应功率约为 -30 dBm 。因此, 当遮拦比范围为 $0.1 \sim 0.9$ 时, 通信分系统和测距分系统均满足探测要求。

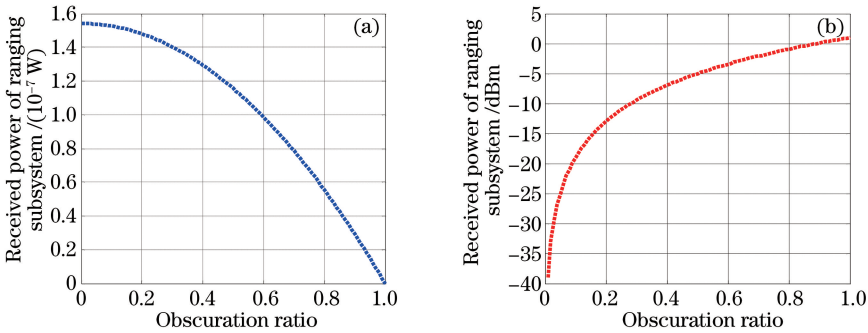


图 3 (a) 测距分系统的接收功率随遮拦比的变化; (b) 通信分系统的接收功率随遮拦比的变化

Fig. 3 (a) Relationship between received power of ranging subsystem and obscuration ratio; (b) relationship between received power of communication subsystem and obscuration ratio

3.2 成像跟踪分系统对遮拦比的要求

对于成像跟踪分系统, 极限探测距离^[15]满足

$$L \leq \sqrt{\frac{\pi D_e^2 S_1 \eta \epsilon t_0 \tau_0 \rho M_1 \bar{\lambda} \cos \theta_1 \cos \theta_2}{2 h c n [T_{sn}^2 + \sqrt{T_{sn}^4 + 4(N_d + N_b) T_{sn}^2}]}}, \quad (5)$$

式中 D_e 为光学系统的有效通光口径; S_1 为空间目标的有效接收面积; η 为平均量子效率; ϵ 为像元填充因子; t_0 为曝光时间; τ_0 为光学系统的透射率; M_1 为太阳对空间目标的辐照度, 在 $0.4 \sim 0.7 \mu\text{m}$ 的可见光范围内, 太阳对空间目标的辐照度 $M_1 = 550 \text{ W/m}^2$; $\bar{\lambda}$ 为波长的平均值; θ_1 为太阳光的入射方向与目标表面法线方向的夹角; θ_2 为探测器和目标的连线与空间目标法线方向的夹角; h 为普朗克常数; c 为真空中光速; n 为目标光斑在探测器上所占的像元数; T_{sn} 为信噪比阈值; N_d 为暗电流产生的光电子数; N_b 为背景噪声产生的光电子数。

成像系统和跟踪系统的极限探测距离为有效接收面积 S_1 的函数,由于成像跟踪分系统采用透射系统,透射系统的口径取决于卡式系统次镜的口径,因此成像跟踪分系统的口径即为次镜的口径。有效接收面积与遮拦比的关系满足

$$S_1 = S_D - S_d = \frac{\pi}{4} (D^2 - k^2 D^2), \quad (6)$$

$$S_1 = S_d = \pi \left(\frac{d}{2}\right)^2 = \frac{\pi}{4} (k^2 D^2). \quad (7)$$

根据 (5)~(7) 式,得到成像系统和跟踪系统的极限探测距离随遮拦比的变化,如图 4 和表 1 所示。

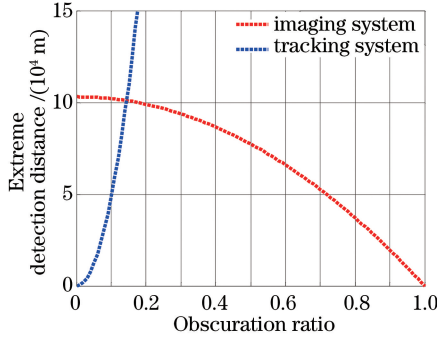


图 4 成像系统与跟踪系统的极限探测距离随遮拦比的变化

Fig. 4 Variations in extreme detection distances of imaging system and tracking system with obscuration ratio

表 1 成像系统与跟踪系统的极限探测距离随遮拦比的变化

Table 1 Variations in extreme detection distances of imaging system and tracking system with obscuration ratio

Obscuration ratio	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3	0.35	0.4
Extreme detection distance of imaging system / (10^5 m)	1.0205	1.0076	0.9895	0.9664	0.9380	0.9045	0.8659
Extreme detection distance of tracking system / (10^5 m)	0.4859	1.0933	1.9437	3.0370	4.3732	5.9525	7.7747

由图 4 和表 1 可知,当遮拦比增加时,即次镜面积增大时,成像系统的极限探测距离减小,跟踪系统的极限探测距离增大。空间碎片与卫星碰撞时的相对速度约为 10 km/s,从光学系统探测到空间碎片的信息到航天器规避空间碎片的反应时间约为 10 s,因此当卫星与空间碎片之间的距离大于 100 km 时需探测到目标。当遮拦比约为 0.15 时,可以满足成像系统的探测距离与跟踪系统的探测距离同时达到 100 km。实际上,成像系统的极限探测距离 L 大于 100 km 时, $k < 0.172$ 。跟踪系统的极限探测距离 L 大于 100 km 时, $k > 0.144$,因此得到遮拦比的范围为 $0.144 < k < 0.172$ 。

4 次镜膜层透射率

由于测距成像通信一体化系统的特殊性,次镜膜层的透射率与反射率是一对相互制约的参数。增大次镜膜层的透射率,则进入跟踪系统中的能量增多,而进入反射系统中的能量减少,反之亦然。设折反混合卡塞格林系统次镜膜层的透射率为 ρ' ,则反射率为 $1 - \rho'$ 。成像系统和跟踪系统的极限探测距离均为透射率的函数,则有

$$L_c = f[\tau_{oc}(\rho')], \quad (8)$$

$$L_g = f[\tau_{og}(\rho')], \quad (9)$$

$$\tau_{oc}(\rho) = t_1 t_2(\rho') t_3 t_4, \quad (10)$$

$$\tau_{og}(\rho) = t'_1 t'_2(\rho') t'_3 t'_4, \quad (11)$$

式中 f 为函数, L_c 和 L_g 分别为成像系统和跟踪系统的极限探测距离; t_1 和 t'_1 分别为成像系统和跟踪系统中旋转分光镜的透射率, $t_1 = t'_1 = 0.9$; $t_2(\rho')$ 和 $t'_2(\rho')$ 分别为成像系统和跟踪系统中卡式系统的透射率,满足

$$t_2(\rho') = 1 - \rho', \quad (12)$$

$$t'_2(\rho') = \rho'; \tag{13}$$

t_3 和 t'_3 分别为成像系统和跟踪系统中分光镜的透射率, $t_3 = t'_3 = 0.9$; t_4 和 t'_4 分别为成像系统和跟踪系统中的能量分光比, 设分光镜的反射率与透射率的比为 1:1, 则成像系统和跟踪系统的透射率均为 0.5。根据(8)~(13)式, 可以得到成像系统和跟踪系统的极限探测距离随透射率的变化, 如图 5 所示。

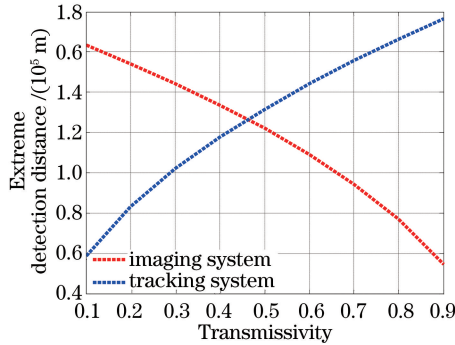


图 5 成像系统和跟踪系统的极限探测距离随透射率的变化

Fig. 5 Variations in extreme detection distances of imaging system and tracking system with transmissivity

表 2 成像系统和跟踪系统的极限探测距离随透射率的变化

Table 2 Variations in extreme detection distances of imaging system and tracking system with transmissivity

Transmissivity	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
Extreme detection distance of imaging system / (10 ⁵ m)	1.6355	1.5420	1.4424	1.3354	1.2190	1.0903	0.9443	0.7710	0.5452
Extreme detection distance of tracking system / (10 ⁵ m)	0.5882	0.8319	1.0188	1.1765	1.3153	1.4409	1.5563	1.6638	1.7647

由图 5 与表 2 可知, 随着透射率的增加, 成像系统的极限探测距离逐渐减小, 而跟踪系统的极限探测距离逐渐增大, 且当极限探测距离 L 大于 100 km 时, 结合成像系统要求的 $\rho' < 0.6$ 和跟踪系统要求的 $\rho' > 0.3$, 得到透射率 ρ' 的取值范围为 $0.3 < \rho' < 0.6$, 且当透射率为 0.462、反射率为 0.538 时得到最优解。

5 结 论

提出了测距成像通信一体化系统, 重点分析了一体化系统的指标参数, 阐述了测距成像通信一体化系统的工作流程; 分析了两种工作模式下天线系统的遮拦比与系统性能之间的关系, 得到遮拦比的范围为 $0.144 < k < 0.172$ 。进一步研究了系统性能与卡式系统次镜膜层透射率之间的关系, 得到次镜膜层透射率范围为 $0.3 < \rho' < 0.6$, 其中最佳透射率为 0.462。测距成像通信一体化系统可实现对空间碎片的测距、跟踪及成像, 并可得到的信息以激光通信的方式传输给己方光端机, 为空间碎片的探测和编目提供了新的方法和理论依据。

参 考 文 献

[1] Jiang Huilin, Hu Yuan, Ding Ying, *et al.* Optical principle research of space laser communication network[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(10): 1006003.
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.

[2] Wang Guoyu. Analysis of the international consultation mechanism for space debris and its development[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2015, 32(2): 147-152.
王国语. 空间碎片国际机制发展趋势分析[J]. 航天器环境工程, 2015, 32(2): 147-152.

[3] Li Wei. Research on integration technique of laser ranging and communication[J]. Laser & Infrared, 2013, 43(12): 1345-1347.
李 玮. 激光通信/测距一体化技术研究[J]. 激光与红外, 2013, 43(12): 1345-1347.

[4] Wan Qiang, Guo Yanlong, Wang Xiaobing, *et al.* Present status and progress of laser cooperative targets for SLR[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2005, 42(5): 20-23.

- 万 强, 郭延龙, 王小兵, 等. 卫星激光测距合作目标技术现状和进展[J]. 激光与光电子学进展, 2005, 42(5): 20-23.
- [5] Kervin P W, Africano J L, Sydney P F, *et al.* Small satellite characterization technologies applied to orbital debris[J]. Advances in Space Research, 2005, 35(7): 1214-1225.
- [6] Ratliff B M, LeMaster D A, Mack R T, *et al.* Detection and tracking of RC model aircraft in LWIR microgrid polarimeter data[C]. SPIE, 2011, 8160: 816002.
- [7] Jiang Huilin, Fu Qiang, Zhang Yalin, *et al.* Discussion of the laser ranging with polarization spectral imaging observations and communication technology for space debris[J]. Infrared & Laser Engineering, 2016, 45(4): 0401001.
姜会林, 付 强, 张雅琳, 等. 空间碎片激光探测成像通信一体化技术探讨[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(4): 0401001.
- [8] Zhang He, Zhang Xiangjin. Theory and technology of near-field target detection of pulsed laser[M]. Beijing: Science Press, 2013.
张 合, 张祥金. 脉冲激光近场目标探测理论与技术[M]. 北京: 科学技术出版社, 2013.
- [9] Li Yuqiang, Li Zhulian, Fu Honglin, *et al.* Experimentation of diffuse reflection laser ranging of space debris[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(9): 0908001.
李语强, 李祝莲, 伏红林, 等. 空间碎片漫反射激光测距试验[J]. 中国激光, 2011, 38(9): 0908001.
- [10] Tian Yuzhen, Zhao Shuai, Guo Jin. Analysis of non-cooperative target photon counting laser ranging[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(5): 0514002.
田玉珍, 赵 帅, 郭 劲. 非合作目标光子计数激光测距技术研究[J]. 光学学报, 2011, 31(5): 0514002.
- [11] Xue Li, Zhai Dongsheng, Li Yuqiang, *et al.* Ranging capability analysis for laser ranging system using superconducting nanowire detectors[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(3): 0304001.
薛 莉, 翟东升, 李语强, 等. 基于超导探测器的激光测距系统作用距离分析[J]. 光学学报, 2016, 36(3): 0304001.
- [12] Jiang Huilin, Tong Shoufeng. The technologies and systems of space laser communication[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2011: 9-22.
姜会林, 佟首峰. 空间激光通信技术与系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011: 9-22.
- [13] Zhao Xin, Song Yansong, Tong Shoufeng, *et al.* Dynamic demonstration experiment of acquisition, pointing and tracking system in space laser communications[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(3): 0305005.
赵 馨, 宋延嵩, 佟首峰, 等. 空间激光通信捕获、对准、跟踪系统动态演示实验[J]. 中国激光, 2014, 41(3): 0305005.
- [14] Jiang Huilin, Jiang Lun, Song Yansong, *et al.* Research of optical and APT technology in one-point to multi-point simultaneous space laser communication system[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(4): 0405008.
姜会林, 江 伦, 宋延嵩, 等. 一点对多点同时空间激光通信光学跟瞄技术研究[J]. 中国激光, 2015, 42(4): 0405008.
- [15] Zhang Ying, Niu Yanxiong, Yang Lu, *et al.* Analysis and study on detection capability of satellite photoelectric imaging system[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(1): 0111004.
张 颖, 牛燕雄, 杨 露, 等. 星载光电成像系统探测能力分析与研究[J]. 光学学报, 2014, 34(1): 0111004.