

# 基于码元同步环路的激光测距通信一体化算法优化研究

李梦思, 谌 明, 张 靛, 李晓亮, 李英飞  
(北京遥测技术研究所 北京 100076)

**摘要:** 精密测距与高速通信一体化技术已发展成为星间激光链路的主要研究方向之一。为了探究基于空间激光通信系统的通信解调算法对测距性能的影响机理, 根据现有的激光通信系统架构, 分析了测距通信一体化系统的工作原理, 搭建了基于码元同步的激光测距通信一体化系统模型, 分析了基于 Gardner 同步环路信号跟踪系统的测距精度, 并对鉴相算法进行了优化。理论和仿真证明, 优化后的码元同步环能够同时实现码元同步判决和距离解算, 并得到了 4 dB 的噪声容忍度提升, 其测距方差主要与基带成型滤波参数、环路带宽、载噪比以及鉴相增益等因素有关。该算法简洁, 不受载波相位影响, 对高阶调制具有良好的兼容性, 适用于空间激光链路系统, 丰富了测距通信一体化理论, 为后续一体化系统设计提供了仿真依据。

**关键词:** 激光通信; 激光测距通信一体化; 码元同步; 插值环路

中图分类号: V474 文献标识码: A 文章编号: CN11-1780(2022)03-0103-06

DOI: 10.12347/j.ycyk.20220109001

**引用格式:** 李梦思, 谌明, 张靛, 等. 基于码元同步环路的激光测距通信一体化算法优化研究[J]. 遥测遥控, 2022, 43(3): 103-108.

## Research on the optimization of the integrated algorithm of laser ranging and communication based on the symbol synchronization loop

LI Mengsi, CHEN Ming, ZHANG Liang, LI Xiaoliang, LI Yingfei  
(Beijing Research Institute of Telemetry, Beijing 100076, China)

**Abstract:** The integrated technology of precision ranging and high-speed communication has developed into one of the main research direction of inter-satellite laser links. In order to explore the influence mechanism of the communication demodulation algorithm based on the space laser communication system on the ranging performance, according to the existing laser communication system architecture, this paper analyzes the working principle of the integrated system of ranging and communication, and builds a laser based on symbol synchronization. Based on the integrated system model of ranging and communication, the ranging accuracy of the signal tracking system based on Gardner synchronous loop is analyzed, and the phase detection algorithm is optimized. Theory and simulation prove that the optimized symbol synchronization loop can realize symbol synchronization judgment and distance calculation at the same time, and obtain a 4 dB noise tolerance improvement. The ranging variance is mainly related to baseband shaping filter parameters, loop bandwidth, carrier noise. It is related to factors such as ratio and phase detection gain. The algorithm is simple, not affected by the carrier phase, has good compatibility with high-order modulation, and is suitable for space laser link systems. The system model and algorithm proposed in this paper enrich the theory of ranging and communication integration, and provide simulation basis for the subsequent integrated system design.

**Key words:** Laser communication; Integration of laser communication and ranging; Symbol synchronization; Interpolation synchronization

DOI: 10.12347/j.ycyk.20220109001

**Citation:** LI Mengsi, CHEN Ming, ZHANG Liang, et al. Research on the optimization of the integrated algorithm of laser ranging and communication based on the symbol synchronization loop[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2022, 43(3): 103-108.

## 引言

随着空间技术的发展, 航天任务日益复杂化, 空间科学对星间测控、通信等方面提出了更高的要求。基于激光的通信测距一体化技术, 将通信和测距技术融合, 在通信带宽、测量精度、抗电磁干扰、设备功耗等方面具有突出优势, 具有更好的环境适应性, 可以满足日益复杂化和多样化的各类航天任务, 是航天飞行器测控通信发展的重要方向。

早在 1997 年, 美国就提出了同时具有激光测距和通信功能的 X2000 系统。2005 年, 俄罗斯的 GLONASS-K 卫星建立了国际首个星间激光链路, 实现了测距精度达 10 cm 的星间测距, 通信速率为 50 kbit/s, 通信误码率优于  $10^{-4}$ , 链路建立最快时间小于 10 s。为后续的通信与测距一体化技术提供了新的发展思路。随着星间激光链路技术的发展, 基于码元同步技术的测距通信一体化技术成为激光通信测距一体化方案研究热点。2013 年, 美国的月球激光通信星载终端在 PPM 调制的激光链路上通过提取码元同步的相位实现了厘米级别的测距精度, 充分展示了激光通信测距一体化的巨大潜力<sup>[1]</sup>。

目前, 关于星间激光链路的通信理论得到了较为广泛且深入的研究<sup>[2-4]</sup>, 而基于相同链路的测距理论分析较少。此外, 关于激光测距通信一体化系统的实现形式、具体的融合算法、时频传递功能的进一步拓展等诸多技术问题都仍有较大的探索空间。为丰富激光测距通信一体化理论, 寻求更高效、更优化的激光测距通信一体化方案, 本文提出了基于 Gardner 码元同步环路的通信测距一体化方案, 这一同步处理算法在通信信号处理中仅需要 2 个采样点即可还原出原始信号, 且不受载波相位影响, 适应相干和非相干调制体制, 兼容高阶相位调制, 适用于高速信号处理系统。本文根据环路跟踪原理, 从理论上对测距通信一体化技术的测距方差进行推导分析, 依据分析结果对鉴相算法进行优化设计, 并通过仿真实验验证了优化算法的可行性。根据不同距离、信噪比下的仿真结果, 分析了不同因素对测距结果的影响。

## 1 测距通信一体化原理

星间测距的本质是对目标间传输信号在空间中的飞行时间进行精密测量, 从而解算出目标间的距离。在发射端的数据中插入测距标识, 在接收端探测标识到达的时刻, 通过时间差推算发射端到接收端的距离。得益于空间激光链路的通信编码原理, 在一个双向双工的空间激光通信系统中, 可以利用具有识别性的通信编码作为标识, 如: 与时钟整秒时刻对齐的帧同步头比特的下降沿作为标识等, 便于接收端识别帧同步头以及记录标识到达时刻。

对于一般的非相干通信, 接收端对所接收信号的处理原理如图 1 所示。激光信号由光学天线进行收集, 经过光电探测器转换为电信号, 电信号经过 AD 采样后进行载波、码元以及帧同步解码等处理后获取通信信息。同时, 码元同步以及帧同步模块输出相应的参数, 由测距模块进行相应的解算, 获得距离信息。

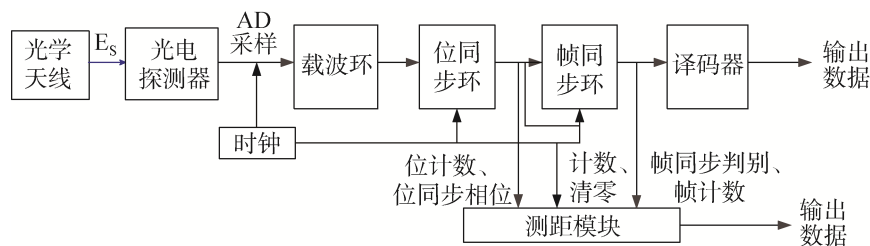


图 1 激光测距通信一体化系统信号处理流程图

Fig. 1 The process of integration system of laser communication and ranging

具体而言, 链路通信双方约定在某个帧 (假设为第 0 帧) 同步头的信息流最后一个比特发射出去后开始记录当前的时间  $t_s(t - \tau)$ , 在接收到相同的帧同步头 (即另一端发射的第 0 帧的帧头) 最后一位后, 记录下当前到达的时间  $t_u(t)$ , 读出数据中的整秒以及整帧的数据, 同时, 提取帧内同步的码元数以及码元同步的相位等高精度计时信息, 与整秒信息一起进行高精度解算。最后根据所得的飞行时间, 推算出

所测距离为：

$$R = cT_R = c[t_u(t) - t_s(t - T_R)] = c \times (N_F \times L_F + N_b + \frac{\Delta\varphi}{2\pi}) / rate \quad (1)$$

其中， $c$  是光速， $T_R$  是光的飞行时间。 $N_F$  是数据帧计数， $L_F$  是帧长， $N_b$  是码元计数， $\Delta\varphi$  是码元相位，通过码元同步进行提取， $rate$  为码元速率。式 (1) 中， $(N_F \times L_F + N_b) / rate$  是一个整数项，代表着终端在发射测距标识到接收到相应的测距标识的过程中，终端处理码元总数所对应的时间，而  $\Delta\varphi$  则是标识与本地时钟对比时小于一个码元的相位值，这个值的提取相当于对码元周期进行了进一步的细分。在空间大范围的测距中，利用帧同步头所携带的信息，加入一定周期的帧计数和秒计数，可以拓展测量范围。最终通过信息识别以及脉冲计数可以简单有效地获取测距中的码元整数信息，其测量精度直接与时钟关联。从式 (1) 中可以看出， $\Delta\varphi$  的提取精确程度决定了整个系统测距的精确程度。因此，本文重点对码元相位提取技术展开研究。

## 2 码元相位提取及算法优化分析

根据码元同步原理，为保证信号采样处于最佳判决时刻，需要对信息的时序与本地时序的差异进行校对，尽可能地识别每个码元信号的电平保持范围，并在合适的时刻进行采样。Gardner 算法通过判断信号零点位置，推算出最佳判别时刻。测距算法根据判别时刻的 NCO (Numerically Controlled Oscillator) 值来估算码元相位。如图 2 所示，Gardner 同步环是由插值滤波器、定时误差检测器、环路滤波器以及 NCO 组成。

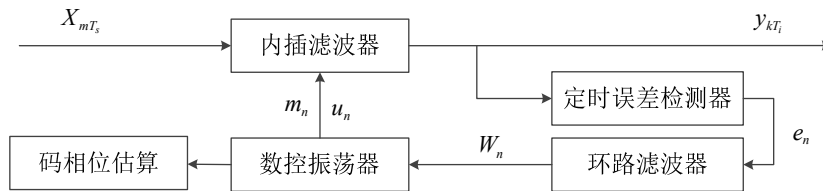


图 2 Gardner 插值同步环组成原理图

Fig. 2 The structure and principle of Gardner symbol synchronous ring

定时误差检测器检测输入信号  $X_{mT_s}$  的定时偏差，获得与定时误差成比例的误差信号  $e_n$ ，误差信号经环路滤波器抑制噪声和高频分量，输出环路控制字  $W_n$ ，NCO 根据控制字调整的输出内插控制信息  $m_n$  和  $u_n$ ，内插滤波器根据 NCO 输出的控制信息调制输出采样时刻，最终由插值滤波器得到最佳采样时刻，得到输出  $y_{kT_i}$ 。根据同步关系，可以得到所需的码元相位为：

$$\frac{\Delta\varphi}{2\pi} = \frac{\text{ChipNCO}}{2^{\text{NCO}_{\text{word}}}} \quad (2)$$

其中，ChipNCO 是 NCO 寄存器中保存的 NCO 相位，作为码元相位的估算值。 $\text{NCO}_{\text{word}}$  是码环 NCO 的相位寄存器位数。

信号中的噪声是影响系统测距精度的主要因素。假设输入信号中的噪声是高斯白噪声，功率密度为  $N_0/2$ ，环路带宽为  $B_n$ ，则根据环路跟踪原理，噪声导致的环路抖动为：

$$\sigma_{\Delta\tau}^2 = 2B_n \text{var}\{E_n^2\} / K^2 \quad (3)$$

式中  $E_n$  为噪声经过鉴相器后的输出值， $K$  为鉴相增益。由式 (3) 可知，最终探测到的码元相位抖动主要受到环路带宽以及鉴相算法的影响。对于高斯白噪声，环路带宽对噪声起到限制作用，带宽越小，噪声功率越小，环路抖动则越小，但是过小的环路带宽也会影响环路的动态跟踪性能，因此需要在设计时进行综合考虑。而鉴相算法相当于对噪声进行了一次变换，有  $\text{var}\{E_n^2\} = N_0/2$ 。而变换的增益越高，最终误差抖动越小。根据经典的 Gardner 算法，鉴相器的输出为：

$$e_n = z_{(n-1/2)}[z_n - z_{(n-1)}] \quad (4)$$

利用离散自相关原理可以得到相应的鉴相函数  $S$  函数为<sup>[6]</sup>:

$$S(\tau) = 2\sqrt{C}G_1\left(\frac{1}{2}\right)\sin\left(\frac{2\pi\tau}{T_m}\right) \quad (5)$$

式中  $C$  为信号功率,  $T_m = 1/\text{rate}$  是码元周期,  $G_1(\Delta) = \frac{6\beta}{\Gamma(3+\Delta\beta)\Gamma(3-\Delta\beta)}$  为与基带成型带宽有关的系数, 而  $\beta$  为基带成型滤波器的剩余带宽比值。Gardner 环路的鉴相函数具有  $\sin$  函数性质, 相比于线性鉴相函数,  $\sin$  函数在零点附近具有更高的增益:

$$K \approx \left. \frac{\partial S(\tau)}{\partial \tau} \right|_{\tau=0} = \frac{4\pi\sqrt{C}G_1\left(\frac{1}{2}\right)}{T_m} \quad (6)$$

为了进一步提高鉴相增益, 压缩噪声方差, 本文对经典 Gardner 算法进行了适当的改进。在式 (6) 中, 若保持信号功率和码元速率不变, 则成型滤波器的系数是影响鉴相增益的主要因素, 成型滤波器系数与滤波器剩余带宽以及鉴相延迟间的关系如图 3 所示。可以看出, 带宽要求不变时, 有  $G_1(0) > G_1\left(\frac{1}{2}\right)$ 。而系数取  $G_1(0)$  时, 对应的鉴相函数为:

$$e_n = z_n^2 - z_{(n-1/2)}^2 \quad (7)$$

然而这一函数值使用了一个符号采样的后半部分, 这样一来如果 NCO 初始相位偏离大于半个码元周期, 则码元输出相位容易发生跳变, 因此在进行同步时需要初始相位进行判别和限制。最终得到相应的  $S$  函数为:

$$S(\tau) = G_1(0)\sin\left(\frac{2\pi\tau}{T_m}\right) \quad (8)$$

相应的增益为  $K \approx \frac{4\pi\sqrt{C}G_1(0)}{T_m}$ , 设  $c$  为光速, 则最终得到的测距方差可以表示为:

$$\sigma_{\Delta R} \approx \frac{Tc}{3\pi\beta} \sqrt{\frac{B_n}{C/N_0}} \quad (9)$$

### 3 仿真分析

为了验证新鉴相算法相比于传统 Gardner 算法所获得的误差压制效果, 分别对 Gardner 算法和改进算法得到的测距方差进行仿真分析。设码元速率为 1 Gbps、基带额外带宽  $\beta = 0.5$ , 带宽为  $B_n = 2 \times 10^5$  Hz, 换算得到对应的信噪比  $E_0/N_0 = 10$  dB。改进鉴相算法用于距离解算以及通信解调的仿真结果如图 4 所示。为确保仿真数据的可靠性, 图 4 (a) 中每个距离值的仿真均进行了 200 次的重复实验, 所得的结果为实验平均值, 图 4 (b) 为码元判别与原始数据的对比示意图。结果表明, 鉴相算法的改进对通信判别结果没有产生影响, 这一算法可以同时实现信号的码元同步功能和测距功能, 且测距方差并不会随着距离产生明显的变化, 影响测距精度的主要因素是环路的跟踪精度。通过调整环路带宽, 获得在距离不变的条件下, 对不同的  $E_0/N_0$  条件下的测距方差仿真结果如表 1 所示, 不难发现, 环路的噪声对测距精度的影响较大。

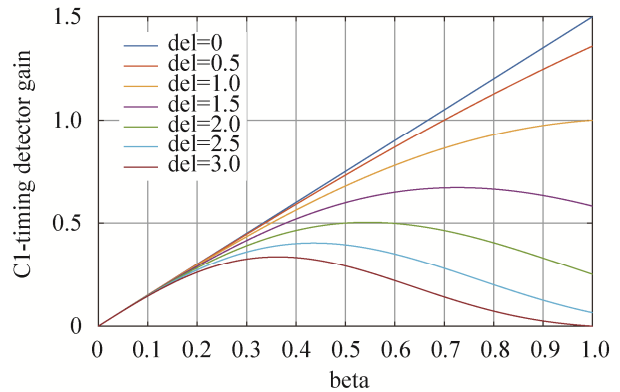


图 3 成型滤波器系数与滤波器剩余带宽以及鉴相延迟间的关系图

Fig. 3 Timing detector gain with different  $\Delta$  and  $\beta$

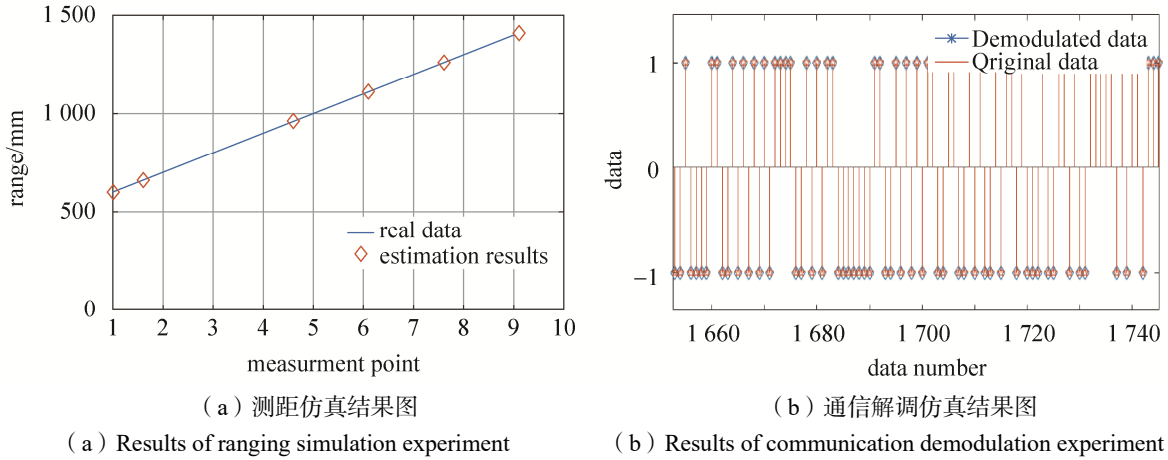


图 4 仿真结果图  
Fig. 4 Results

表 1 不同信噪比下的仿真结果

Table 1 Jitter standard deviation simulation results in different SNR

$E_0/N_0$ (dB)	2	4	6	8	10
测距方差 (mm)	2.886 6	1.540 7	0.889 3	0.596 0	0.372 8

图 5 为改进前后两种判别算法所得的测量结果，在其他条件不变的情况下，原始的 Gardner 算法得到的测距方差为 0.806 mm，而改进的鉴相算法得到的测距方差为 0.376 mm。对比表 1 可以看出，改进的鉴相算法使得测距方差得到了明显的收敛，在相近的测距方差下，改进算法的噪声容忍度获得了近 4 dB 的提升。

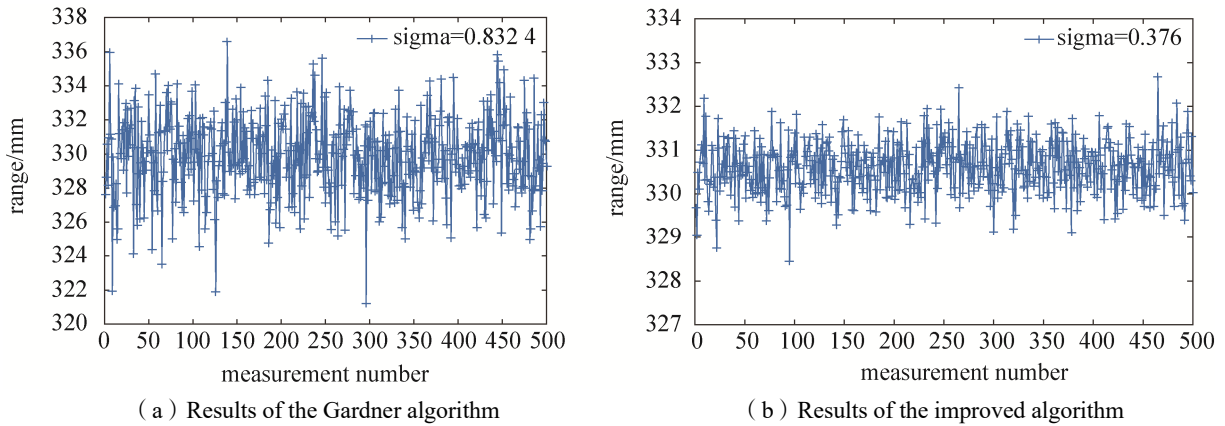


图 5 算法改进前后测距仿真对比图

Fig. 5 Simulation comparison of distance measurement before and after algorithm improvement

综上所述，采用 Gardner 码元同步技术可以同时实现对信号数据的最佳采样判决和高精度测距。测距精度受到环路和信号的多种参数影响，通过调整基带的成型滤波参数、降低同步环路带宽提高信噪比以及采用增益更高的鉴相算法等手段可以有效压缩测距抖动方差。不过，在具体的环路设计时，仍需要综合考虑实际项目背景以及通信技术要求，如小的环路带宽可以有效减小测距方差，然而环路带宽过窄则会降低环路动态性能等。

### 4 结束语

随着空间激光技术的发展，空间激光通信理论得到了蓬勃发展，随之兴起的激光测距一体化技术中关于测距的理论研究仍有较大发展空间。本文提出了基于 Gardner 码元同步环路的测距一体化算法，该

算法实现了测距和通信功能的高度集成。通过理论公式推导以及仿真实验, 验证了改进算法的正确性, 揭示了信号噪声、鉴相算法、环路带宽、基带成型滤波器参数等多个参数对测距精度的影响, 丰富了测距通信一体化计数理论, 为后续设计研究提供了仿真依据。

### 参考文献

- [1] STEVENS ML, PARENTI RR, WILLIS MM, et al. The lunar laser communication demonstration time-of-flight measurement system: overview, on-orbit performance and ranging analysis[J]. Free-Space Laser Communication and Atmospheric Propagation, 2016, 9739: 973908.
- [2] 刘向南, 李英飞, 向程勇, 等. 激光测距通信一体化技术研究及深空应用探索[J]. 深空探测学报, 2018, 5(2): 147-153, 167.  
LIU Xiangnan, LI Yingfei, XIANG Chengyong, et al. Study on integrated technique of laser ranging and communication and its applications in deep space[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2018, 5(2): 147-153, 167.
- [3] 徐皓. 导航卫星星间链路激光调制技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.
- [4] 张中英, 刘涛, 蒙松松, 等. 基于激光高速通信信号的精密测量方法与性能分析[J]. 空间电子技术, 2019, 16(1): 38-41, 48.  
ZHANG Zhongying, LIU Tao, MENG Yansong, et al. The precision range method and performance analysis based on the laser high-speed communication signal[J]. Space Electronic Technology, 2019, 16(1): 38-41, 48.
- [5] GARDNER F. A BPSK/QPSK timing-error detector for sampled receivers[J]. IEEE Transactions on Communications, 1986, 34(5): 423-429.
- [6] YANG Sung-Moon Michael. Modern digital radio communication signals and systems[M]. Springer, 2019: 470-478.
- [7] 付永明, 朱江, 琺瑯琺. Gardner 定时同步环路参数设计及性能分析[J]. 通信学报, 2012, 33(6): 192-198.  
FU Yongming, ZHU Jiang, JU Yingjue. Parameters design and performance analysis of the timing recovery loop based on Gardner timing detector[J]. Journal on Communications, 2012, 33(6): 192-198.
- [8] 寇艳红. GNSS 软件接收机与信号模拟器系统研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2006.
- [9] PROAKIS J G. 数字通信(第五版)[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009.
- [10] 季仲梅, 杨洪生, 王大鸣, 等. 通信中的同步技术及应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.
- [11] 晏蕾, 余荣, 梅顺良, 等. 全数字接收机中定时同步算法和实现[J]. 电子技术应用, 2005, 31(12): 45-47.
- [12] MENGALI U, ANDREA A N D. Synchronization techniques for digital receivers[M]. New York: Plenum, 1997.
- [13] 邢强林, 李舰艇, 唐嘉, 等. 激光载波统一系统方案构想[J]. 飞行器测控学报, 2009, 28(2): 36-44.  
XING Qianglin, LI Jianting, TANG Jia, et al. Conception of a unified laser TT&C system[J]. Journal of Spacecraft TT&C Technology, 2009, 28(2): 36-44.
- [14] 刘阳, 温冠宇. 空间探测中测距与通信一体化研究[J]. 无线光通信, 2014, 38(12): 42-44.  
LIU Yang, WEN Guanyu. Study on space target detection and measurement integration of communication[J]. Optical Communication Technology, 2014, 38(12): 42-44.
- [15] 李玮. 激光通信/测距一体化技术研究[J]. 激光与红外, 2013, 42(12): 1345-1347.  
LI Wei. Research on integration technique of laser ranging and communication[J]. Laser and Infrared, 2013, 42(12): 1345-1347.
- [16] 张靓, 杜中伟, 谌明, 等. 激光测控通信技术研究进展与趋势[J]. 飞行器测控学报, 2016, 35(1): 10-20.  
ZHANG Liang, DU Zhongwei, CHEN Ming, et al. Progress and trends of development of laser TT&C technology[J]. Journal of Spacecraft TT&C Technology, 2016, 35(1): 10-20.

### [作者简介]

- 李梦思 1995 年生, 硕士研究生, 主要研究方向为激光测控通信。  
 谌明 1977 年生, 硕士, 研究员, 主要研究方向为测控通信。  
 张靓 1986 年生, 硕士, 工程师, 主要研究方向为激光通信和量子通信。  
 李晓亮 1979 年生, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为测控通信。  
 李英飞 1986 年生, 硕士, 工程师, 主要研究方向为卫星导航技术。