

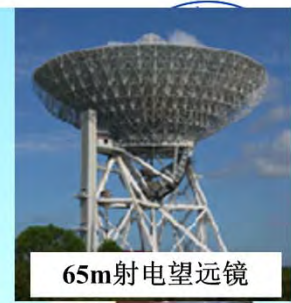
1.56m光学望远镜



60cm光学望远镜



25m射电望远镜



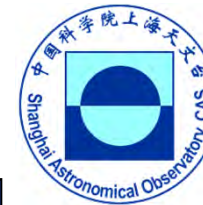
65m射电望远镜

中国空间站激光时间传递 进展及展望

吴志波

中国科学院上海天文台

2023年11月20日



报告提纲

01

技术概述

02

时间传递

03

空间站工程

04

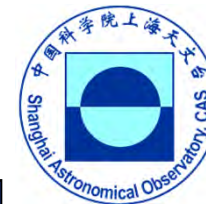
未来展望

05

总结

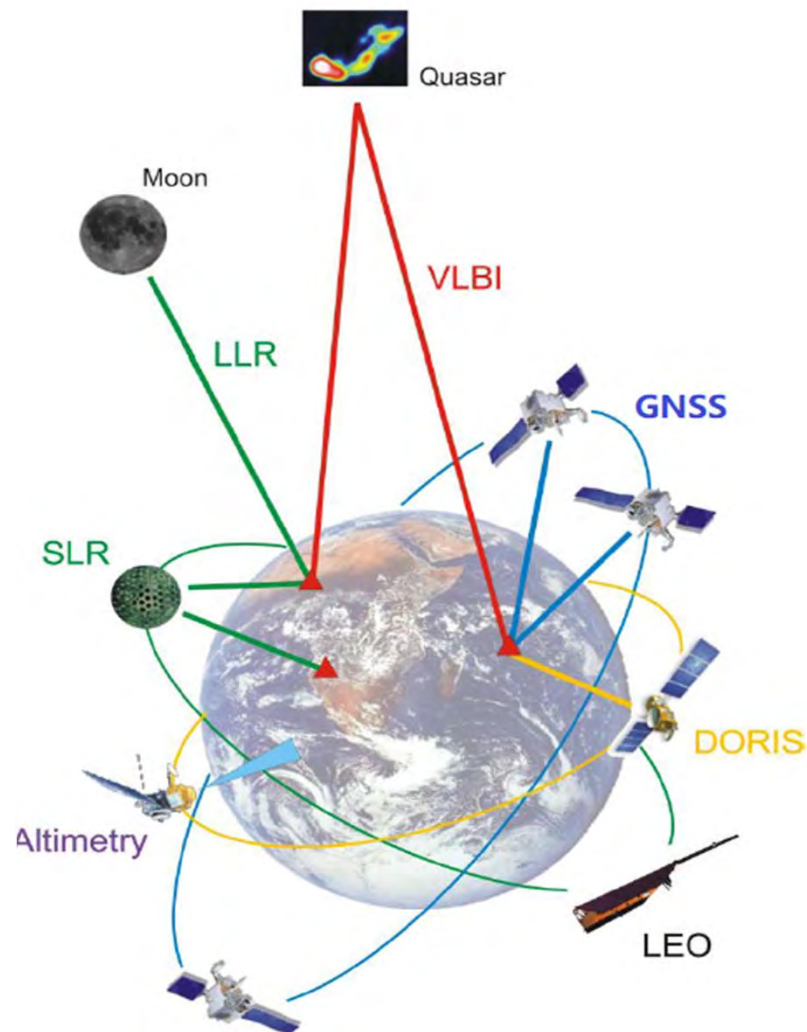


一、技术概述



现代空间大地测量技术主要有：

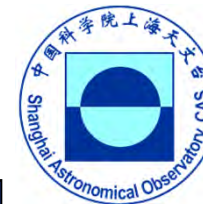
- VLBI：甚长基线干涉测量系统(射电手段，全天候)；
- GNSS：全球卫星导航系统(微波/无线电手段，全天候)；
- DORIS：卫星多普勒定位系统(微波/无线电手段，全天候)；
- SLR/LLR: 卫星激光测距/月球激光测距(光学手段，晴朗天气全天时)。



SLR是现代主流空间大地测量技术之一：精度高。

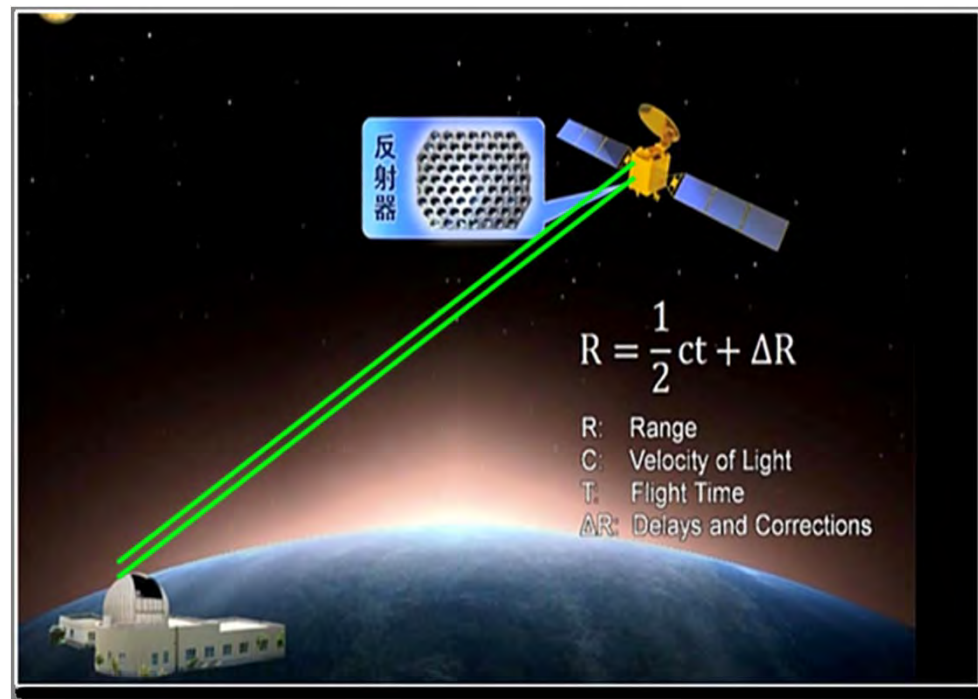
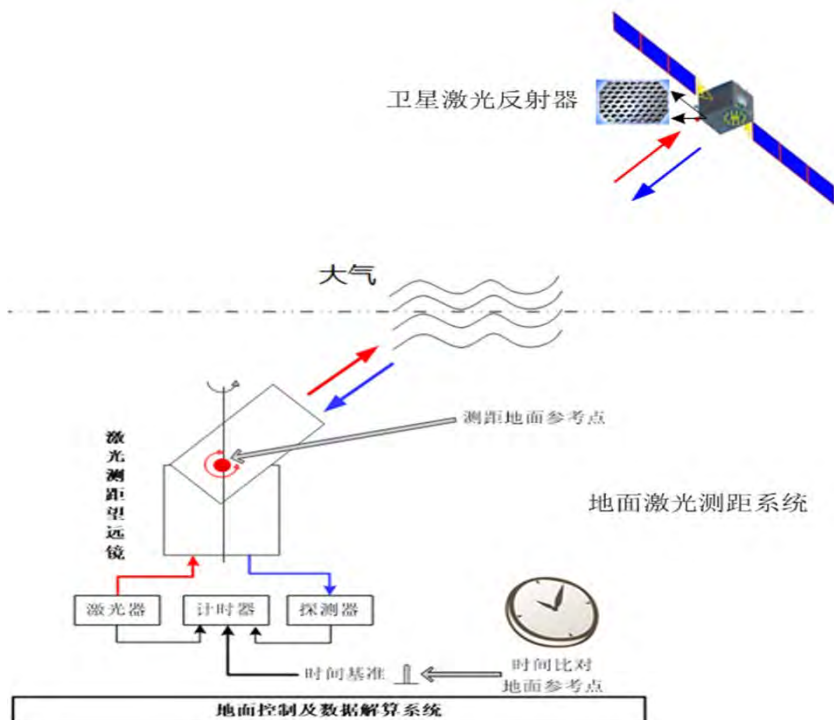


一、技术概述



1) 卫星激光测距 (Satellite Laser Ranging, SLR):

- 一把独立“量天尺”，通过测量激光脉冲信号从地面站到目标的往返飞行时间，获得卫星精密距离。是卫星测量精度最高（毫米级）的直接观测技术。



- 地面站与卫星之间通过一束激光相连，看似简单，但卫星距离成百上万公里且高速运动，精确瞄准与信号探测是关键，是一项高精尖测量技术。

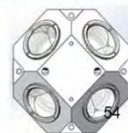
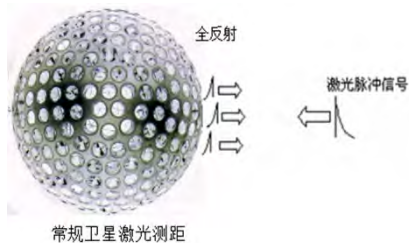


一、技术概述



2) 卫星激光测距 (SLR) 现状

- ① 合作目标 (带有激光反射器)
- ✓ 测量精度：毫米级
- ✓ 测量类型：地球动力学、重力测量、导航、海洋测高，遥感，月球反射器等100多个；
- ✓ 轨道高度：500~380,000km；



中国科学院上海天文台 2019 数字与天文科学

高重复率距离门控产生器 (RGG)

Range Gate Generator with High Repetition Rate

kHz-RGG

性能指标

- 工作频率: 10 kHz
- FSK232 串口通信
- 脉冲产生频率精度: 5 ns

主要应用

脉冲产生, 测门控制, 激光测距, CCD 同步, 精密激光测距

代表性应用成果

国际首套 10 kHz 重复率卫星激光测距系统; 北斗系统; 高精度空间碎片激光测距系统; 月球激光测距时间对比

主要应用单位: 美国 Oklahoma 公司, 中国科学院上海天文台, 中国科学院南京天文光学技术研究所, 中国科学院西安光学精密机械研究所, 中国科学院南京天文光学技术研究所, 中国科学院上海天文台

研制单位: 中国科学院上海天文台

联系方式: 吴波 021-54775296, 13056481029 wub@shao.ac.cn

中国科学院上海天文台 2021 数字与天文科学

激光测距测控一体机

JGCK

主要技术与性能指标

- 工作频率: > 10 kHz
- 输出信号: 3 路 (激光头, 探测门控, CCD 同步), 测距门控, 测距频率 5 kHz
- 测距门控: FSK232 和 RS485 多种
- 测距精度: < 4 ns
- 输入信号: 2 路 (主选, 备用)

主要应用

激光测距, 激光测距同步, 测距精度校准, 测距数据存储, 测距同步

代表性应用成果

北斗系统, 测距精度校准 / 测距精度校准系统, 空间碎片激光测距时间对比

主要应用单位: 清华大学, 中国科学院南京天文光学技术研究所

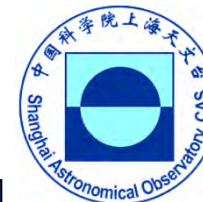
研制单位: 中国科学院上海天文台

联系方式: 吴波 021-54775296, 1554615233 wub@shao.ac.cn

作为中国SLR网协调单位，上海台突破了SLR多项关键技术。



一、技术概述



3) 卫星激光测距 (SLR) 现状

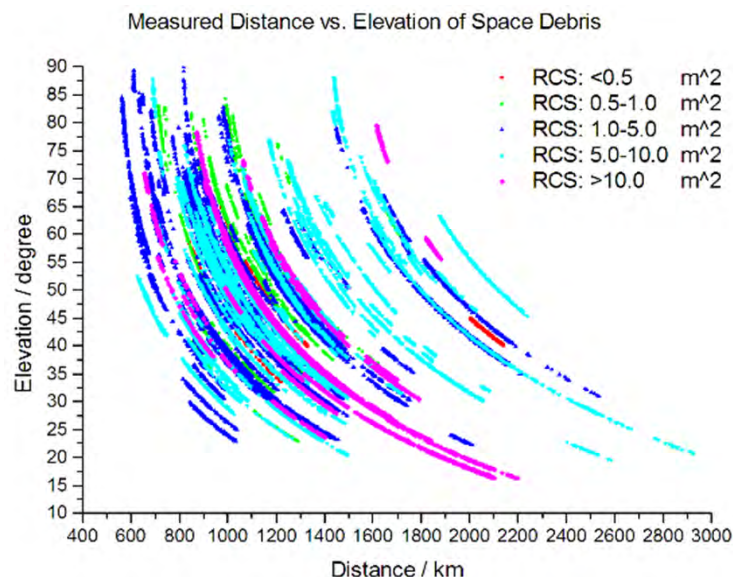
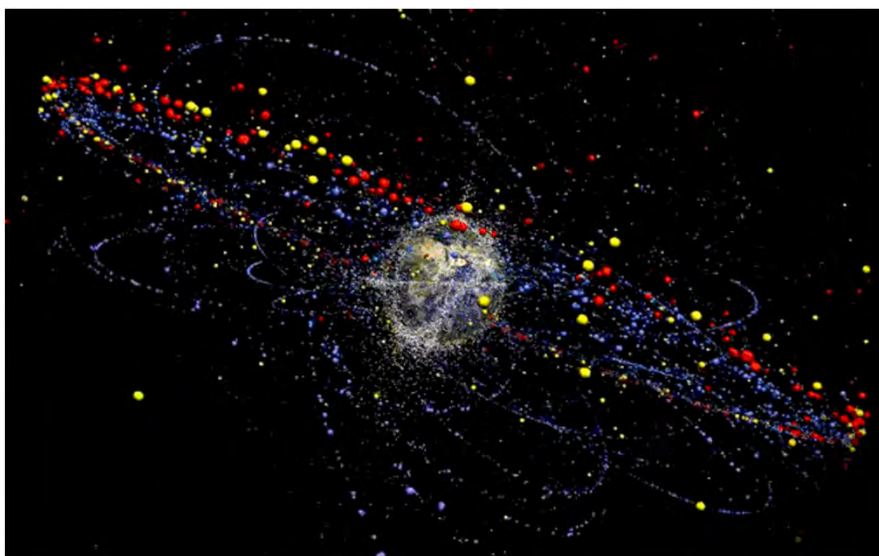


漫反射

非合作空间目标激光测距

① 非合作目标 (空间碎片) :

- ✓ 测量精度：分米级
- ✓ 测量类型：火箭体、卫星残骸等两万颗 (10cm以上)
- ✓ 轨道高度：400~3000km ;



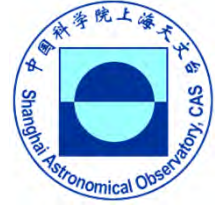
上海天文台 (国际第三个)、云南天文台和长春人卫站实现了低轨 (<3000km) 空间碎片测量。

- 成果应用在1.8米口径望远镜，实现距离6700km碎片测量，创国际最远记录；
- 国际首次皮秒激光测碎片，测量精度突破到厘米级，利于目标姿态测量与识别。

中国SLR网可观测3000km内空间碎片，上海台在探测能力和测量精度进行了创新。

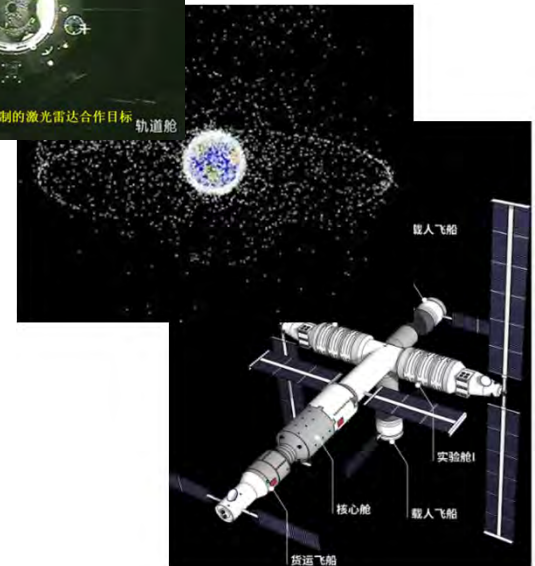
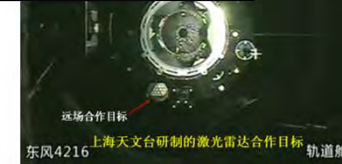
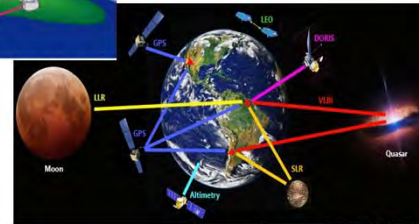
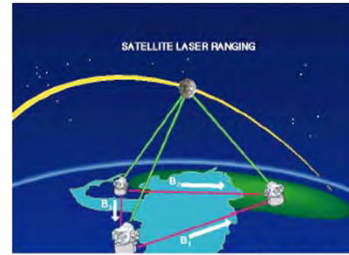


一、技术概述



广泛应用在：

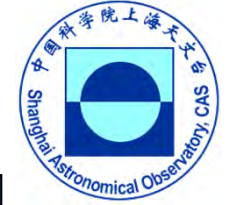
- 卫星精密定轨 (POD)
- 地球定向参数 (EOP) 确定
- 国际地球参考框架 (ITRF) 建立和维护
- 海平面监测
- 空间态势感知/交通管制 (碎片监测)
- 地壳形变监测 (陆态网)
- 航天器交会对接 (天宫、空间站)
- 高精度时间传递 (北斗、空间站、DRO)
- 相对论验证 (LLR)



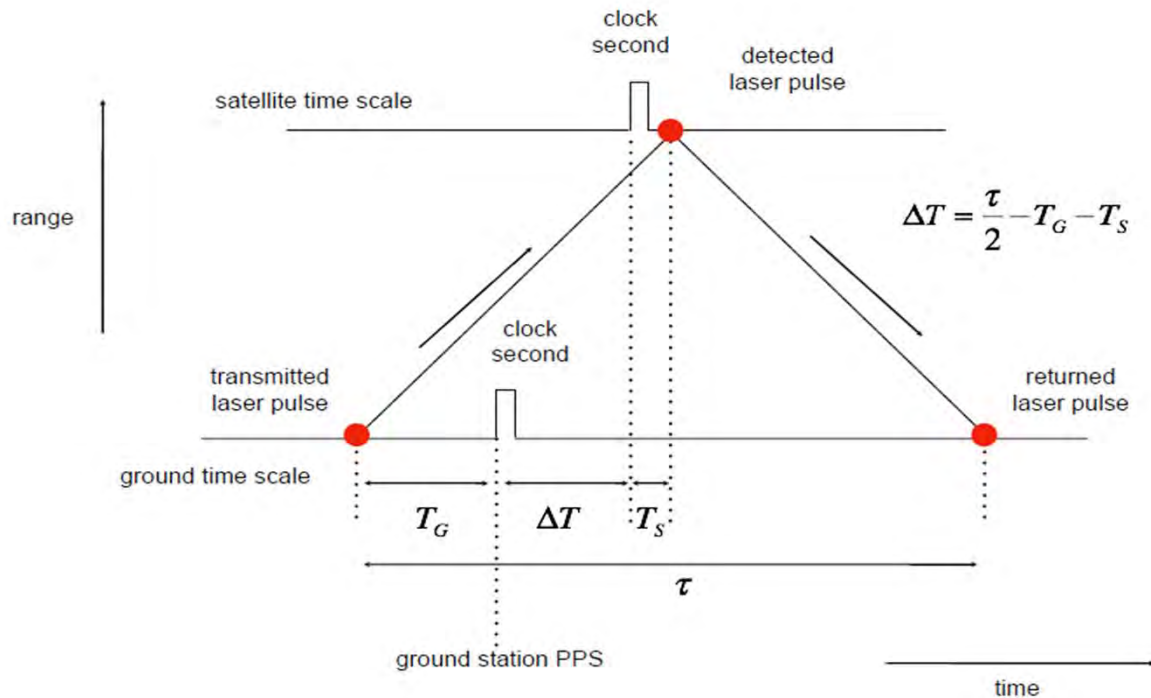
SLR技术融合“定位-导航-授时”等功能，在时空基准、地球科学等领域不可或缺



二、时间传递



- 星地时钟比对与同步是建立星地统一时间系统的基础。激光时频传递技术具有高精度、系统误差少、绝对测量等优势；
- 在卫星安装激光测量设备(光子探测器、事件计时器、激光反射器等)，地面SLR系统配置高稳定时钟、计时设备等。通过激光传输并分别记录地面发射与星上接收时刻，可得到星地钟差信息，评估星载时钟性能；同时可进行星地时钟同步，是星地时频率同步中不可缺少的测量技术。



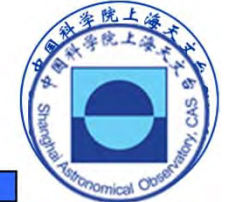
卫星载荷

地面测距站

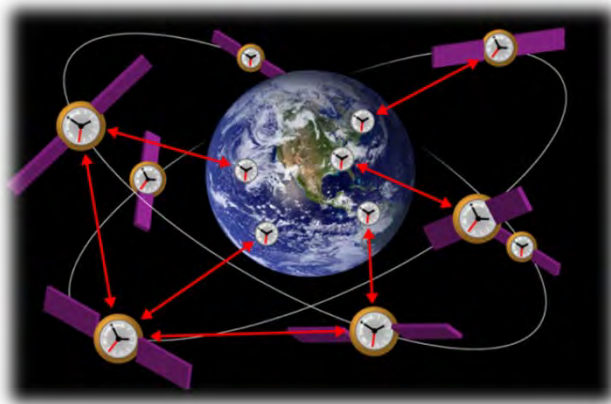




二、时间传递



时间同步是现代定位与导航系统的基础，目前所有实用的导航定位系统，其定位精度都与时间同步精度成正比。



将不同位置的原子钟同步起来，可以对基本物理常数的测定、引力红移、暗物质探测等基础科学问题进行深入研究。

Optical Clocks and Relativity

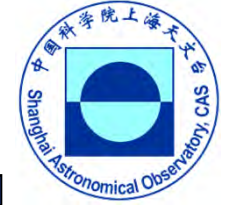
C. W. Chou,* D. B. Hume, T. Rosenband, D. J. Wineland

Observers in relative motion or at different gravitational potentials measure disparate clock rates. These predictions of relativity have previously been observed with atomic clocks at high velocities and with large changes in elevation. We observed time dilation from relative speeds of less than 10 meters per second by comparing two optical atomic clocks connected by a 75-meter length of optical fiber. We can now also detect time dilation due to a change in height near Earth's surface of less than 1 meter. This technique may be extended to the field of geodesy, with applications in geophysics and hydrology as well as in space-based tests of fundamental physics.

Chou C W, Hume D B, Rosenband T, et al. Optical clocks and relativity[J]. Science, 2010, 329(5999): 1630-1633.



二、时间传递

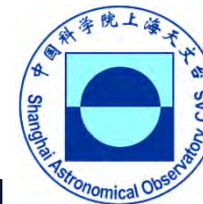


	法国T2L2 (2008)	中国Compass- LTT (2007)	欧空局ELT (一直推迟, 2024)	中国空间站CLT
轨道高度	1300km	21000km~ 36000km	400km	~400km
探测器精度	40-15ps	150ps	25ps	20ps
计时器精度	~ps	100ps	~ps	~ps
测量频率	--	1Hz	100Hz	10kHz
时间稳定度	10ps@10s-100s 10ps@>1-10day	20ps@500s	4ps@300-10 ⁴ s 7ps long-term	<0.1ps@300s <1ps@1day
准确度	300ps	--	50ps (goal 25ps)	--

北斗测的最远（3万6公里轨道）、空间站测的最稳（比ELT高一个量级）



二、时间传递



1) 北斗卫星

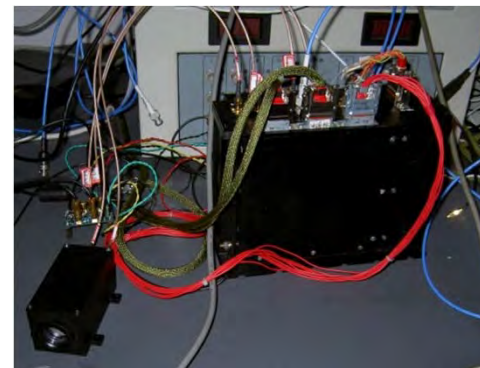
星载设备



激光反射器

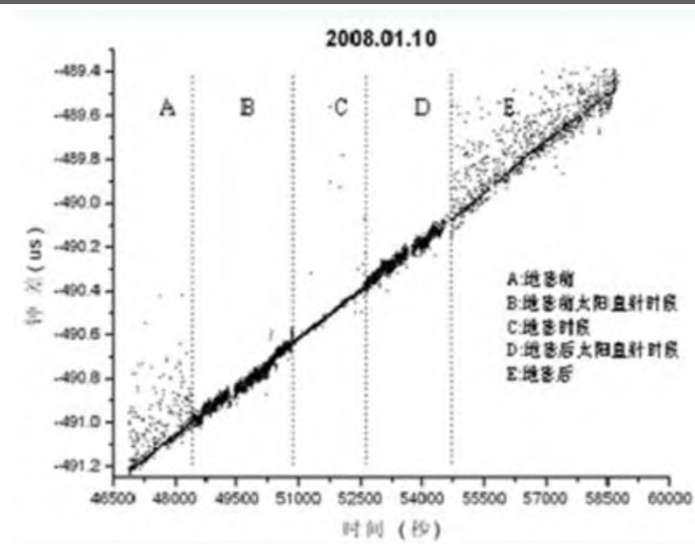


激光探测器



激光计时器

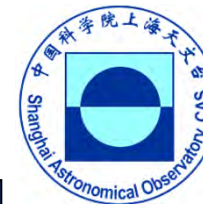
- 2007年成功实现了同步北斗卫星激光时间比对测量，获得了有效时差测量数据，测量精度优于300ps；
- 为国际上首次实现空间单光子探测器应用，评估了北斗卫星星载原子钟性能。



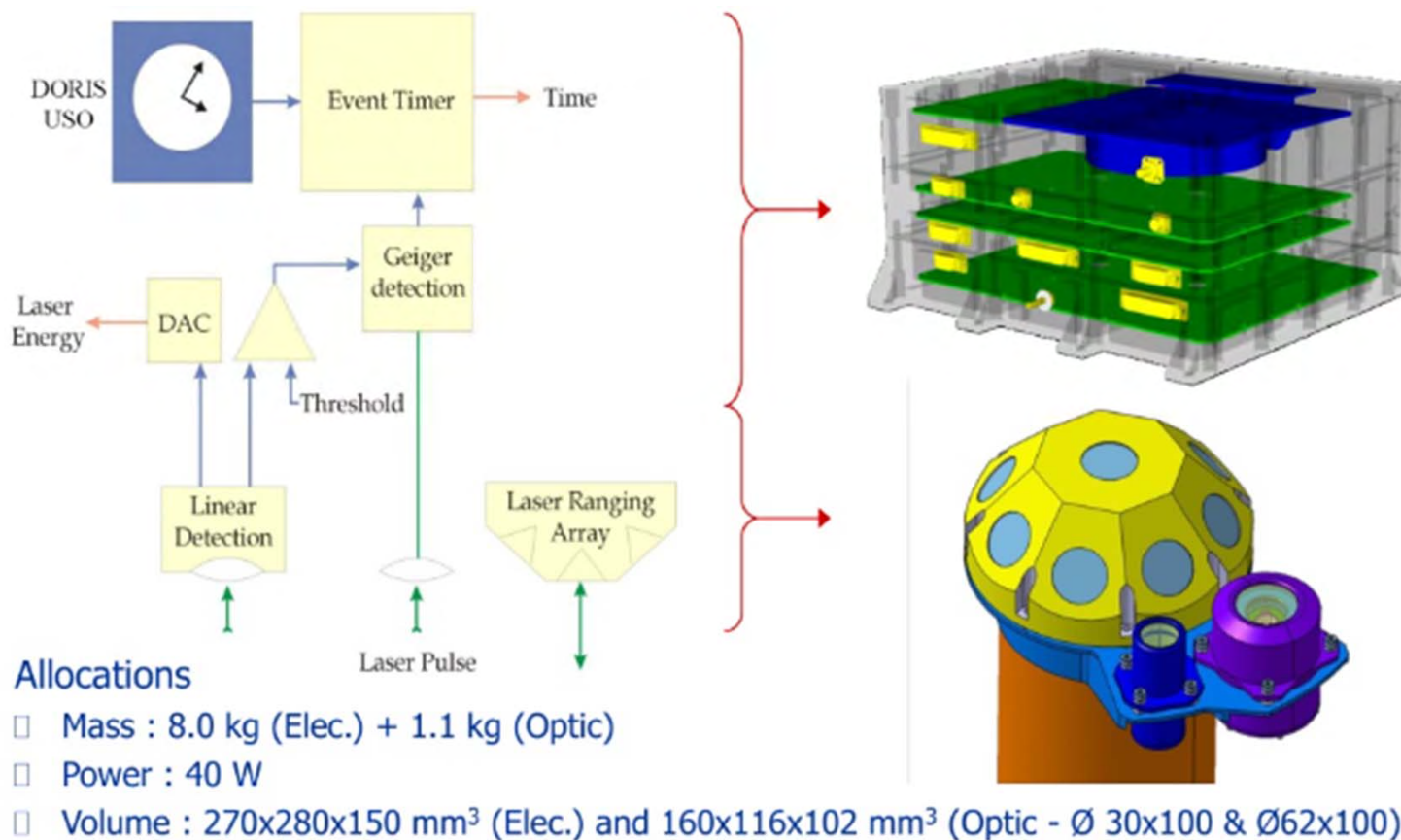
上海台很早开展激光时间传递研究，在4万公里北斗卫星上实现厘米测距及百皮秒时间传递



二、时间传递



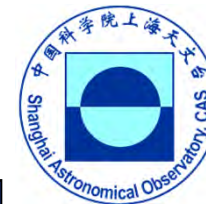
2) T2L2



搭载Jason2卫星（2008-2018），实现了星地1ps@1000s的测量稳定度，以及洲际时间传递

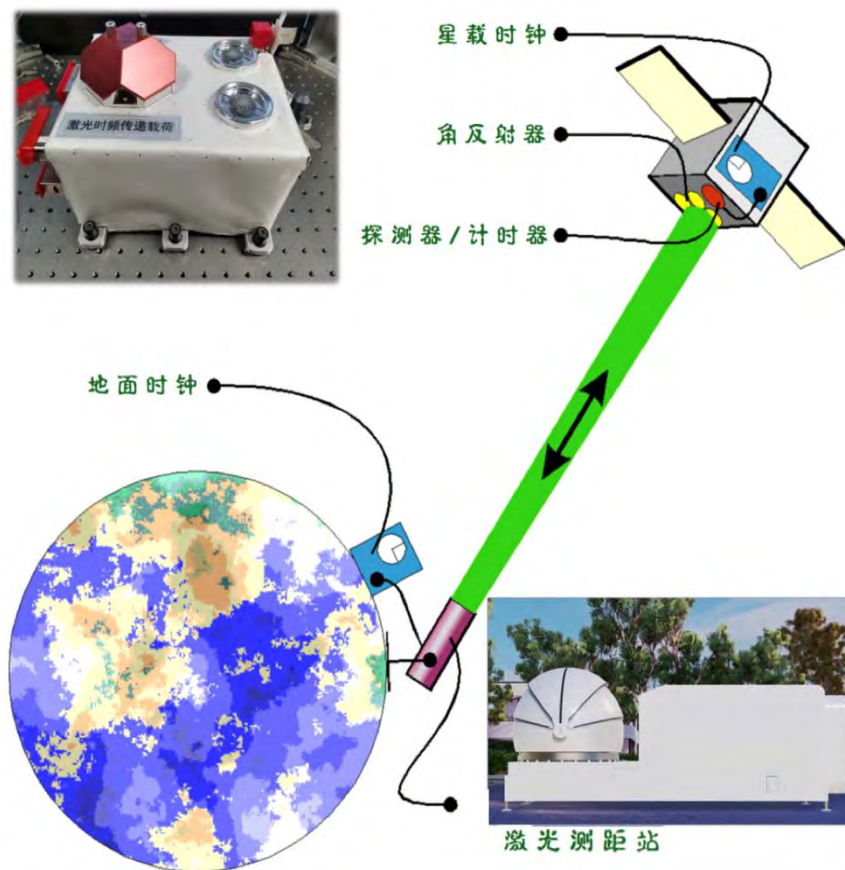
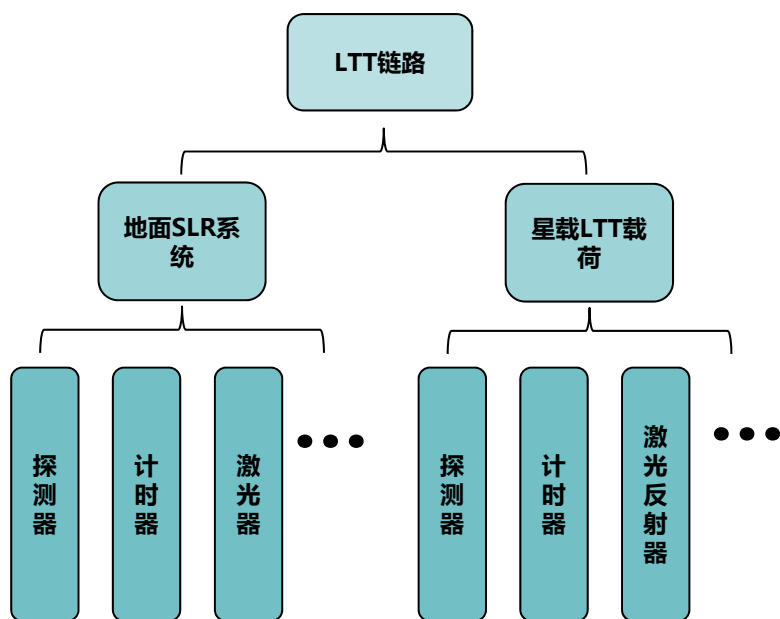


三、空间站工程



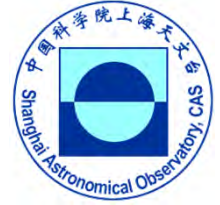
空间站高精度时频柜搭载了**光钟、微波钟、氢钟**组成的原子钟组，有高精度星地钟差测量的需求。因此空间站时频系统除微波时频传递载荷外还包含激光时频传递载荷，在西安、北京建立两套专用地面测站，开展钟组的时间频率比对测量。

测量稳定度指标：**0.1ps@300s和1ps@1day**

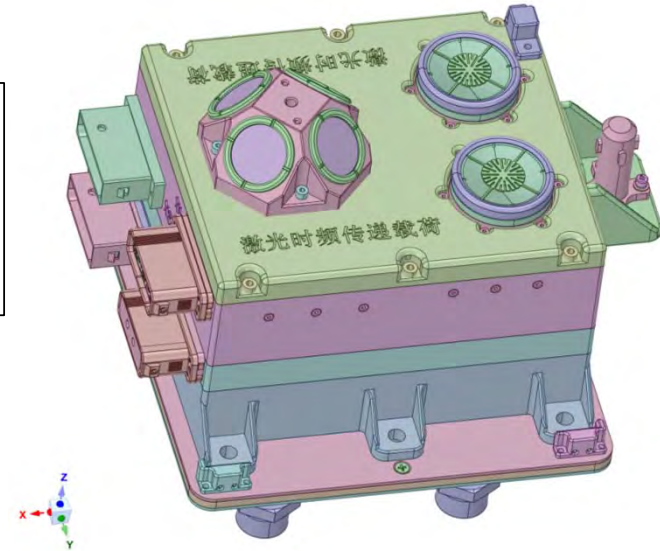
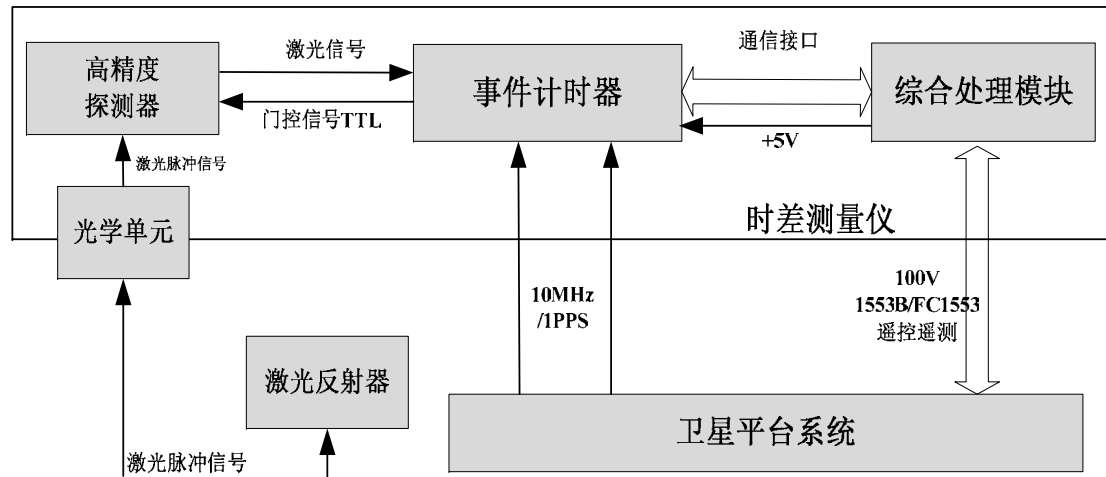




三、空间站工程



1) 整体框图



- ① **单光子探测器**：对上行激光脉冲光电转换，并送事件计时器完成上行达到时刻记录
- ② **事件计时器**：以星载时钟为基准，对探测器输出电信号进行时刻记录
- ③ **激光反射器**：以窄发散角原路反射上行激光信号，形成激光测距

测量稳定度 (TDEV)

✓ < 0.1ps (300s)

✓ < 0.8ps (24h)

测量精度：~ 20ps

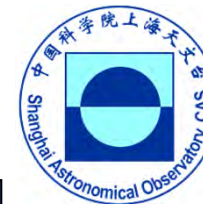
重量：< 6.6kg

功耗：< 25w

尺寸：230*170*190mm

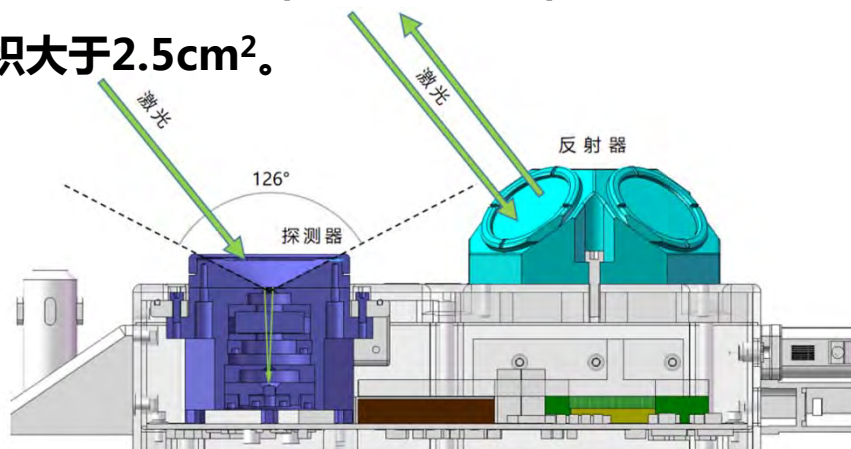


三、空间站工程

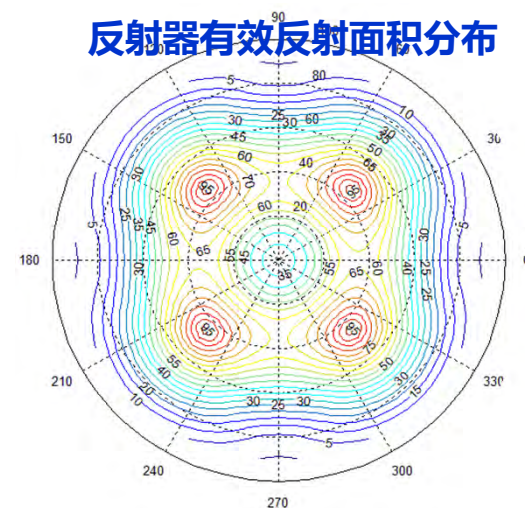


2) 光学设计

探测器视场约 126° ($\pm 14^\circ$ 为盲区), 对应观测仰角 $20^\circ-75^\circ$, 视场内反射器有效反射面积大于 2.5cm^2 。

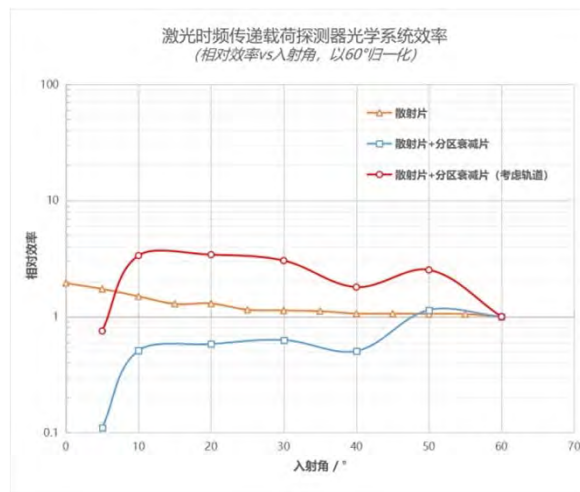


反射器有效反射面积分布



光学设计难点：

- 大视场
- 低噪声
- 光强稳定



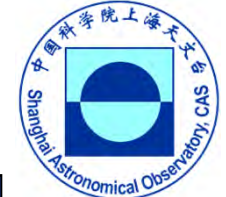
激光反射器

- 四棱台型
- $92 \times 92 \times 45\text{mm}$
- 320g
- 误差 $< 3\text{mm}$

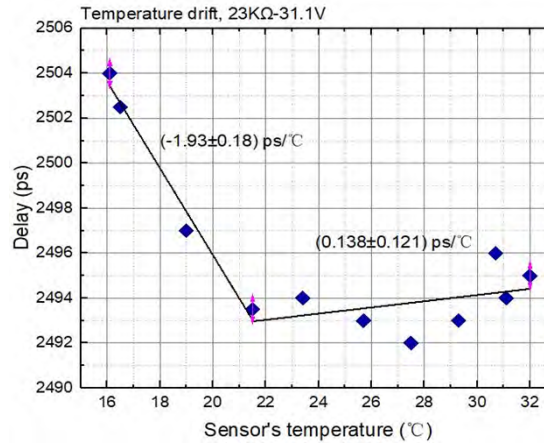
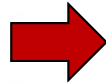
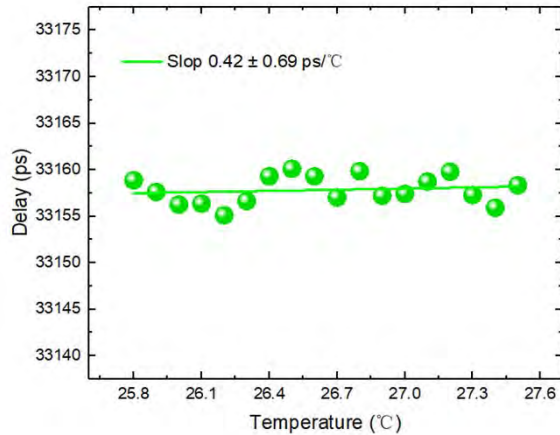
包括空间站轨道 (斜距) 变化, 大入射视场情况下, 接收光强波动低于4倍, 有效保证了测量稳定



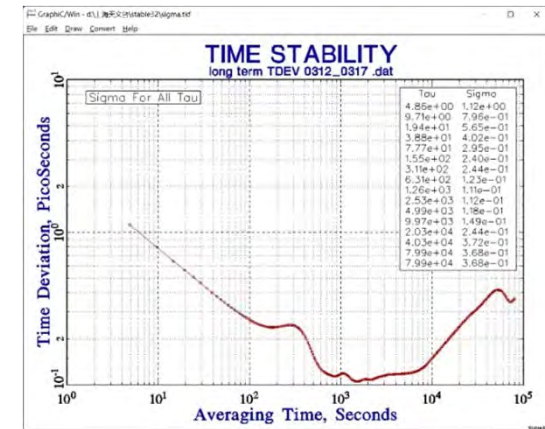
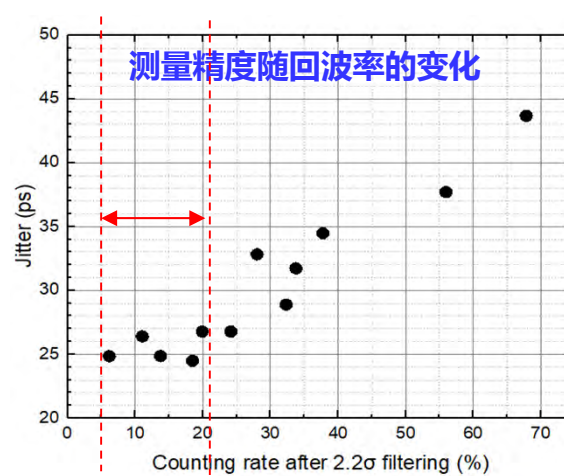
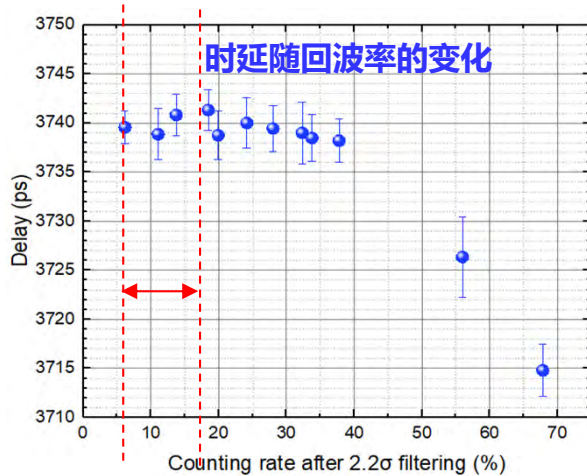
三、空间站工程



3) 电学设计



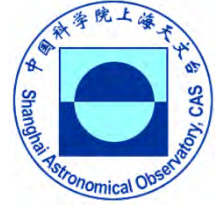
根据探测芯片和比较器温漂系数，设计负反馈电路，实现低温漂系数为 $\sim 0.13 \text{ ps/}^\circ\text{C}$ 。



实施单光子测量（回波率低于20%）和温漂补偿，载荷TDEV好于 $0.1 \text{ ps}@300 \text{ s}$ ， $0.5 \text{ ps}@1 \text{ day}$



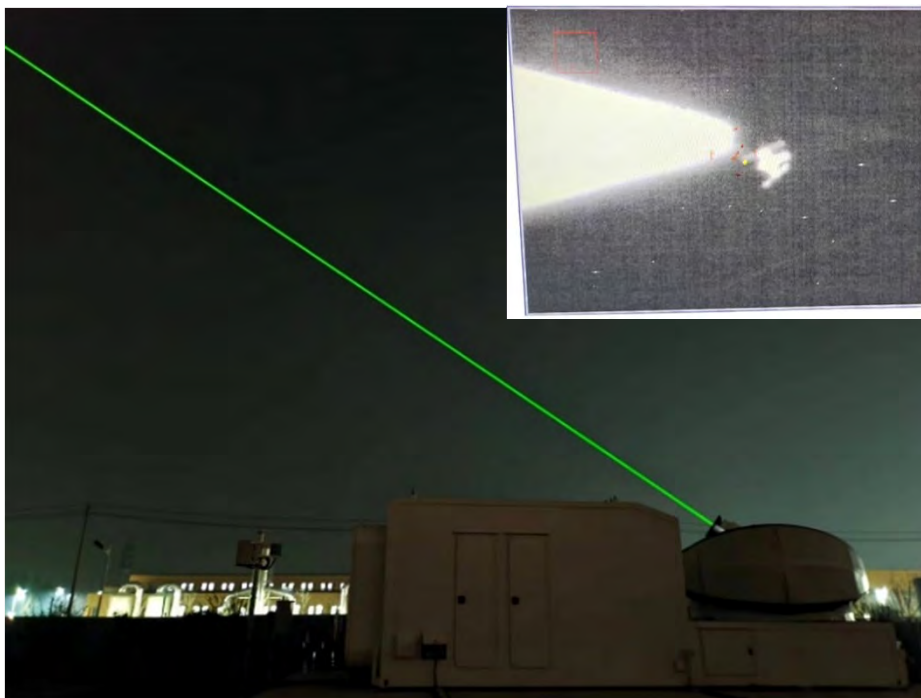
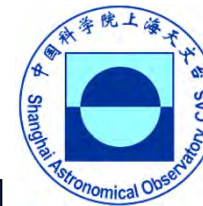
三、空间站工程



2022年10月31日，激光时频传递载荷随梦天舱发射。



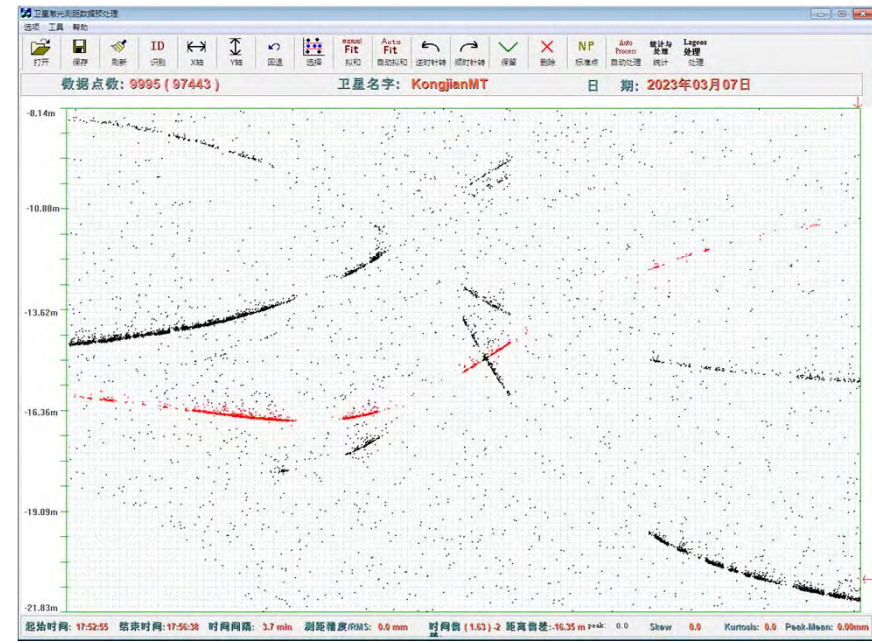
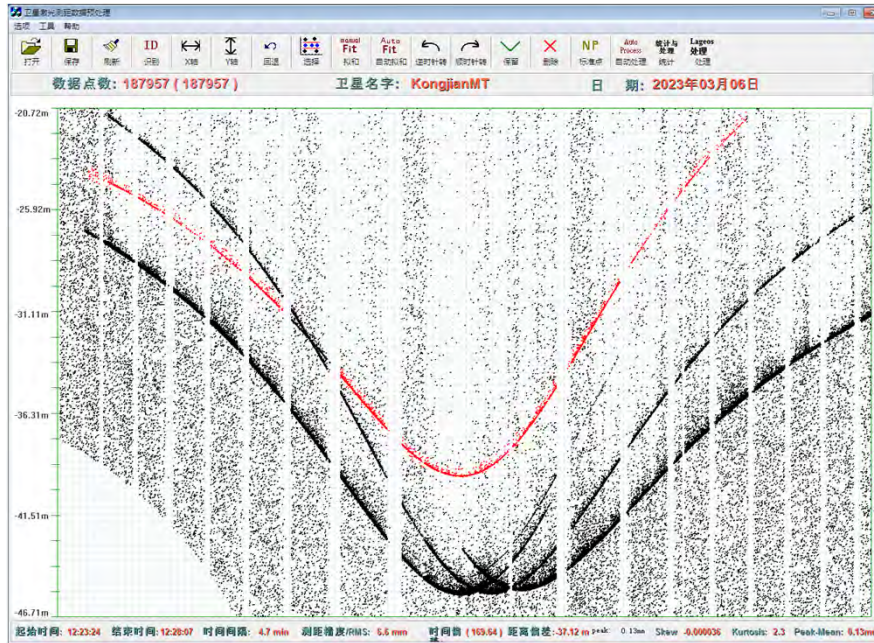
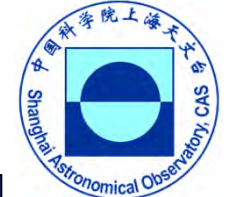
三、空间站工程



**经过5个月左右的测试准备
2023年3月13日，载荷首次全状态开机，上海台地面站即获得星地钟差测量数据。**



三、空间站工程

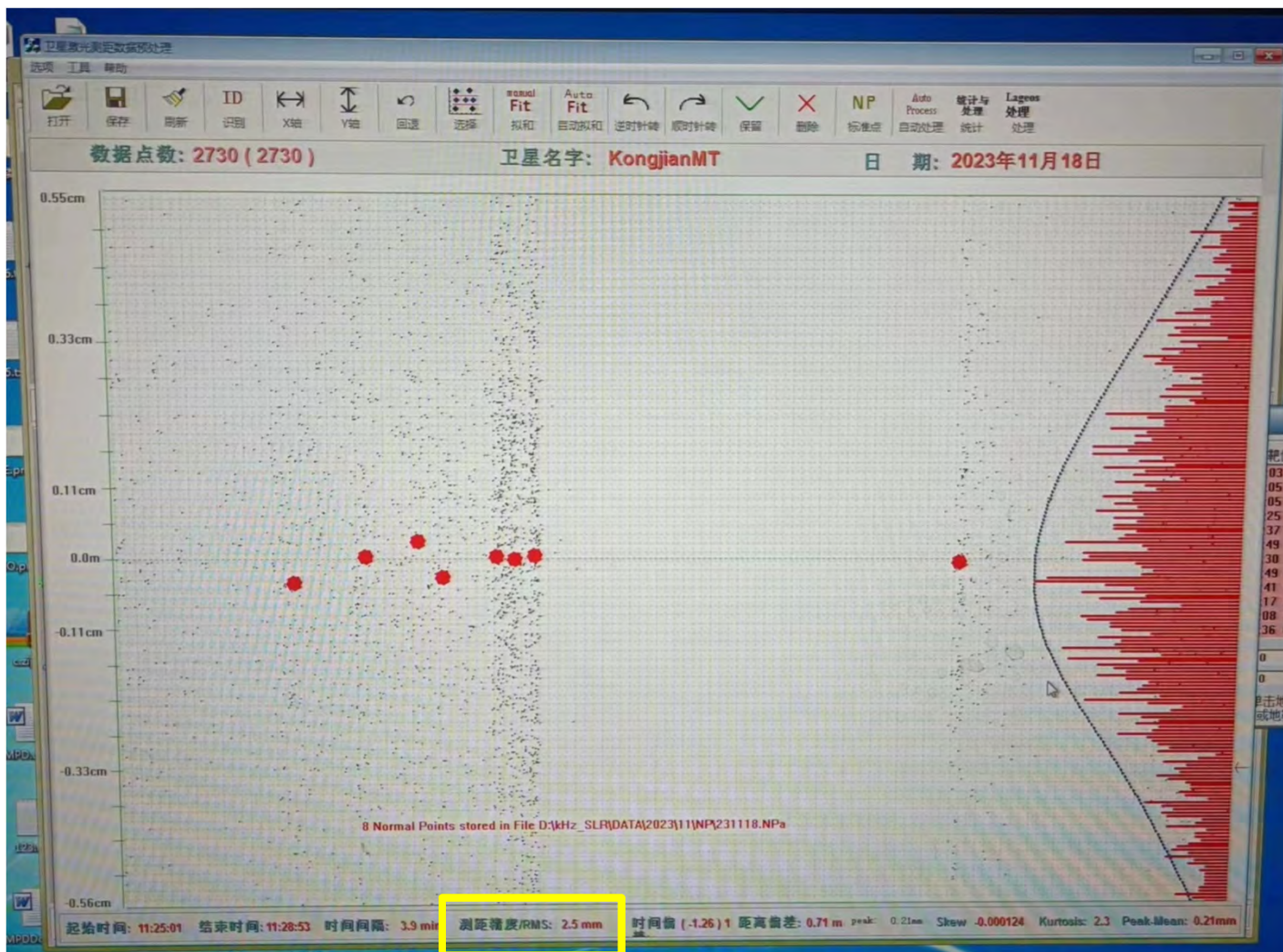
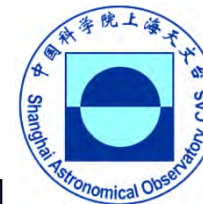


除了载荷携带的高精度激光反射器以外，空间站组合体还装有3个用于交汇对接的大型激光雷达反射器，同样会对星地激光测距产生较强的回波信号，对LTT实验形成干扰。即所谓的**鹰目标问题**。

开展了多次SLR实验，根据测量精度、回波覆盖弧段、回波轨迹交汇等特征，实现了**鹰目标干扰下有效信号提取**，保证了时间传递的测距数据正确。



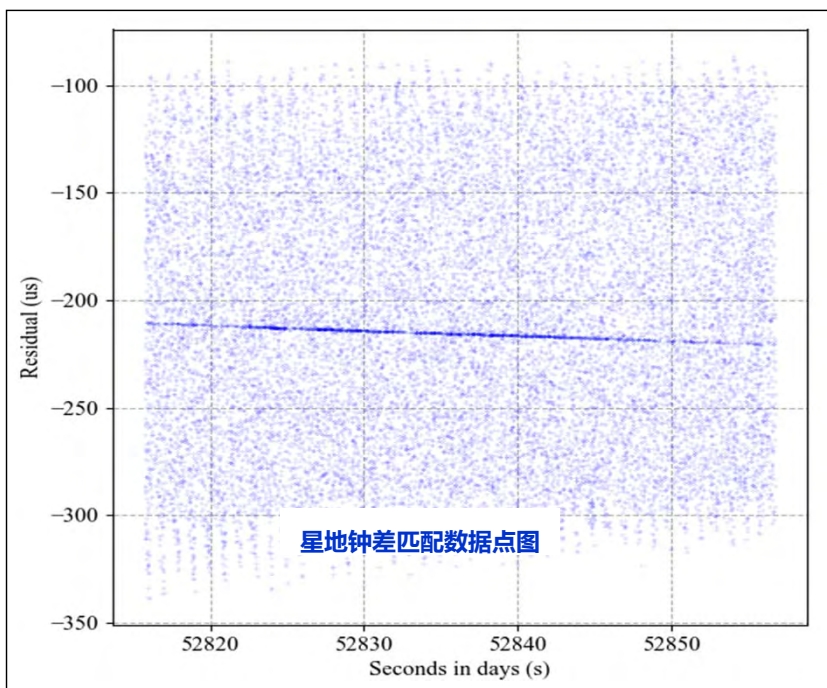
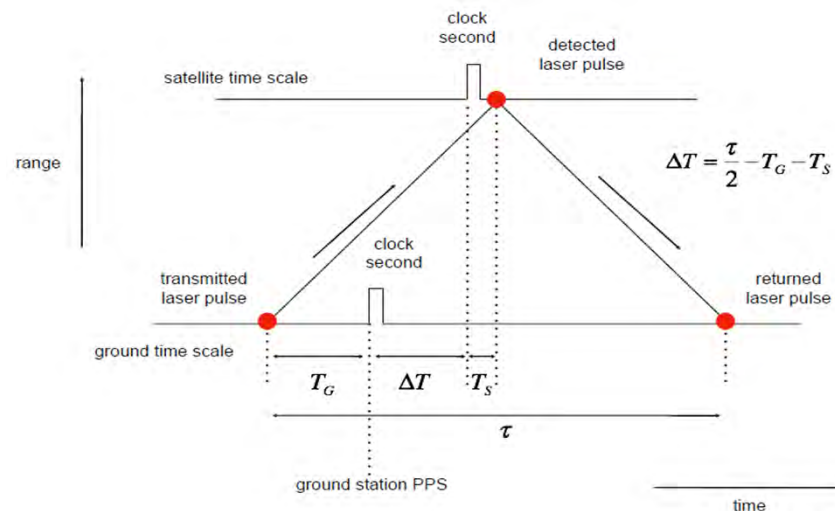
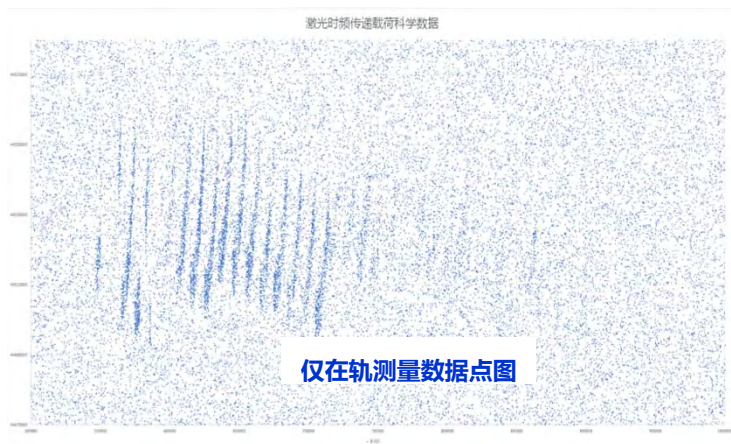
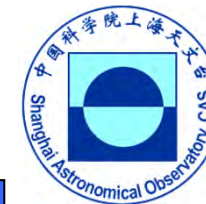
三、空间站工程



星地激光测距（角反射器）内符精度为2-4mm



三、空间站工程

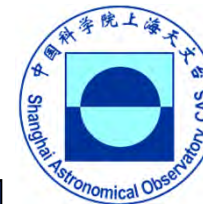


2023.06，空间站配置氢钟/微波钟，西安40cm专用地面站配置GPS接收机和20ps脉宽激光器，实现了优于20ps的星地钟差测量精度，和发射前桌面测试一致

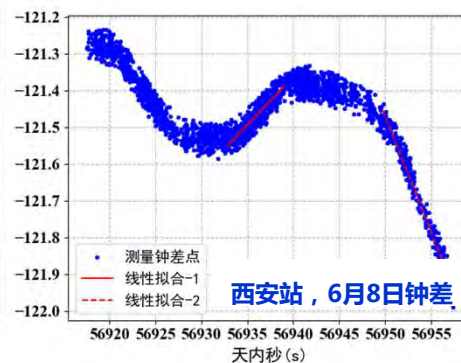
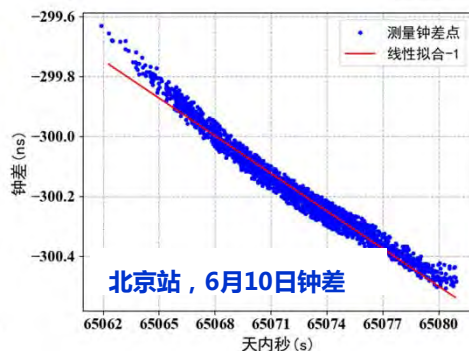
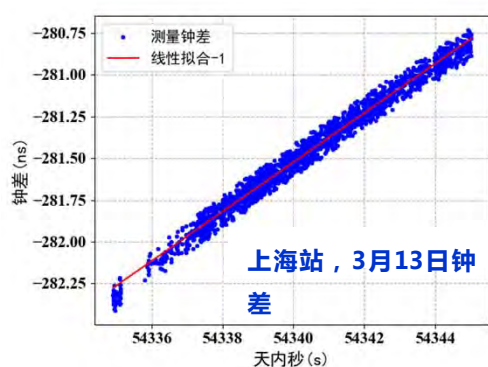
天气和仰角合适时，建链几乎次次成功。



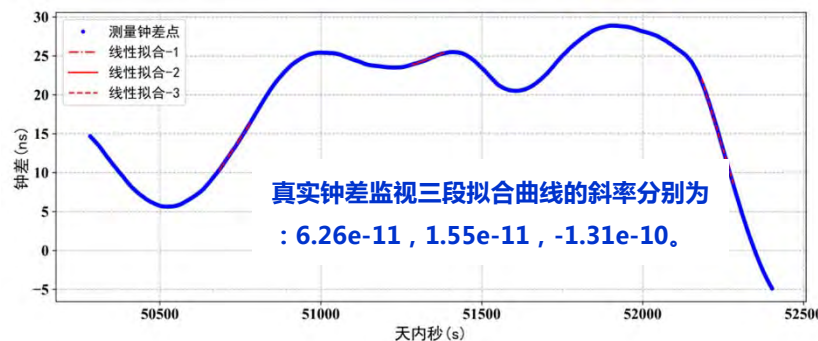
三、空间站工程



将地面反射测距数据和星上时差载荷接收到的有效数据进行配对，得到同周期的三个时刻数据，利用计算模型进行数据处理。由于地面时钟的频率准确度仅为 $1e-11$ ，在链路误差改正时，仅需要考虑了相对论效应修正和光行时改正，最终的多比分析结果如下。



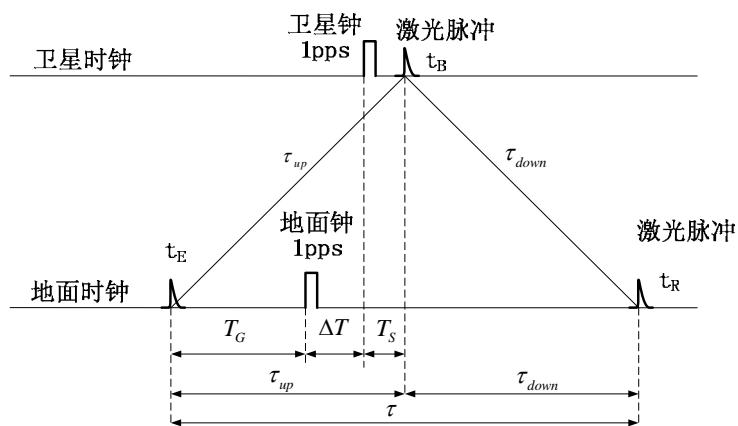
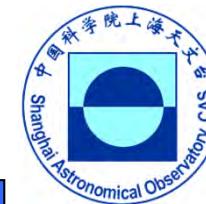
测站	时间	仰角	反射测距精度	测量时间	钟差测量精度	频率准确度
上海	3月13日	33-29°	7.2mm	10s	44ps	$1.48e-10$
西安	6月8日	27-25°	6.6mm	40s	22ps	$2.63\sim 6.28e-11$
西安	6月10日	59-67°	5.8mm	24s	22ps	$1.87e-10$
北京	6月10日	26-32°	3.4mm	20s	20ps	$4.18e-11$



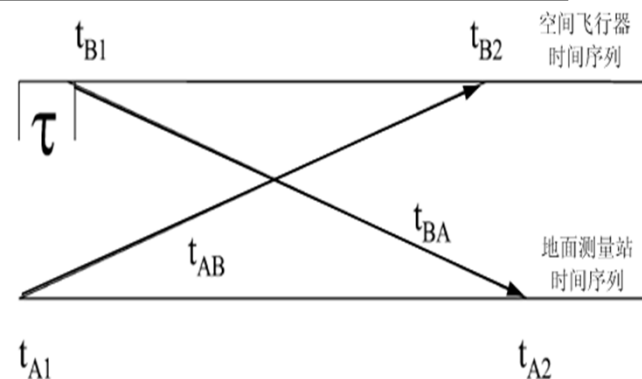
四圈数据的频率准确度在 $1.48e-10\sim 2.63e-11$ 之间。通过和真值钟差监视结果对比可知，星地链路结果和实验室时钟相互比对结果基本一致，验证了星地激光时间比对链路钟差测量结果的可靠性。



四、未来展望



$$\Delta_{AS} = \frac{t_E + t_R}{2} - t_B + \frac{C_{Sag}}{2} + C_{Rel} + C_{Atm} + C_{ICal} + C_{ECal}$$



$$R = R_{EC} + R_{MC} = c/2 [(t_{E2} - t_{E1}) + (t_{M2} - t_{M1})]$$

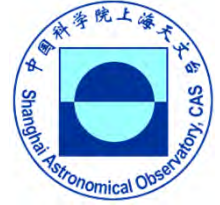
$$\tau = \frac{(t_{E2} - t_{E1}) + (t_{M2} - t_{M1})}{2 + \dot{R}/c}$$

	传统-往返模式	未来-双向模式
载荷复杂度	√ (计时器+探测器+反射器)	X (.....+激光器+望远镜)
作用距离	X (极限地月, 激光衰减R ⁻⁴)	√ (行星际, 激光衰减R ⁻²)
测量准确度	√ (<100ps)	X (~ 100ps)
产出	星地距离和钟差	星地距离和钟差
相似工程	中国北斗、空间站, 欧洲T2L2、ELT	美国MLA、MOLA、LOLA

传统往返模式作用距离受限, 双向模式将使高精度激光测距技术用于深空探测成为可能。



四、未来展望



雷达方程

$$n_0 = n_q \left(E_T \frac{\lambda}{hc} \right) n_t G_t \frac{1}{4\pi R^2} A_r n_r T_a$$

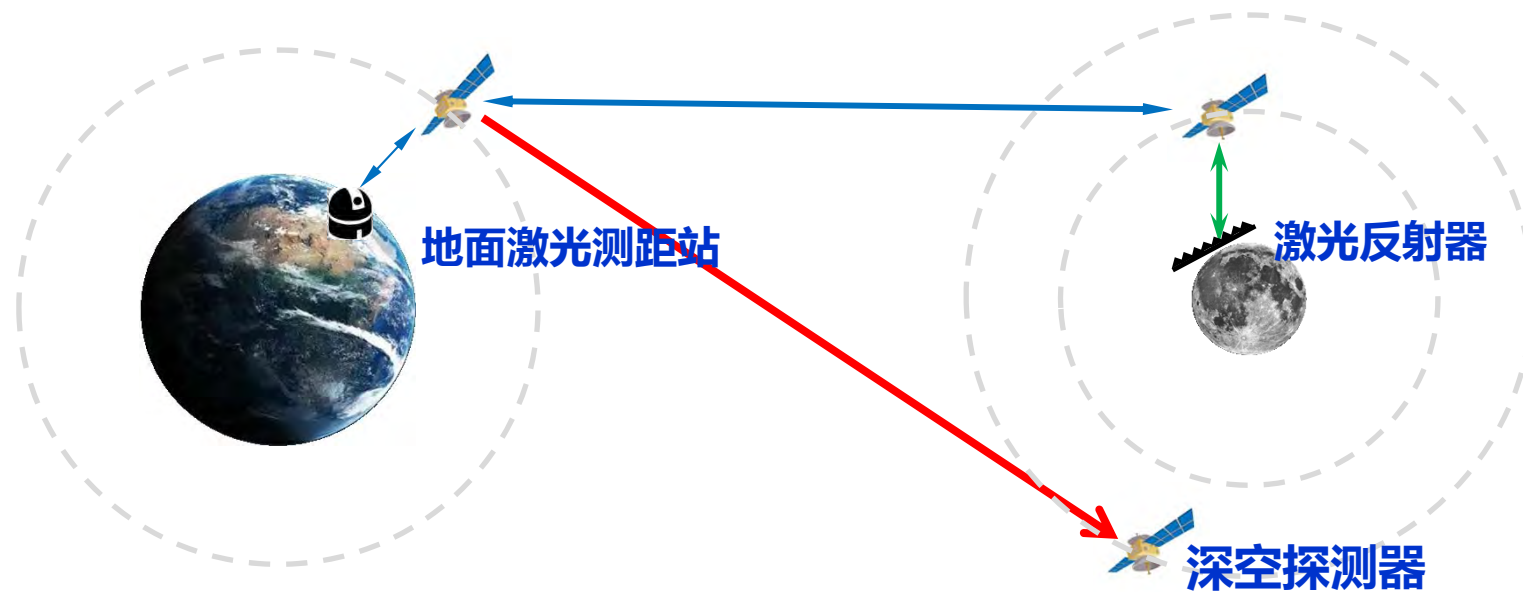
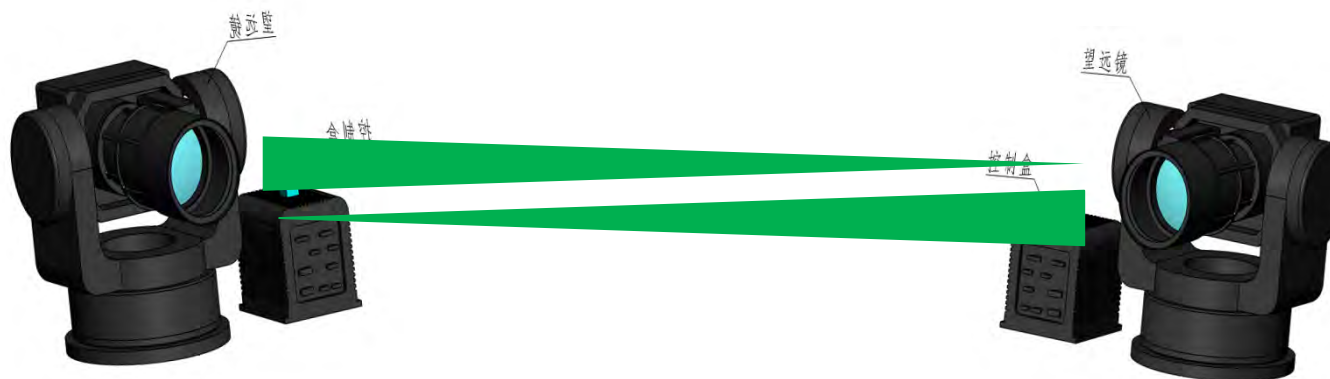
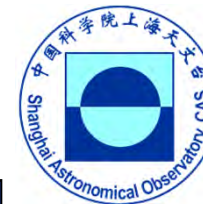
	地球-月球	地球-火星	地球-土星	地球-海王星	远期目标
上行激光脉冲能量/mJ	1	2-40	200	200	690
上行激光发射角/ "	10	10	10	10	10
作用距离/亿km	0.0038	0.88-4	15	45.2	150
载荷望远镜口径/cm	1	11	19	56	100
单次回波光子数/个	1	0.2	0.2	0.2	0.2

相比微波等手段，双向激光测量载荷的性价比更高，非常适用于远距离深空探测，

可提供厘米精度距离和百皮秒时间同步信息



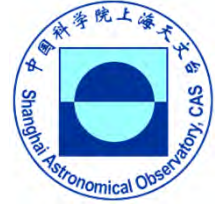
四、未来展望



目前正在开展样机研制，后续将用于在轨验证，满足星地、星星和星行等模式

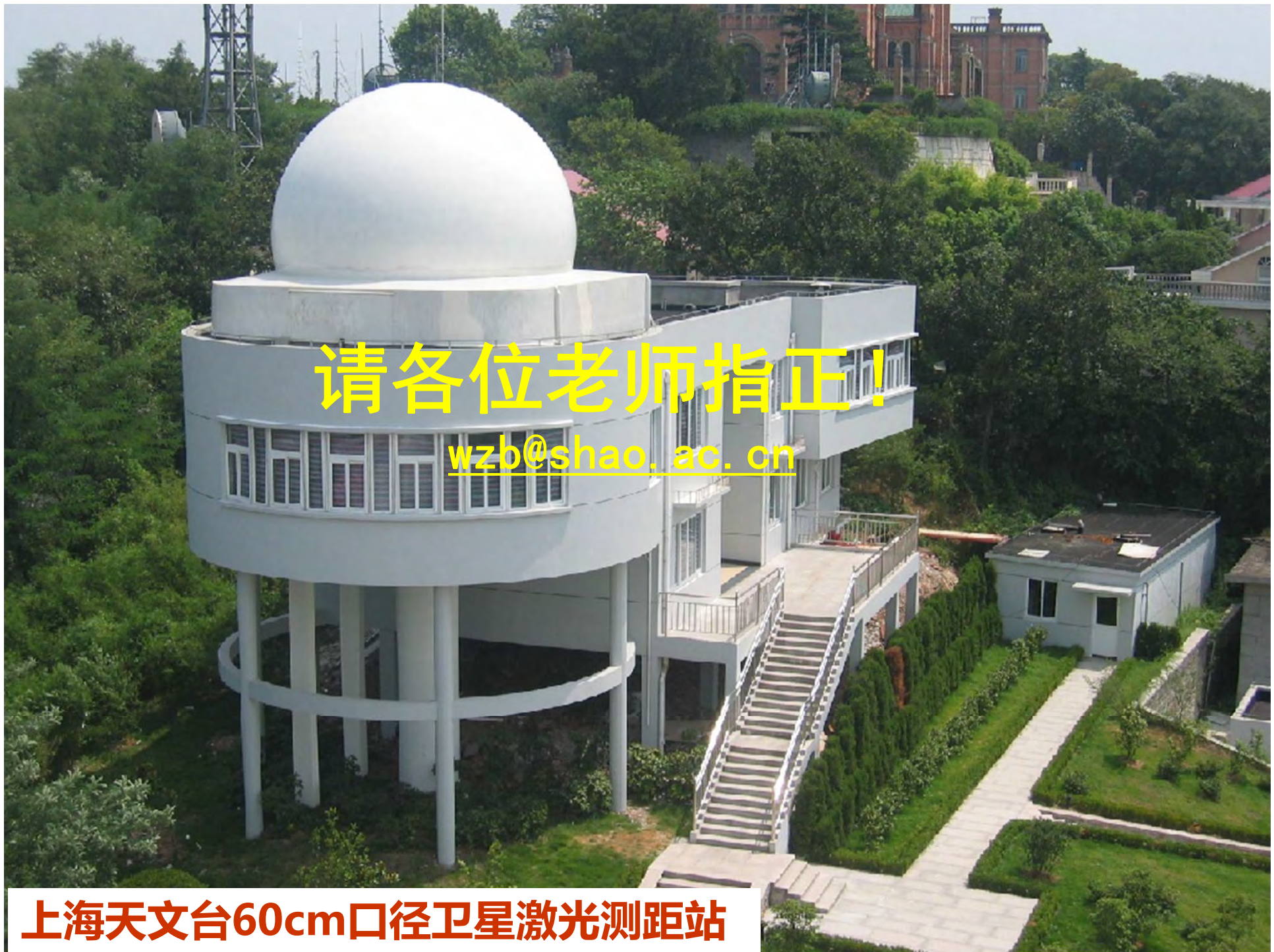


五、总结



1. 激光时频传递是SLR技术的典型应用，具有精度高的优势。
2. 我国空间站激光时频传递载荷和地面SLR站多次建链成功，具备多台站、全天时、高精度的测量能力，标志着工程研制任务的成功。
3. 载荷、SLR站分别基于氢钟和GPS接收机时钟，实现了星地时间传递精度优于20ps，与发射前桌面测试结果一致，国际已知最高。
4. 空间站是很好实验平台，**唯一在轨**激光时间传递系统，将支持基础物理、远程时间同步等研究或工程应用。
5. 针对传统往返模式作用距离受限，正在开展双向测量模式载荷样机，可提供高精度距离和时间信息，以期用于深空探测及行星科学研究。

也欢迎更多的同行加入激光时间传递应用研究工作！



请各位老师指正!

wzb@shao.ac.cn

上海天文台60cm口径卫星激光测距站