

距离千米级双望远镜的空间碎片激光测距

龙明亮¹, 张海峰^{1,2*}, 邓华荣¹, 汤凯¹, 张忠萍^{1,2}, 张阿丽³

¹中国科学院上海天文台, 上海 200030;

²中国科学院空间目标与碎片观测重点实验室, 江苏 南京 210008;

³中国科学院新疆天文台, 新疆 乌鲁木齐 830011

摘要 以上海天文台收发分离的 21 cm/60 cm 口径卫星激光测距系统为例, 利用高精度计时器、光电探测器等设备, 对发射/接收系统的时延分别进行测量与标定, 测量地面靶目标所得到的发射/接收系统的总时延与常规地面靶目标测量方法的测量均值相比, 时延标定误差为 400 ps。在此基础上, 利用高精度时钟系统, 并在解决远距离望远镜回波信号探测距离门控制问题的条件下, 实现了相距 2.5 km 的双望远镜系统对距离大于 1000 km 的空间碎片目标的测量, 验证了远距离接收空间碎片目标激光回波信号的能力。

关键词 遥感; 卫星激光测距; 多台望远镜接收; 系统时延; 距离门控; 远距离探测

中图分类号 P412

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.0228002

Laser Ranging for Space Debris Using Double Telescopes with Kilometer-Level Distance

Long Mingliang¹, Zhang Haifeng^{1,2*}, Deng Huarong¹, Tang Kai¹,
Zhang Zhongping^{1,2}, Zhang Ali³

¹Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China;

²Key Laboratory of Space Object and Debris Observation, Chinese Academy of Sciences,
Nanjing, Jiangsu 21008, China;

³Xinjiang Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Urumqi, Xinjiang 830011, China

Abstract In this paper, using high-precision timers, photoelectric detectors, and other equipment, the laser transmitting and receiving system delays for a 60-cm receiving telescope aperture system at the Shanghai Observatory are measured and calibrated, with a transmitting telescope aperture of 21 cm. By comparing the result of a target measurement by a space debris laser ranging (SDLR) system on the ground with the measured results of the conventional target measurement, we find that the calibration error of delay is approximately 400 ps. On this basis, using a high-precision clock system in a laser ranging system, SDLR is achieved for the first time in China using a single telescope to send laser pulses and double telescopes with a distance of 2.5 km to receive laser echoes, solving the problem of detection range gate control of echo signals from the remote telescope. This system realizes a range distance of over 1000 km. The proposed method demonstrates the ability to receive laser echoes from space debris from a remote distance on the ground with multiple telescopes.

Key words remote sensing; satellite laser ranging; multiple-telescope receiving; system time delay; range gate control; remote distance detection

OCIS codes 280.3400; 280.5600; 350.1260

1 引 言

卫星激光测距是卫星距离测定精度最高的测量

方法,在卫星精密定轨、建立和维护全球地球参考框架、实现全球范围的高精度时间传递、广域相对论研究等方面获得了广泛应用^[1-4]。卫星激光测距技术

收稿日期: 2019-07-22; 修回日期: 2019-08-15; 录用日期: 2019-09-19

基金项目: 国家自然科学基金(U1631240, 11503068)、博士后创新人才计划(BX201700270)、博士后第 62 批面上基金(2017M621562)

* E-mail: hfzhang@shao.ac.cn

的测量目标已从距离为数百至数万千米的卫星发展到月球甚至行星际,测量目标类型从传统的带反射器的合作目标(镜面反射)拓展到非合作目标(表面漫反射),包括失效卫星、航天器残骸、火箭体及其解体碎片等^[5-9]空间碎片。

空间碎片的漫反射激光测距的主要特点是激光回波信号微弱,探测难度大^[7-8,10-12]。在同样的测量条件下,轨道高度为 1000 km、直径为 10 cm 的目标的漫反射激光回波信号仅相当于轨道高度为 6000 km 的带反射器 Lageos 卫星的 $10^{-6} \sim 10^{-7}$ ^[11]。激光回波信号与距离的 4 次方成反比,远距离空间碎片的激光回波信号更加微弱。地面激光测距系统对激光回波信号的接收能力与望远镜的接收面积成正比,采用大口径望远镜接收十分有利于微弱激光回波信号的探测^[7]。在目前的地月激光测距中,望远镜的口径基本均在米级以上^[13],而对于深空激光测距,则需要接收口径更大的望远镜。

空间目标返回的激光信号在到达地面站时可覆盖一定的区域,因此,在激光束覆盖区域内设置多台望远镜进行激光回波信号的接收、探测,可增加单位时间内的激光回波数,等效实现了单台大口径望远镜对激光回波信号的接收能力。Vilnrotter 等^[14]对 N 个相等的口径为 M (单位为 m) 的光学望远镜阵进行了研究,发现它可以达到 \sqrt{NM} 口径望远镜的接收效果,并采用该望远镜阵进行相关试验。利用奥地利 Graz 站发射的强激光(200 mJ@532 nm,脉宽 3 ns,重复频率 80 Hz)对空间碎片进行了测量,以欧洲 Zimmerwal(瑞士,相距 600 km)、Wetzell(德国,相距 400 km)以及 Herstmonceux(英国,相距 1200 km)作为接收端,接收到了激光的回波信号,验证多站接收的可行性^[12]。上海天文台基于相距为 55 m 的双望远镜系统进行了卫星激光测距试验研究,结果表明,1.56 m 与 60 cm 的双望远镜可以等效为一台口径约为 1.61 m 的望远镜系统,验证了基于多望远镜信号接收的激光测距系统在探测能力上的优势^[7,15]。

为了精确获得目标至地面台站接收望远镜的距离,得出更精确的距离门控值,需要对测量系统的时延进行标定。在望远镜激光测距系统中,通常采用测量已知距离的地面上的靶目标(简称地靶)的方法来测量地靶的时延,从而获得测量系统的时延^[16]。对于多台望远镜测量系统,各望远镜接收系统的电气参数及光路并不完全一致,且与发射系统分离,无法采用地面靶目标的测量方法标定系统的时延。为了获得多台望远镜测量系统的时延,Prochazka

等^[17]采用双事件计时器等器件实现了望远镜测距系统时延的测量与校准。本文基于上海天文台激光收发分离光路的卫星激光测距系统,利用高精度计时器、光电探测器等设备对激光发射和接收系统各组成部分的时延进行测量。为更好地进行空间碎片测距,引入距离门控值以排除系统所带来的偏差,本课题组采用高精度时钟系统在国内开展了单望远镜激光发射,双望远镜(相距 2.5 km)同时接收的空间碎片激光测距试验研究,为多台望远镜激光测距系统在卫星激光测量上的应用提供基础。

2 激光测距发射接收系统的时延分析

2.1 卫星激光测距基本原理与系统组成

激光测距基本测量原理为

$$R = \frac{(t_2 - t_1 - t_0)c}{2}, \quad (1)$$

式中: R 为卫星至地面站的距离; t_1 为地面系统的激光发射时刻; t_2 为地面系统的激光接收时刻; t_0 为地面测量系统相对地面坐标参考点的时延; c 为光传播速度。地面测量系统的时延 t_0 包含相对地面坐标参考点的发射端时延 t_{01} 与接收端时延 t_{02} 。

卫星激光测距的系统框图如图 1 所示。首先从计算机控制系统中下载卫星轨道预报 (orbit prediction) 参数,采用计算机控制系统 (satellite laser ranging control system) 对轨道预报参数进行处理,将其转换成可执行的文件,发出控制指令,控制伺服系统 (servo system),跟踪机架 (telescope mount) 开始跟踪,在编码器 (encoder) 的反馈下实现精确的跟踪,并由接收系统的监视 CCD 监测卫星的位置。此时地面人员通过计算机发出点火信号 (laser fire) 的发射指令,激光器点火输出,一方面由光电管 (PIN) 探测激光发射的脉冲信号,经恒比定时器 (discriminator) 鉴别后开启事件计时器 (event timer),计算机终端记录主波信号时刻 t_1 ; 另一方面激光通过折反射及望远镜发射系统发射,照射至卫星上,并被卫星反射,反射激光即激光回波信号到达地面上,被接收望远镜系统接收,并发射至光子探测器 (detector) 上,由光子探测器接收,产生探测信号,并通过电平转换至事件计时器,获得回波时刻 t_2 。为了精确测量距离,需要精确的时间/频率基准 (time/frequency reference) 提供高精度的秒脉冲 1 pulse/s 与 10 MHz 信号获得高精度的各时刻值。同时,通过距离门控电路 (range gate generator) 在卫星回波返回时刻准确开启光子探测器,得到激光

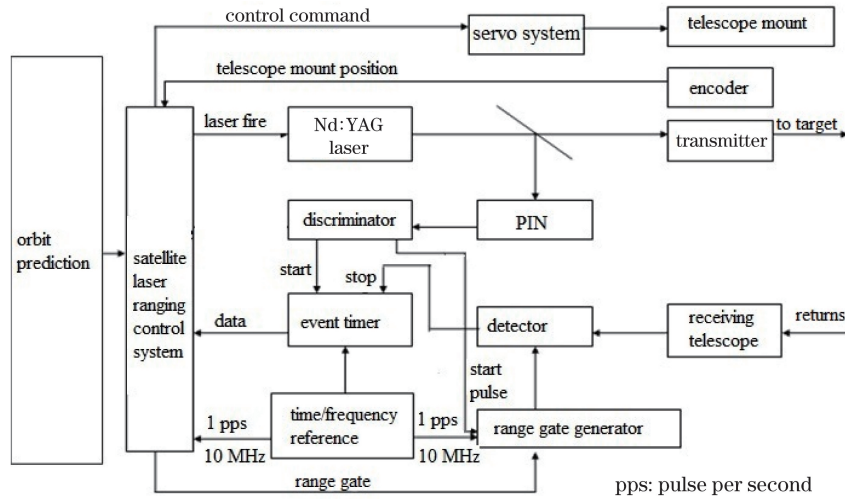


图 1 上海天文台卫星激光测距系统框图

Fig. 1 Structural diagram of Shanghai Observatory's satellite laser ranging system

输出与激光返回的时间差,从而获得卫星与地面的距离。此时测得的时刻 t_1 、 t_2 包含了测距系统中信号线、恒比定时器、电平转换器等带来的系统时延,即主波到事件计时器的发射时延以及回波至事件计时器的接收时延。为了精确测得卫星的距地距离,需要对系统时延进行测量,从测距时间差 $t_2 - t_1$ 中减去系统相对地面坐标参考点的时延 t_0 。

2.2 卫星激光测距的发射/接收系统及时延构成

卫星激光测距系统由发射系统与接收系统组成,相对地面坐标参考点的时延测量与卫星测距系统构成如图 2 所示,其中:Z 为主波信号探测器;D 为激光至主波信号探测器及发射望远镜的等光程点;DB1 为发射恒比定时器;DB2 为电平转换器;TS 为事件计时器,计时精度 < 10 ps;O 为望远镜测距的坐标点;M1、M2、M3、M4、M5、M6 为 45° 高反镜;TC 为发射望远镜;R 为接收望远镜;T 为光子探测器。透过 M1 的微弱激光被主波信号探头 Z 探测接收,M7 与 M8 组成地面靶目标测量的回波回路装置。望远镜指向 M7 与 M8,M7 和 M8 发射激光,由事件计时器 TS 测得地靶测距均值时间 t_{03} 。激光测距望远镜系统指向卫星获得激光发射的事件计时器计时时刻 t_1 与激光被卫星反射至接收望远镜系统接收的事件计时器计时时刻 t_2 的时间差 $t_2 - t_1$,再减去地靶测距均值时间 t_{03} ,然后通过计算可得到卫星至地靶装置 M7、M8 的距离 L 。结合地面参考点的时延,即可获得卫星至地面望远镜参考点的距离。当采用多台望远镜时,地靶装置 M7、M8 无法满足多台望远镜对卫星测距中的地靶均值、同时测定的要求。此时,为了精确地获得卫星至望远镜地面

参考点的距离,需要分别对发射系统与接收系统的系统时延进行精确测定。

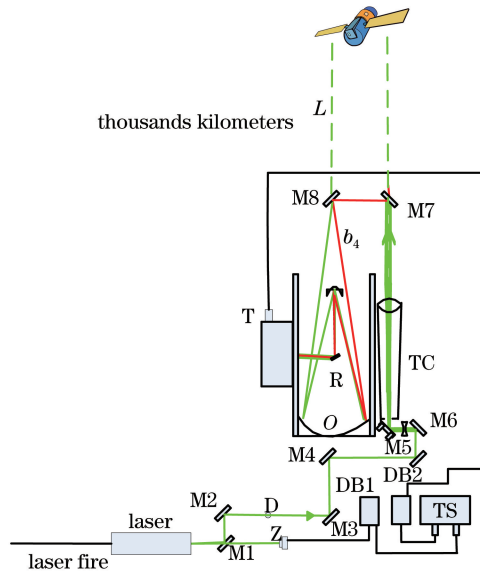


图 2 卫星激光测距系统时延测量/测距结构图

Fig. 2 Diagram of delay measurement/ranging structure in SLR system

3 发射与接收系统时延测定

3.1 系统时延测定方法的设计

为了对发射与接收系统的系统时延进行精确测定,将光电管 G 紧邻地面上的靶目标回路装置 M7 后面放置,探测发射激光,信号光电管 G 的上升沿探测精度 < 45 ps,事件计时器 TS 的 A、B 通道用于对主波信号探头 Z 以及光电管 G 进行测量,得到系统的发射时延,如图 3 所示。

图 4 给出了测距系统的地面上的靶目标测量,

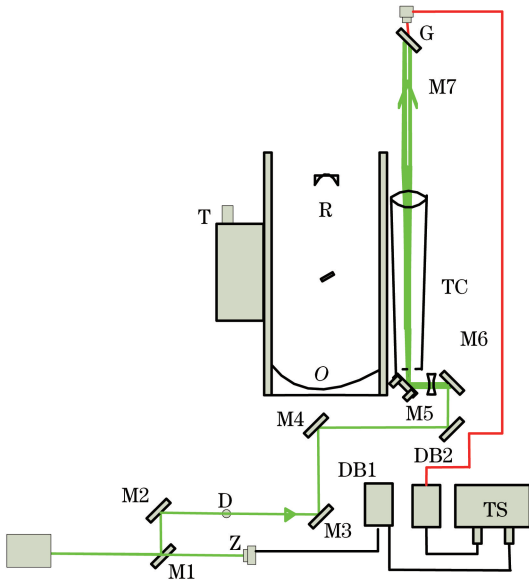


图 3 卫星激光测距系统中发射时延的测量

Fig. 3 Measurement of transmission delay in SLR system

以及发射系统时延、接收系统时延测量过程中的时间序列,其中 mode 1 为系统总时延的地面靶目标测量,mode 2 为发射系统与光电管的时延测量,mode 3 为 mode 2 中除去电平转换器及其至计时器通道 B 时延外的其他时延测量,mode 4 为 mode 2 中除去电平转换器和恒比定时器及其两者分别至计时器通道 B 与通道 A 的时延以外的其他时延测量。

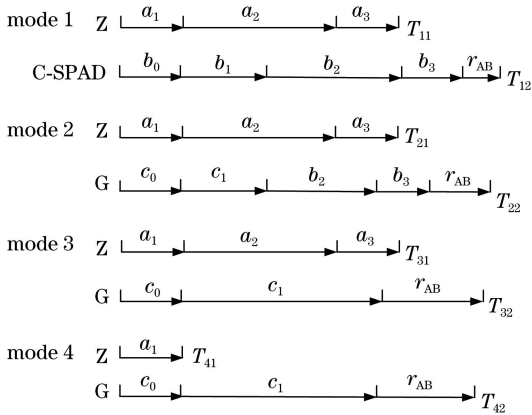


图 4 事件计时器通道 A、B 的主波探头、探测器、光电管的模式测量

Fig. 4 Mode measurement of main pulse detector, detector, and photocell in channels A and B of timer

图 4 中, a_1 为图 2 中主波信号探头 Z 及其信号线至恒比定时器 DB1 的时延, a_3 为图 2 中恒比定时器 DB1 至事件计时器 TS 通道 A 的时延, a_2 为图 2 中恒比定时器 DB1 的时延, b_0 为图 2 中光在主波信号探测器 Z 至光子探测器 T 行进的光时延, b_1 为图 2 中探测器 T 及其至电平转换器 DB2 的信号线

的时延, b_2 为图 2 中电平转换器 DB2 的时延, b_3 为图 2 中电平转换器 DB2 至计时器 TS 通道 B 的时延, r_{AB} 为图 2 中计时器 TS 通道 A、B 的时延, c_0 为图 3 中光在主波信号探头 Z 处至信号光电管 G 处的行进时延, c_1 为图 3 中信号光电管 G 及信号线至事件计时器 TS 通道的时延。

图 4 中各模式对应测得的时间均值分别为

$$T_1 = T_{12} - T_{11} = (b_0 + b_1 + b_2 + b_3 + r_{AB}) - (a_1 + a_2 + a_3), \quad (2)$$

$$T_2 = T_{22} - T_{21} = (c_0 + c_1 + b_2 + b_3 + r_{AB}) - (a_1 + a_2 + a_3), \quad (3)$$

$$T_3 = T_{32} - T_{31} = (c_0 + c_1 + r_{AB}) - (a_1 + a_2 + a_3), \quad (4)$$

$$T_4 = T_{42} - T_{41} = (c_0 + c_1 + r_{AB}) - a_1, \quad (5)$$

式中: $b_0 = c_0 + b_4$; b_4 为图 2 中光从信号光电管 G 至光子探测器 T 的行进时延。

令发射时延为

$$x = a_1 + a_2 + a_3, \quad (6)$$

接收时延为

$$y = b_1 + b_2 + b_3, \quad (7)$$

(5)式减去(4)式得

$$T_4 - T_3 = a_2 + a_3, \quad (8)$$

(3)式减去(4)式得

$$T_2 - T_3 = b_2 + b_3, \quad (9)$$

将(6)、(7)式代入(2)~(5)式中可得

$$T_1 = b_0 + y + r_{AB} - x, \quad (10)$$

$$T_2 = c_0 + c_1 + y - x - b_1, \quad (11)$$

$$T_3 = c_0 + c_1 + r_{AB} - x, \quad (12)$$

$$T_4 = c_0 + c_1 + r_{AB} - a_1. \quad (13)$$

3.2 测距过程与系统时延

卫星激光测距过程如图 5 所示,其中 S 为卫星到坐标点的距离。

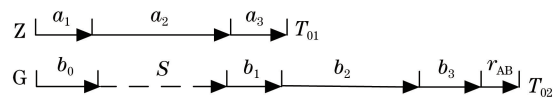


图 5 卫星激光测距中的距离测量

Fig. 5 Range detection in SLR

得到对应的时间为

$$T_5 = T_{02} - T_{01} = (b_0 + S + b_1 + b_2 + b_3 + r_{AB}) - (a_1 + a_2 + a_3), \quad (14)$$

将(6)、(7)式代入(14)式,得到

$$T_5 = T_{02} - T_{01} = b_0 + S + y + r_{AB} - x, \quad (15)$$

即系统测量卫星激光的距离中包含发射系统时延、

接收系统时延、计时器的时延以及主波信号处至光子探测器的望远镜地面靶目标所行的光程。

4 时延测量与数据分析

4.1 测量数据

根据以上计算分析各组数据。

1) 各模式下测得各地面靶目标的时间均值为 $T_1 = 0.0999454 \mu\text{s}$, $T_2 = 0.0815366 \mu\text{s}$, $T_3 = 0.0664328 \mu\text{s}$, $T_4 = 0.0845072 \mu\text{s}$, 光电管信号线时延为 $c_1 = 0.093724 \mu\text{s}$ 。

2) 采用直尺对 c_0 、 b_4 的光程进行精确测量, 可得: $c_0 = 9.49 \text{ m}$, 对应时延为 31.6333 ns ; $b_4 = 5.39 \text{ m}$, 对应时延为 17.9667 ns 。

3) 由前面计算可得恒比定时器与信号线时延为 $a_2 + a_3 = T_4 - T_3 = 0.0180744 \mu\text{s} = 18.0744 \text{ ns}$ 。同理, 电平转换器与信号线时延为 $b_2 + b_3 = T_2 - T_3 = 0.0151038 \mu\text{s} = 15.1038 \text{ ns}$ 。总光程对应的时延为 $b_0 = c_0 + b_4 = 31.6333 + 17.9667 = 49.6 \text{ ns}$ 。事件计时器 A 与 B 通道之间的时延 r_{AB} 为皮秒量级, 可近似不计, 于是可得 $a_1 = (c_0 + c_1) - T_4 = 40.8498 \text{ ns}$ 。

综合以上计算结果可得发射时延为 $x = a_1 + a_2 + a_3 = 58.9242 \text{ ns}$, 接收时延为 $y = b_1 + b_2 + b_3 = x + T_1 - b_0 = 108.8696 \text{ ns}$ 。

4.2 发射与接收系统时延的测定验证

由以上计算可得测距过程中的总时延 T 为 $T = b_0 + y - x = 99.5454 \text{ ns}$, 与上面时间接近(0.5 h 内)的系统地面靶目标的测量值($T_1 = 99.9454 \text{ ns}$)仅差 0.4 ns 。通过此方法对卫星激光测距系统中发射系

统时延与接收系统时延进行测定, 地靶测量时延双程距离仅差 400 ps (约 12 cm), 即对系统中发射系统时延与接收系统时延的测定给卫星激光测距带来的距离误差为 6 cm , 这说明此方法与常规发射激光与接收激光回波测定系统时延的相对误差在厘米级, 验证了此方法的可行性与适用性。

5 相距 2.5 km 双望远镜空间碎片的激光测距

由上海天文台卫星激光测距佘山站(主望远镜)发射激光器发射, 相同口径(60 cm)的接收望远镜(从望远镜)在距其 2.5 km 的上海天文台佘山科技园区接收, 如图 6 所示, 其中佘山站望远镜系统作为坐标点获得空间碎片的预报距离, 山下科技园区接收望远镜与佘山站接收望远镜系统相同, 参数见表 1。



图 6 激光发射望远镜与激光接收望远镜的位置
Fig. 6 Locations of laser transmitting telescope and laser receiving telescope

表 1 位于佘山和科技园区望远镜系统的主要性能参数

Table 1 Main performance parameters of telescope systems located in Sheshan and Science and Technology Park

Type	Telescope in Sheshan	Telescope at Science and Technology Park
Optical system	R-C	R-C
Mounted type	AZ-EL	AZ-EL
Focus length /m	5.2	5.2
Receiving optical efficiency	60% @ 532 nm	60% @ 532 nm
Detector	20% @ 532 nm	40% @ 532 nm
Detection field of view /(")	90	135
Tracking root-mean-square /(")	1	1
Event timer	A033	A033
Transmitting optical efficiency	70% @ 532 nm	—
Laser power	60 W @ 200 Hz	—
Transmitting telescope diameter /cm	21	—
Angle of laser divergence /(")	10-12	—

5.1 验证远距离接收望远镜距离门控的计算

对于激光发射与接收位于同一台望远镜的系统,其接收光子探测器距离门控值对应的坐标为接收望远镜相位中心点,而对于相距 km 级的双望远镜或多台望远镜,由于接收望远镜距离激光发射望远镜系统较远,接收望远镜接收光子探测器距离门控值对应的坐标既不能为发射望远镜,也不能为接收望远镜。为实现对远距离接收望远镜光子探测器距离门控的精确控制,需要考虑激光信号的实际传输路径,即从发射望远镜到空间目标再到接收望远镜。

图 7 给出了远距离多接收望远镜的距离门控值计算图。对于主动激光发射接收系统,激光往返传输时间为 $\Delta t_0 = \tau_{d0} + \tau_{u0}$;对于被动接收台站 1,激光传输时间为 $\Delta t_1 = \tau_{u1} + \tau_{d1}$;对于被动接收台站 2,激光传输时间为 $\Delta t_2 = \tau_{u2} + \tau_{d2}$,对应的地面激光发射时刻均为 τ_{start} 。对于被动接收台站,需要分别计算出激光上行传输时间和下行传输时间。对于不同位置的被动接收台站,由于激光信号在目标表面的反射点不同,使得 τ_{u0} 与 τ_{u1} 、 τ_{u2} 存在一定差异,这与目标大小有关。但由于空间碎片目标的激光测距精度在分米级,故对于空间目标激光漫反射测量, τ_{u0} 、 τ_{u1} 、 τ_{u2} 基本相等,则对于被动接收台站,激光信号下行传输时间为 $\tau_{di} = \Delta t_i - \tau_{u0}$,其中 i 为第 i 个被动接收台站, Δt_i 为被动接收台站记录的激光接收时刻与主动台站记录的激光发射时刻之差。

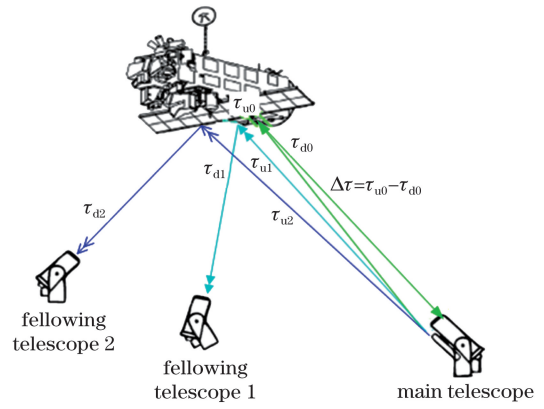


图 7 远距离多接收望远镜的距离门控值计算图
Fig. 7 Calculation of range gate control value for remote multi-receiving telescopes

5.2 远距离接收望远镜距离门控计算

位于科技园接收望远镜的距离门控时间选取为 $T = \Delta t_2 + T_w + T_y$,其中 Δt_2 为空间碎片相对被动望远镜坐标点的预报时间, T_w 为时钟的钟差, T_y 为接收系统的时延。时钟的钟差 T_w 在皮秒量级,在此不考虑,由此可得距离门控的范围为 $T = \Delta t_2 + 108.8 \text{ ns}$ 。采用频率为 200 Hz、功率为 50 W、波长为 532 nm 的纳秒激光器系统^[7],通过距离门控选取控制,对多个空间碎片进行测量,图 8 给出了激光器发射端和接收端各望远镜系统分别对空间碎片(ID:11672,雷达散射截面(RCS)为 4.21 m²)的测量结果,数据测量精度见表 2。

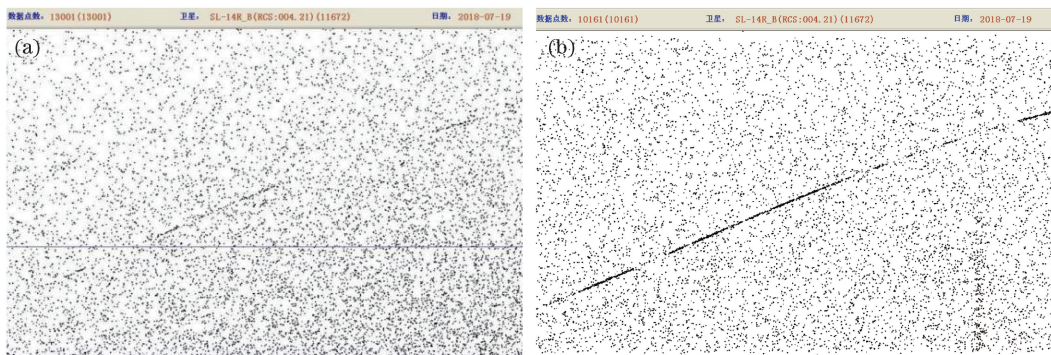


图 8 发射望远镜和接收望远镜对空间碎片(ID: 11672)的测量结果。(a)发射望远镜;(b)接收望远镜
Fig. 8 Signals from transmitting telescope and receiving telescope for space debris (ID: 11672).

(a) Transmitting telescope; (b) receiving telescope

表 2 双望远镜对空间碎片的测量结果

Table 2 Measurement results for space debris with two telescopes

ID	Name of space debris	RCS /m ²	Measured distance /km	Ranging precision /cm	
				Main telescope	Following telescope
21610	ArianeR_B	16.84	1390	129.2	149.0
16182	SL-16R_B	12.05	1030	141.0	141.7
11672	SL-14R_B	4.21	1160	56.2	64.7
16720	SL-14R_B	3.58	1170	74.9	62.2

从测量结果可知,双望远镜系统所获得的观测数据的测量精度基本一致,这主要源于两套系统的设备参数基本相同。相距千米级的双望远镜可同时接收到碎片目标返回的回波信号,验证了碎片目标回波信号到达地面时覆盖范围广的特点,为后续开展 10^5 m 级距离望远镜接收回波信号在目标定位测量方面的应用提供了基础。

6 结 论

通过对卫星激光测距过程中各时刻的描述与分析,给出了卫星激光测距系统中发射系统时延以及接收系统时延的表达式。采用高精度计时器、光电探测器等,对上海天文台 60 cm 卫星激光测距系统发射与接收系统的时延进行测定与计算,并与实际卫星激光测距系统的测量地靶时延进行比较,结果表明误差仅为 400 ps。精确的系统时延为激光测距提供了更精确的距离门控,结合高精度时钟,实现了 2.5 km 双望远镜空间碎片的激光测距,验证了碎片目标回波信号覆盖范围广的特点,为更远距离多台望远镜系统的时延标定及距离门控值的确定提供了切实可行的方法,促进了多台望远镜激光测距系统对微弱激光信号的探测,同时也促进我国各卫星激光测距站点对空间碎片单站发射多站接收的广域网测量。

参 考 文 献

- [1] Lucchesi M, Anselmo L, Bassan M, et al. Testing the gravitational interaction in the field of the Earth via satellite laser ranging and the Laser Ranged Satellites Experiment (LARASE)[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2015, 32(15): 155012.
- [2] Bonin J A, Chambers D P, Cheng M K. Using satellite laser ranging to measure ice mass change in Greenland and Antarctica[J]. *The Cryosphere*, 2018, 12(1): 71-79.
- [3] Kirchner G, Hausleitner W, Cristea E. Aisai spin parameter determination using Graz kilohertz satellite laser ranging data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, 45(1): 201-205.
- [4] Zhang Z P, Cheng Z E, Zhang H F, et al. Global laser ranging observation of Beidou satellites and data application [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(4): 0404004.
张忠萍, 程志恩, 张海峰, 等. 北斗卫星全球激光测距观测及数据应用 [J]. *中国激光*, 2017, 44(4): 0404004.
- [5] Bennett J C, Sang J, Smith C H, et al. Accurate orbit predictions for debris orbit manoeuvre using ground-based lasers[J]. *Advances in Space Research*, 2013, 52(11): 1876-1887.
- [6] Coyle D B, Stysley P R, McGarry J F, et al. Adapting a ground-based laser ranging system at NASA-GSFC for identification and tracking of orbital debris[J]. *Proceedings of SPIE*, 2013, 8731: 87310F.
- [7] Zhang Z P, Zhang H F, Deng H R, et al. Experiment of laser ranging to space debris by using two receiving telescopes[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(1): 0102002.
张忠萍, 张海峰, 邓华荣, 等. 双望远镜的空间碎片激光测距试验研究 [J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(1): 0102002.
- [8] Li Y Q, Li Z L, Fu H L, et al. Experimentation of diffuse reflection laser ranging of space debris [J]. *Chinese Journal of 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.
- [9] Lin L X. Status and removal of space debris[J]. *Spacecraft Engineering*, 2012, 21(3): 1-10.
林来兴. 空间碎片现状与清理 [J]. *航天器工程*, 2012, 21(3): 1-10.
- [10] Zhao P, Zhang Y, Zhang X Y, et al. Echo online extraction for diffuse reflection laser ranging[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(10): 1028002.
赵鹏, 张艳, 张小亚, 等. 激光漫反射测距回波信号在线提取方法 [J]. *光学学报*, 2015, 35(10): 1028002.
- [11] Smith C H. The EOS space debris tracking system [C]//*Proceedings of the 2006 AMOS Technical Conference*, September 10-14, 2006, Kihei, HI, USA. [S.l.: s.n.]: 2006, 1014: 719728.
- [12] Kirchner G, Koidl F, Ploner M, et al. Multistatic laser ranging to space debris[C]//*18th International Workshop on Laser Ranging*, November 11-15, 2013, Fujiyoshida, Japan. [S.l.: s.n.]: 2013: 13-0213.
- [13] Courde C, Torre J M, Samain E, et al. Lunar laser ranging in infrared at the Grasse laser station [J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2017, 602(A&A): A90.
- [14] Vilnrotter V, Lau C W, Srinivasan M, et al. An optical array receiver for deep-space communication through atmospheric turbulence [R]. *JPL Publication: IPN Progress Report*, 2003: 42-154.
- [15] Zhang H F, Long M L, Deng H R, et al. Detection ability of laser ranging system based on multi-telescopes to receive echo signal [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(9): 0906002.
张海峰, 龙明亮, 邓华荣, 等. 多望远镜信号接收的激光测距系统探测能力 [J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(9): 0906002.

- [16] Zhang H F, Deng H R, Long M L, et al. Time synchronization in laser ranging with multi-receiving telescopes based on fiber-time-frequency transfer[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(1): 011204.
张海峰, 邓华荣, 龙明亮, 等. 基于光纤时间频率传递的多望远镜激光测距时间同步研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(1): 011204.
- [17] Prochazka I, Kodet J, Blazej J, et al. Identification and calibration of one-way delays in satellite laser ranging systems[J]. *Advances in Space Research*, 2017, 59(10): 2466-2472.