

# 导航卫星中激光通信/测距一体化技术及链路特性分析

赵馨<sup>1</sup> 牛俊坡<sup>2,3</sup> 刘云清<sup>1</sup> 佟首峰<sup>1</sup> 王世峰<sup>1</sup>

<sup>1</sup>长春理工大学电子信息工程学院, 吉林 长春 130022

<sup>2</sup>上海卫星工程研究所, 上海 200240

<sup>3</sup>上海市深空探测技术重点实验室, 上海 200240

**摘要** 数据传输与精密测距是导航卫星实现精密定位、时间同步的前提。应用激光方式实现星间数据传输与测距, 在增加系统抗干扰性、保密性、抗截获能力的同时, 可以显著提高系统的通信速率与测距精度, 从而增加导航卫星自主导航能力。根据星间链路特性, 结合现有激光通信、测距技术提出了一种采用相干探测与数据帧相结方式的测通体制, 给出了复合系统组成原理及工作流程。考虑实际导航卫星星座, 应用STK软件完成可通率、链路距离、多普勒频移等链路特性分析。在给定链路距离、光学系统参数情况下对星间链路功率进行了预算。

**关键词** 光通信; 导航卫星; 激光通信; 激光测距; 链路特性

中图分类号 TN929.1; P228.5

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.060601

## Laser Communication/Ranging Integrated Technology and Link Characteristics in Navigation Satellite System

Zhao Xin<sup>1</sup> Niu Junpo<sup>2,3</sup> Liu Yunqing<sup>1</sup> Tong Shoufeng<sup>1</sup> Wang Shifeng<sup>1</sup>

<sup>1</sup>School of Electronic Information Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

<sup>2</sup>Shanghai Institute of Satellite Engineering, Shanghai 200240, China

<sup>3</sup>Shanghai Key Laboratory of Deep Space Exploration Technology, Shanghai 200240, China

**Abstract** Data transmission and precise distance measurement are necessary to high precision orbit determination and time synchronization in navigation satellite system. The abilities of anti-interference, confidentiality and anti-interception are improved by laser transmitting data and ranging in inter-satellite. Also the ability of autonomous navigation is improved significantly. Taken the inter-satellite link characteristics, laser communication and ranging into comprehensive consideration, a kind of integration system is proposed by combination of coherent detection and data frame ranging. System principle and working process are given. According to the actual navigation satellite constellation, link characteristics such as available probability, link distance, doppler frequency shift are studied via STK software. Also link power is calculated when link distance and the parameters of optical system are given. It is used to design the laser communication and ranging integration system.

**Key words** optical communications; navigation satellite; laser communication; laser ranging; link characteristics

**OCIS codes** 060.4510; 040.1345; 040.2840; 230.3120

## 1 引言

北斗二号卫星导航系统是中国自主研发、独立运行的另一个全球卫星导航系统, 预计在2020年前后将建成具有区域增强和全球覆盖能力的北斗导航卫星星座, 建成后的空间段包括24颗中轨道卫星(MEO)、3颗高轨道卫星(GEO)和3颗倾斜轨道卫星(IGSO)。在导航卫星同轨间、异轨间、星地间进行测控信息传输及距离测量可以实现导航卫星精密定轨与时间同步, 这对提高导航卫星自主运行能力与导航卫星定位精度至关重要。目前, 星间、星地链路采用K $\alpha$ 波段, 扩频非相干信息帧通信测距体制, 通信速率在几万比特每秒的量级, 测距精

收稿日期: 2014-11-08; 收到修改稿日期: 2014-12-14; 网络出版日期: 2015-05-29

基金项目: 上海市深空探测技术重点实验室开放课题基金(13dz2260100)

作者简介: 赵馨(1977—), 男, 博士, 副教授, 主要从事空间激光通信技术、光电技术等方面的研究。

E-mail: gps.ins@163.com

度在分米级,无法满足未来测控、运控系统大容量数据星间传递及自主导航精度等方面的需求<sup>[1-2]</sup>。

空间激光通信系统具有宽带、高速、抗截获能力强、轻小型、低功耗等突出特点,使其非常适合深空、星际、星地、空空、空地等链路通信,因而掀起了其研制热潮<sup>[3-4]</sup>。空间激光测距与激光通信有许多相似性,例如,它们都需要指向、捕获、跟踪(PAT)单元,脉冲时序检测,都有可能受到大气影响等<sup>[5]</sup>,因此,可以把它们结合为一个系统,通过发送/接收单束激光实现通信与测距功能的复合。最早由 Degnan 等<sup>[6]</sup>提出在 SLR2000 卫星激光测距机上加装波长为 1550 nm 附近的激光用于和卫星建立双向通信,充分体现了激光通信与测距一体化思想。2009~2010 年,俄罗斯在 GLONASS-K 卫星装载星间激光测距通信系统并完成在轨试验,链路距离为 55000 km,信息速率为 50 kbit/s,测距精度为 3 cm。LISA 系统通过距离的精密测量反演地球重力场,相干激光外差探测完成超远距离下精密距离测量,同时兼具通信功能,在链路距离  $5 \times 10^6$  km 时实现 19 cm 的测距精度,24 kbit/s 的通信速率<sup>[7-9]</sup>。2013 年 9 月,美国宇航局完成月地之间激光链路建立,实现下行 622 Mbit/s、上行 20 Mbit/s 的数据传输,测距精度为 3 cm<sup>[10]</sup>。

可以看出,激光通信与测距复合已经成为星间链路的发展趋势。随着导航卫星对数据率、测距精度要求的不断提高,将系统复合并应用到卫星上正逐渐成为研究热点。本文主要研究激光测距/通信一体化技术及其在导航卫星上应用,重点研究其链路特性,并给出仿真分析结果。

## 2 激光通信/测距一体化技术

通信与测距复合不是简单的功能叠加,而是深层次的组合。针对导航卫星链路特性,结合现有激光通信与激光测距技术,提出了一种外差相干解调与数据帧相结合的通信与测距复合系统,组成原理如图 1 所示。

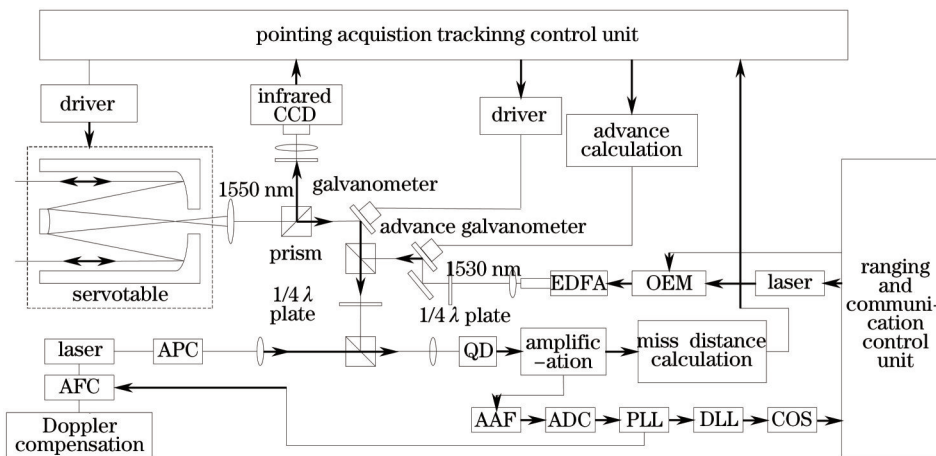


图 1 激光通信/测距复合系统组成原理

Fig.1 Principle of laser communication and ranging integrated system

测通终端依据自身时间基准,在一个历元内双向发射数据帧信号,激光外差相干解调提取数据帧获得传输信息,同时根据对方传输时间同步信息时间距离计算。其中通信为相干通信体制,测距为异步应答式。

系统的指向、捕获、跟踪单元使用无信标捕获与相干跟踪技术,通过大执行角度振镜,实现大范围快速扫描,红外 CCD 相机提取粗跟踪信号;红外象限探测器(QD)完成信号解调与跟踪复合应用,有效减小系统体积;接收波长为 1550 nm,本振光与入射光在 QD 上完成相干混频,经后续自动增益放大(AAF)、模数转换(ADC)、锁相环(PLL)、延时环(DLL)和通信与测距信息处理单元(COS)等实现频率跟踪与伪码跟踪,最终完成通信与测距信息提取;本振激光发射时需经过自动频率调整(AFC)及自动功率调整(APC),频率需要自适应调整以补偿由于相对运动引起的多普勒频移;发射使用 1530 nm 激光,经过集成电路处理单元(OEM)和光放大器(EDFA)、提前量振镜等单元后,通过共用光学系统发射出去;共用卡塞格林望远单元、光学中继、双色分光片、1/4 波片等光学元件。

复合系统工作过程主要包括初始指向、快速捕获、动态跟踪、动态链路 4 个阶段,具体流程如图 2 所示。

## 3 链路特性分析

导航卫星链路与其他卫星链路不同,为满足精密定轨与时间同步的要求,需要在同轨道间、异轨道间进

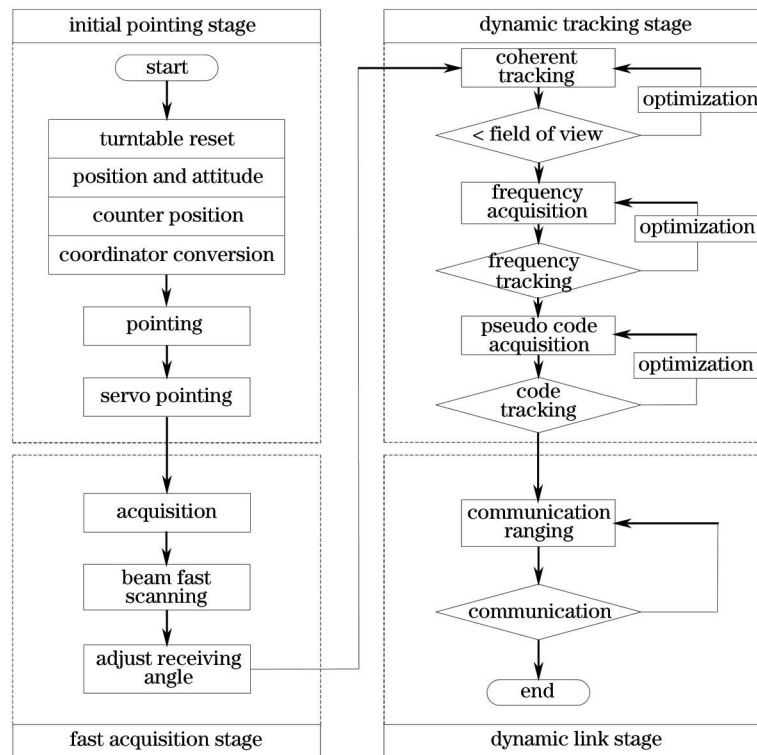


图2 工作流程

Fig.2 Working process

行链路的快速切换、快速建链、快速通信与测距,还可能涉及与 GEO 卫星建链,以其作为中继卫星,向地面传输信息<sup>[1]</sup>。因此,导航卫星间的可通性、星间距离、相对速度、多普勒频移、提前量等链路特性对复合系统的视轴指向、捕获、跟踪,通信/测距体制选取,链路功率预算等都会产生影响。

应用 STK 软件对链路特性进行仿真计算。24 颗 MEO 卫星采用 Walker24/3/2 星座构形,轨道倾角为  $55^\circ$ ,轨道高度为 22116km,三个轨道的升交点黄经(RAAN)分别为  $0^\circ$ 、 $120^\circ$ 、 $240^\circ$ ,每个轨道均匀布置 8 颗星,其中第一轨道 8 颗星分别用 S11、S12、S13、S14、S15、S16、S17 和 S18 表示,第二轨道 8 颗星分别用 S21、S22、S23、S24、S25、S26、S27 和 S28 表示,第三轨道 8 颗星分别用 S31、S32、S33、S34、S35、S36、S37 和 S38 表示。3 颗 GEO 定点于东经  $58.75^\circ$ 、 $80^\circ$ 、 $110.5^\circ$ ,分别用 G1、G2 和 G3 表示,具体卫星轨道分布如图 3 所示。这里没有给出 MEO 与 IGSO 之间链路仿真,主要考虑多数情况下都是以 GEO 作为中继星,向地面传输数据。

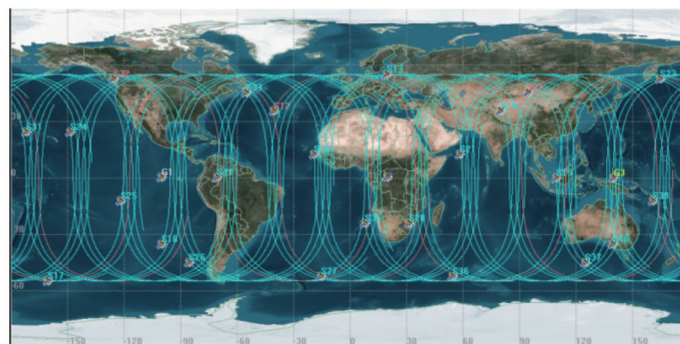


图3 卫星轨道分布

Fig.3 Satellite orbit distribution

### 3.1 可通性

图 4 给出能够与第一轨道的某颗 MEO 进行通信并位于第二轨道上的 MEO 数量。可以看出对于某一轨道上的某个 MEO,在任何时刻,在其他同一轨道上至少有 6 颗 MEO 与其可见。

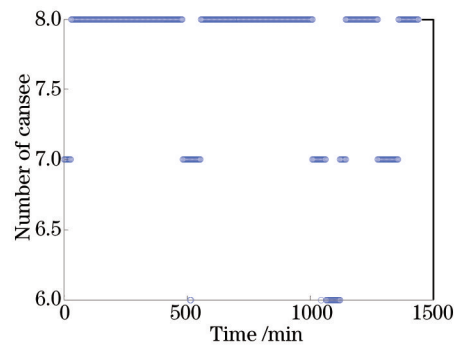


图4 MEO第一轨道与第二轨道间可通性分析

Fig.4 MEO feasibility analysis between first track and second track

### 3.2 链路距离

图5给出不同时刻位于第二轨道上的8颗MEO与第一轨道的某颗MEO的距离仿真结果。图6给出不同时刻位于第一轨道上的第一颗MEO与同轨道上其他MEO的距离。可以看出MEO卫星间的通信距离小于 $6 \times 10^4$  km,这是进行链路能量预算的基础。

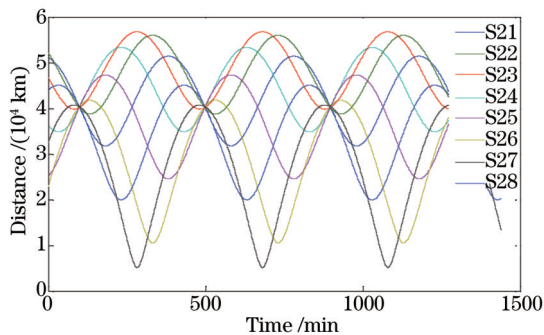


图5 MEO第一轨道与第二轨道间距离仿真

Fig.5 MEO distance simulation between first track and second track

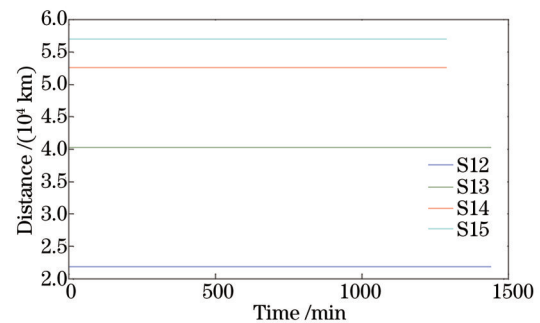


图6 MEO第一轨道间距离仿真

Fig.6 MEO distance simulation between first track

### 3.3 相对速率

图7给出不同时刻第二轨道上的8颗MEO与第一轨道的某颗MEO的相对速度,图8给出不同时刻GEO与第一轨道的某颗MEO的相对速度。可以看出MEO之间的相对速度小于 $6.5$  km/s,而GEO与MEO之间的相对速度小于 $3.1$  km/s。

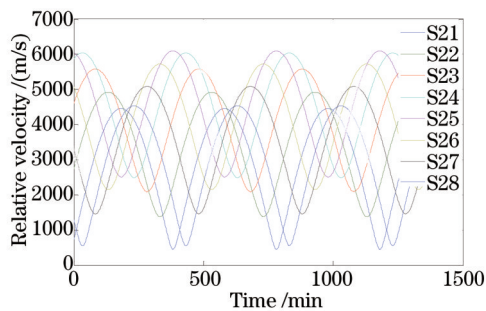


图7 MEO第一轨道与第二轨道间的相对速度

Fig.7 MEO relative velocity between first track and second track

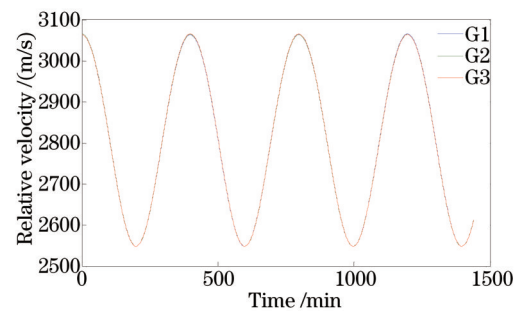


图8 GEO与MEO第一轨道之间相对速度

Fig.8 Relative velocity between GEO track and first MEO track

### 3.4 多普勒频移

图9给出不同时刻第二轨道上的8颗MEO与第一轨道某颗MEO的多普勒频移,图10给出不同时刻GEO与第一轨道某颗MEO的多普勒频移。可以看出,不同轨道的MEO之间的多普勒频移绝大部分为 $0.5 \sim 4$  GHz,而MEO与GEO之间的多普勒频移为 $1.6 \sim 2$  GHz。

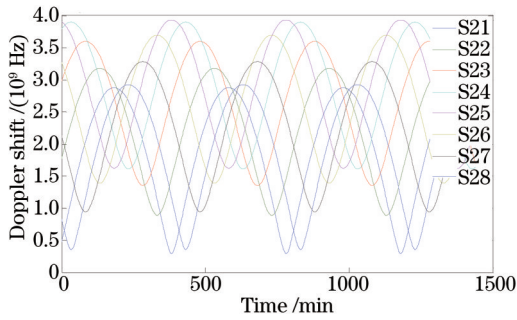


图9 MEO第一轨道与第二轨道间多普勒频移  
Fig.9 MEO doppler frequency shift between first track and second track

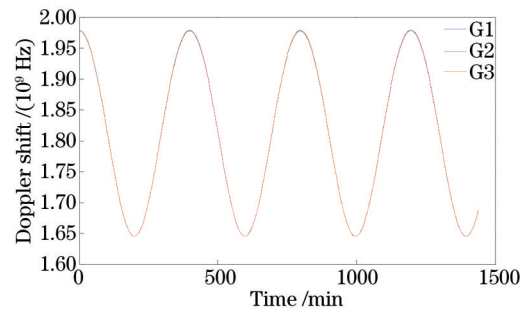


图10 GEO与MEO第一轨道间多普勒频移  
Fig.10 Doppler frequency shift between GEO track and first MEO track

### 3.5 提前量

图11给出不同时刻第二轨道上8颗MEO与第一轨道某颗MEO之间的提前量,图12给出不同时刻3颗GEO与第一轨道某颗MEO之间的提前量。可以看出MEO之间提前量最大值可以达到1 mrad,而多数情况下主要集中在0.3 mrad以下,而GEO与MEO之间提前量在0.2 mrad以下。

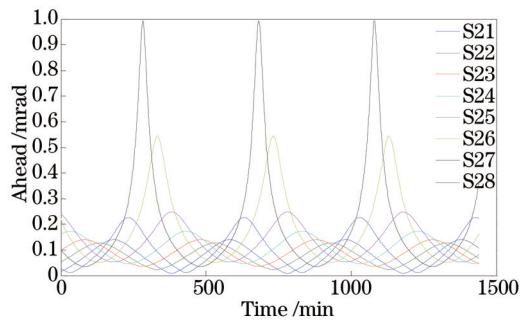


图11 MEO第一轨道与第二轨道间提前量  
Fig.11 Ahead between first MEO track and second MEO track

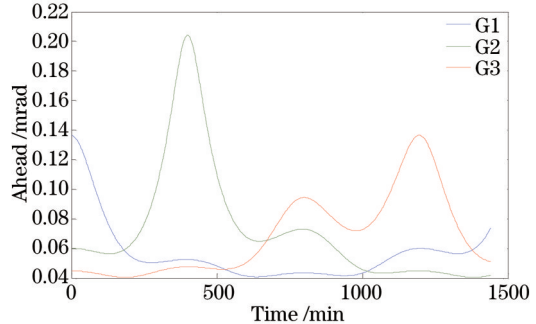


图12 GEO与MEO第一轨道间提前量  
Fig.12 Ahead between GEO track and first MEO track

## 4 链路功率预算

星间、星地链路的功率分析是链路特性的一个主要部分,是总体方案设计的重要环节。对于激光星间链路而言,接收到的功率应该满足捕获、跟踪、测距、通信性能指标要求。如果考虑星地链路还存在上行与下行链路功率的差别,只有链路功率分析满足要求,系统才能可靠、正常工作。

链路的传输方程皆可以用以下的通用表达式描述<sup>[12]</sup>:

$$P_r = P_i \cdot \eta_{oi} \cdot G_i \cdot L_r \cdot \eta_s \cdot L_{PAT} \cdot G_r \cdot \eta_{or}, \quad (1)$$

式中  $P_r$  为探测器接收功率,  $P_i$  为发射光源的发射功率,  $G_i$  为发射天线增益,  $\eta_{oi}$  为发射光学单元的效率,  $L_r$  为空间传输损耗,其表达式为  $L_r = D^2 / (\theta \cdot L)^2$ , 其中  $D$  为接收口径,  $\theta$  为激光束散角,  $L$  为链路距离,  $\eta_s$  为信道引起的功率损失,  $L_{PAT}$  为PAT对准失配引起的功率损耗,  $G_r$  为接收天线增益,  $\eta_{or}$  为接收光学系统效率。

根据链路特性分析结果及适合星载下的光学系统指标,对链路功率预算进行仿真,具体计算条件如表1所示。在链路功率计算时考虑GEO作为数据中继星使用时,其通信速率要高,所以MEO间的光学口径选为100 mm,而MEO与GEO间的光学口径选为150 mm。波长统一取1550 nm,实际应用时收发波长错开。

按表1给出的光学系统参数设置,结合(1)式,当激光发射功率都为2 W时,得到的链路功率预算如表2所示。

如果考虑GEO卫星作为中继下行传输数据的话,在考虑上述损耗的同时,必须考虑大气信道散射损耗、大气闪烁损耗等影响,地面多点布站和大口径接收是必须采取的技术。

表1 光学系统仿真参数

Table 1 Optical system simulation parameters

Link mode	MEO-MEO	MEO-GEO
Distance /km	60000	70000
Emission diameter /mm	100	150
Receiving diameter /mm	100	150
Wavelength /nm	1550	1550
Divergence angle / $\mu$ rad	50	35
Optics amplification coefficient	10	10
Safety margin	1.4	1.4
Receiving view angle / $\mu$ rad	0.3	0.3
Tracking residual / $\mu$ rad	3	3
Optics transmittance	0.7	0.7
Luminosity density spectrum / $[W/(m^2 \cdot nm \cdot sr)]$	0.2	0.2
Spectrum	-	-
Day angle /( $^\circ$ )	20	20
Filter bandwidth /nm	3	3

表2 链路功率预算计算结果

Table 2 Calculations of link power budget

	MEO-MEO	MEO-GEO
Emission power /dBm	33	33
Emission loss /dB	-1.6	-1.6
Free space loss /dB	-87.9	-84.3
Receiving loss /dB	-2.2	-2.2
Receiving power /dBm	-58.7	-55.1
Coding gain /dB	6	6
Detection sensitivity /dBm	-57	-57
Safety margin /dB	4.3	5.9

## 5 结 论

提出激光通信/测距一体化技术,通过一束激光实现信标、通信、测距功能,而且是共用光学、电子学等单元,可以在很大程度上减小系统重量、功耗与体积。其中所涉及的无信标捕获、相干探测、相干跟踪、数据帧测距等关键技术已在国内外文献中有所报道,因此,从理论上本系统是可行的,为一体化系统设计指明了一个方向。根据导航卫星对链路要求和一体化系统组成原理,对链路特性中所涉及的可通率、链路距离、相对速度、多普勒频移、提前量、功率预算进行了分析与计算,相应结果将对实际设计激光通信与测距复合系统起到指导作用。

## 参 考 文 献

- Xu Yong, Chang Qing, Yu Zhijian. On new methods of measurement and communication techniques of GNSS inter-satellite links[J]. Science China Technological Sciences, 2012, 42(2): 230-240.  
徐 勇, 常 青, 于志坚. GNSS星间链路测量与通信新方法研究[J]. 中国科学: 技术科学, 2012, 42(2): 230-240.
- Zhao Xin, Liu Yunqing, Tong Shoufeng. Line-of-sight initial alignment model and test in dynamic space laser communication[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(5): 0505009.  
赵 馨, 刘云清, 佟首峰. 动态空间激光通信系统视轴初始指向建模及验证[J]. 中国激光, 2014, 41(5): 0505009.
- Mark Gregory, Frank Heine, Hartmut Kämpfner, *et al.*. Commercial optical inter-satellite communication at high data rates[J]. Optical Engineering, 2012, 51(3): 031202.
- 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.
- 5 Zhao Gang, Zhou Xuhua, Wu Bin. Precise orbit determination of Haiyang-2 using satellite laser ranging[J]. Chinese Science Bulletin, 2012, 57(36): 3475-3483.
- 赵罡, 周旭华, 吴斌. 海洋二号卫星 SLR 精密定轨[J]. 科学通报, 2012, 57(36): 3475-3483.
- 6 Degnan J, McGarry J, Zagwodzki T, *et al.*. SLR2000: an inexpensive, fully automated, eyesafe satellite laser ranging system[C]. Proceedings of the 10th International Conference on Laser Ranging Instrumentation, Shanghai, China, 1996: 367-377.
- 7 Danielle M R, Wuchenich, Christoph Mahrtdt, *et al.*. Laser link acquisition demonstration for the GRACE follow-on mission[J]. Optics Express, 2014, 22(9): 11351-11366.
- 8 Qu Weijing, Wu Bin, Zhou Xuhua. Variations of the earth's gravity field from VRACE, geophysical model and satellite laser ranging[J]. Acta Geodaetica et Gartographica Sinica, 2012, 41(6): 904-909.
- 曲伟菁, 吴斌, 周旭华. 根据人卫激光测距、GRACE 和地球物理模型求解地球低阶重力场季节变化[J]. 测绘学报, 2012, 41(6): 904-909.
- 9 Gerald Hechenblaikner, Reinhold Flatscher. Fundamental performance determining factors of the ultrahigh-precision space-borne optical metrology system for the LISA pathfinder mission[C]. SPIE, 2013, 8789: 87890X.
- 10 Xiaoli Sun, David R Skillman, Evan D Hoffman, *et al.*. Free space laser communication experiments from earth to the lunar reconnaissance orbiter in lunar orbit[J]. Optics Express, 2013, 21(2): 1865-1871.
- 11 Yu Xiaonan, Tong Shoufeng, Zhao Xin, *et al.*. Simulation system of the beacon pointing and acquisition process in the satellite laser communication[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(8): 0805007.
- 于笑楠, 佟首峰, 赵馨, 等. 基于合作信标的卫星激光通信瞄准捕获仿真系统[J]. 中国激光, 2014, 41(8): 0805007.
- 12 Jiang Huilin, Tong Shoufeng, Zhang Lizhong, *et al.*. Technology and System of Space Laser Communication[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2010.
- 姜会林, 佟首峰, 张立中, 等. 空间激光通信技术与系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.

栏目编辑: 史敏