第 22 卷 第 1 期 天 文 学 进 展 Vol.22, No.1
2004 年 3 月 PROGRESS IN ASTRONOMY Mar., 2004

文章编号: 1000-8349(2004)01-0010-13

激光时间传递技术的进展

李 鑫, 杨福民

(中国科学院 上海天文台, 上海 200030)

摘要: 激光时间传递技术是通过激光脉冲在空间的传播来实现地面与卫星时钟或地球上远距离两地时钟的同步, 它具有很高的准确度和稳定度。一些国家已经成功进行了激光时间传递的试验, 结果证明利用激光进行时钟之间的同步是有效可行的。介绍国内外已有的激光时间传递试验的情况和结果, 重点介绍美国地面与机载原子钟之间的激光时间比对, 以及法国的 LASSO (LAser Synchronization from Stationary Orbit) 和 T2L2 (Time Transfer by Laser Link) 计划。

关 键 词: 天文观测设备与技术; 激光时间传递; 综述; 激光时间比对; 高精度计时器; 光电探测器

中图分类号: P127.1$^+$2 **文献标识码**: A

1 引 言

高精度的远距离时间频率传递技术, 是形成世界各国共同参考的标准时间 (UTC) 、保持各国或各实验室的标准时间 (UTC (K)) 准确度的重要保证。随着高精度原子频标性能的不断提高, 迫切要求远距离时间频率比对技术与之相适应。

近年来, 远距离时间传递技术已有了很大发展。主要采用的方法有 GPS 单通道共视比对、GPS+GLONASS 多通道共视、卫星双向时间比对 (TWSTT) 、GPS 载波相位传递、激光时间传递等 [1] 。

在接收机天线位置准确的条件下, GPS 共视比对结果的精度可达 3 ns (1000 km)~5 ns (几千公里) 。GPS 接收设备受外界环境的影响, 特别是天线的时延受环境温度变化的影响较大, 不同接收天线时延的温度系数范围一般为 0.2~2 ns/(°C) 。即使在影响最小时, 相距几百公里的共视观测, 信号时延随温度的变化也会在几天范围内成为比对噪声的主要因素。如果用 GPS+GLONASS 一体化的接收机来进行共视比对, 能改进比对结果的稳定性, 但是统一处理两个卫星系统的观测资料比较困难。

目前 TWSTT 精确度可达到几百 ps 。由于参与 TWSTT 比对的一对地面站同时向同一卫星发送时频信号, 并接收对方发送经卫星转发的信号, 发送和接收的信号取相同的路径和

收稿日期: 2003-06-20 ; **修回日期**: 2003-09-22

相反的方向，因此该技术的优点是有效地抵消了卫星位置或地面站位置不准确而造成的测量误差以及路径中的反常电离层、对流层干扰引起的时延误差。另外由于通信卫星有较宽的信号带宽，有利于信号的设计，而且受环境温度的影响也较小。相对 GPS 共视比对而言，TWSTT 的问题在于地面站的自动化，因为其操作比较麻烦，参加比对的两个站之间经常需要协调。而且设备昂贵，全球的时间实验室不可能广泛采用。

GPS 载波相位技术具有最佳的稳定性，但是目前的问题是载波相位共视比对只能进行高精度频率比对，难以进行时间比对，因为载波信号中没有时刻的起算点。

当今原子频标的发展使得其有可能在准确度方面接近 1×10^{-15}，日稳定度接近 1×10^{-16} [2]，因此有必要研究稳定度好、精度高的激光时间传递技术。LASSO (LAser Synchronization from Stationary Orbit) 实验已表明洲际时间传递或星钟的检测精度可达 100 ps 。分析得出，激光时间传递的精度可能达到 20 ps ，高于其他时间传递技术 1~2 个量级。但是时间传递技术通常要求是全天候的，例如国际原子时 (TAI) 计算或 GPS 卫星与地面站之间、地面站与地面站之间的时间比对，均需要 24 h 连续进行。激光时间传递受天气条件的影响不能作为常规的比对手段，但其高精度可以作为微波手段的标校，并在一些必要的远程钟的比对和同步中起重要作用。本文介绍国内外已进行过的激光时间传递试验以及今后的计划。

2　激光时间比对的原理

卫星与地面站间进行激光时间传递的基本原理是，从地面站向卫星发射激光脉冲，然后由放置在卫星上的后向反射器把光脉冲反射回地面站。地面站记录光脉冲的发射时刻和回波的到达时刻，星上装置记录光脉冲到达卫星的时刻，从而计算出卫星和地面站之间的钟差。

卫星时 T_{S} 和地面时 T_{E} 的秒脉冲时差为 ΔT 。在时间比对过程中，激光观测站于地面时 t_A 时刻发射一个激光脉冲，卫星时 t_B 时刻到达卫星。此激光脉冲经卫星上激光反射器反射回观测站，时刻为 t_C (见图 1) 。如果暂不考虑卫星与地球的相对运动以及设备时间延迟等因素的修正，则星地时间系统的钟差 ΔT 为

$$\Delta T=\frac{t_A+t_C}{2}-t_B\ . \tag{1}$$

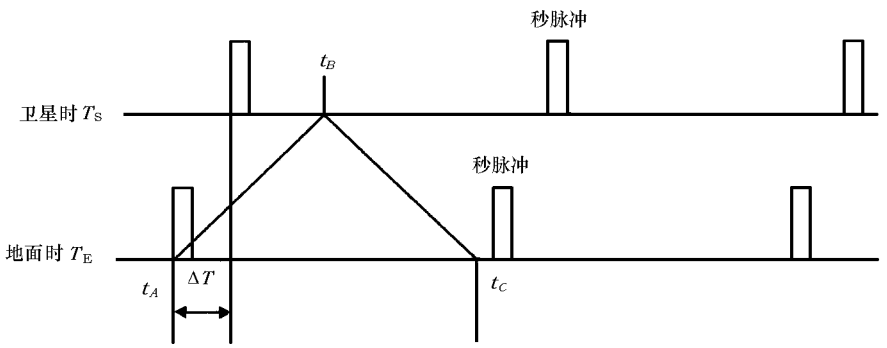

图 1　卫星与地面间激光时间传递原理图

如果地面上另一个测站也与该卫星进行时间比对，则两个地面站之间的钟差可以准确得到。如果两个地面站相距很远，不能同时看到该卫星，只要卫星时钟足够稳定，也可实现两站之间的时间比对。

3 国内外激光时间比对试验

3.1 国外进展

3.1.1 地面与飞机间的激光时间比对试验

为了验证爱因斯坦广义相对论关于时间理论的正确性，美国马里兰大学 Alley [3] 研究组与 HP 公司、海军天文台合作于 1975 年进行了激光时间比对试验。美国海军和空军出于现代导航和定时工程的相对论修正的需要资助了这些试验。

试验在马里兰州附近进行。地面设备位于 Patuxent 海军航空试验中心，空间设备位于一架海军 P3C 反潜飞机上，该飞机能够在 10700 m 高空停留 15~16 h，试验装置如图 2 所示。

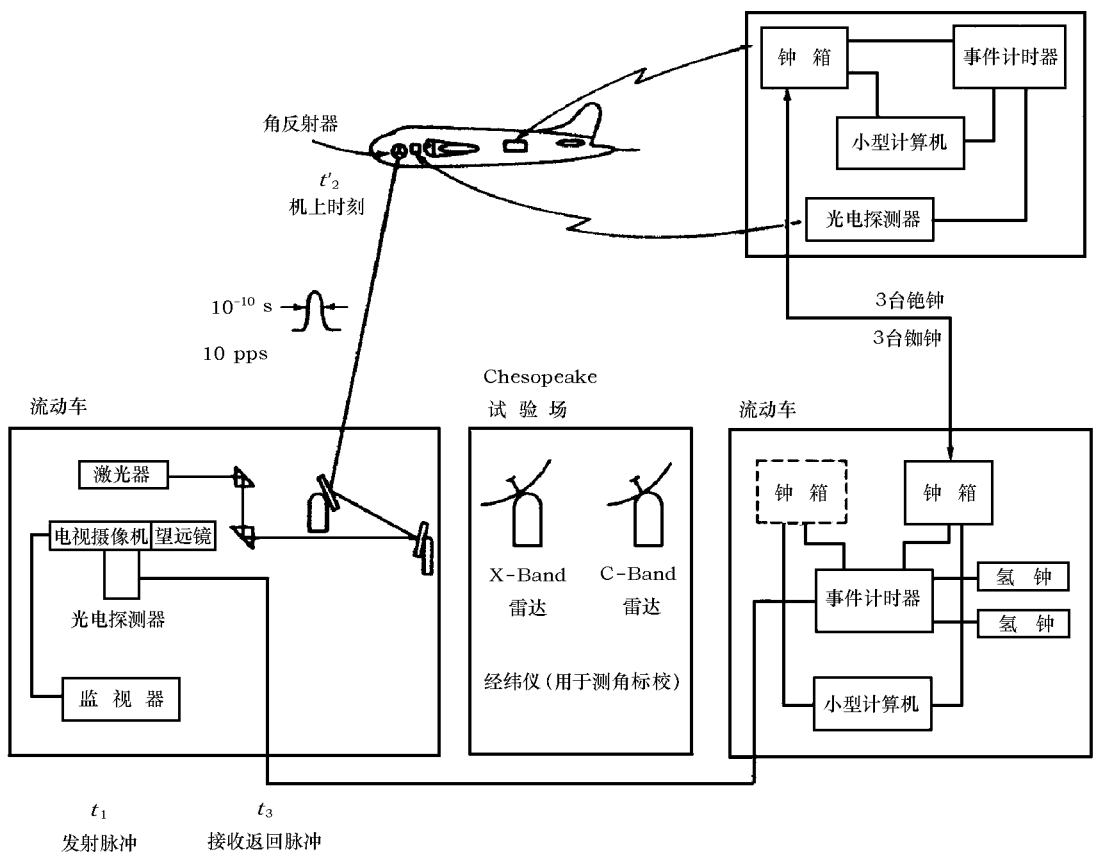

图 2 利用航天飞机进行激光时间比对的试验装置图 [3]

望远镜应与飞机返回的回波光路相连，原图忽略了；氢钟是为事件计时器提供更准确的频标。

飞机上有 3 台 HP 公司的铯原子钟， 3 台 Efratom 公司的铷钟，它们都装在一个特制的钟箱里，以尽量减少外界环境的影响。机上还有快速光电探测器、事件计时器 (用于记录激光脉冲达到飞机的时刻) 以及用于数据采集存储的计算机。在飞机左右外侧各安装了一个后向反射器，用于反射地面发射的激光脉冲。地面装置全部装在一辆 12 m 长的流动车内，其中也有一个钟箱，包括 3 台 HP 铯原子钟和 3 台铷钟，同样也有光电探测器、事件计时器及计算机记录系统。Nd:YAG 主动锁模激光器输出 532 nm 的绿光，脉宽 0.1 ns，能量 0.5 mJ，重复率为每秒 10 次，发散角 0.5 mrad，经过可跟踪的定天镜射向飞机，返回的激光脉冲由口径 19 cm 的望远镜接收。

每次飞行，飞机环绕 Chesopeake 海湾飞行 15 h，由 X-band 和 C-band 雷达跟踪，并提供飞机的高度、速度以及位置等信息，这些信息将用于飞机和地面时钟钟差的计算。试验中采用的光电探测器是 RCA31024 光电倍增管。事件计时器由 Alley 研究组研制，分辨率为 0.1 ns。每个钟差比对结果是 25 次比对的平均值，其精度达到 0.2~0.3 ns。因为激光发射频率为 10 Hz，所以几秒内可得到一个钟差。

这项试验的主要特点是：

(1) 采用多个时钟组成钟组。不论在地面还是飞机上都采用多个时钟，每隔 200 s 进行相互比对。这样在地面和机上各自形成一个“纸面钟”，减小了误差，同时还可发现个别钟是否有跳动；

(2) 时钟环境的控制。在试验中严格控制时钟所处的环境条件，使温度、气压的变化保持在很小的范围内，例如每个钟的周围温度变化小于 0.06° 。同时尽量加强磁屏蔽和防震措施，使得时钟的稳定度在飞行前后及飞行过程中达到 2×10^{-14}；

(3) 时钟可返回和重复使用。利用飞机装载时钟可以在飞行前或者飞行后进行两组时钟间

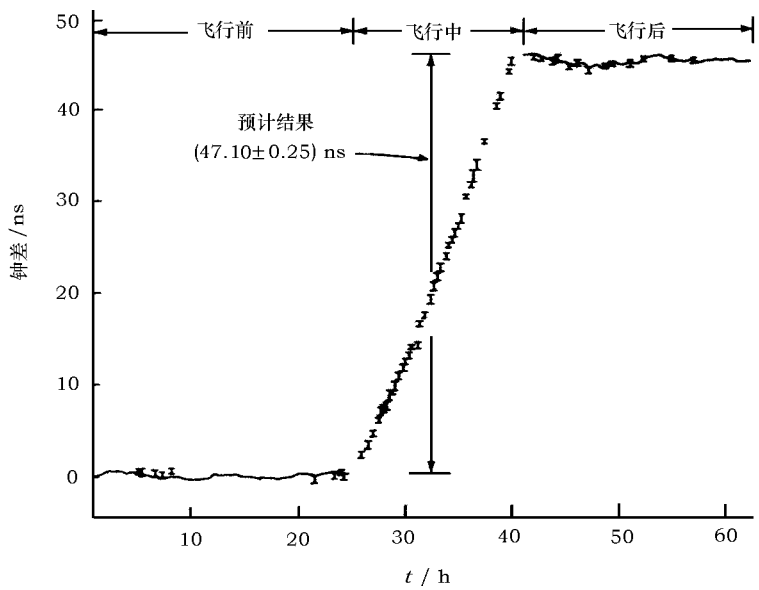

图 3　扣除频漂后的试验数据 [3]

直接的比对，同时也可以进行同一组时钟的多次重复飞行，从而发现试验中出现的问题，改进试验结果;

(4) 激光脉冲远距离时间比对。这次试验是第一次实现了爱因斯坦 1905 年提出的利用反射光脉冲进行时钟比对的想法，并且实现了在飞行过程中连续比对两处钟的钟差，排除了有关钟差跳动的任何怀疑。试验概念简单，易于理解。测量结果的精度和准确度都是前所未有的。它受大气延迟的影响很小，也不必考虑多普勒效应。

这项试验共飞行了 5 次，每次 15 h，获取了很好的时间比对结果。图 3 给出了 1975 年 11 月 22 日的试验结果。横坐标表示测量持续的时间，纵坐标表示地面和飞机上两个“纸面钟”的钟差。此图已扣除了飞行前和飞行后地面与机载两组时钟的频漂。由图可知，飞行过程中，两组钟差发生了连续变化，飞行前后钟差共变化了 (47.10±0.25) ns，与相对论预计的时差 (47 ns) 十分吻合。

3.1.2 地面精密激光时间比对试验

在地球自转的情况下，激光在地面东西两点之间的往返传递速度是否相等，是验证相对论的基本实验之一 [4]。1980~1982 年间，Alley 研究组进行了地面精密激光时间比对试验。试验在 NASA/GSFC (Goddard Space Flight Center) 的光学观测站和海军天文台总部 (位于华盛顿市区) 之间进行，两地相距约 25 km。由于两地都处于平地，相互不通视，因此把 GSFC 附近的水塔和海军天文台附近的大教堂作为激光中继站，在水塔和教堂顶上各装了一个平面反射镜，将 GSFC 光学站射来的激光反射到海军天文台的接收站，同时将海军天文台的激光反射器返回的激光信号反射到 GSFC 光学站。激光时间比对精度达到 20~40 ps。

1988~1989 年，Alley 研究组建立了一辆流动车，车上载有一台氢原子钟 (Sigma-Tau 公司生产) 和测时设备，此车来往于 GSFC 站和海军天文台之间，用于精密比对两地的真实钟差。因为在上述实验中，两地的光子探测器和计时系统等的各类时延值难以准确测定，如果没有这台车载氢钟，两地钟差的准确值就不可能得到。这台车载氢钟在运输途中必须连续运行，因此配有蓄电池和发电机、恒温室、防震设施等。

在 GSFC 站和海军天文台之间 (投影到东西方向距离差约 20 km)，如果地球自转速度与光速产生叠加，激光东西、西东传递的时间差约为 160 ps，则车载钟和激光脉冲同步方法得到的时间差应为 80 ps。试验结果表明，由于测量系统中系统误差的影响，两地时差测量的准确度仅为 100 ps，还不足以验证相对论效应。如果测量系统误差能大大减小，使两地钟差的准确度达到 20 ps，就有可能达到实验目的。遗憾的是，后来这个实验未能继续进行。

3.1.3 LASSO 试验

1972 年 Lefebvre 和 Gaignebet 提出 LASSO 项目，设想通过在地球同步卫星上安装激光反射器、激光接收器、计时器等设备来实现洲际激光时间传递。此计划得到欧洲空间局 (ESA) 的支持，可惜 1982 年载有激光时间传递设备的卫星 Sirio/2 [5] 发射失败坠入大西洋。第二套激光时间传递星载装备安装在 Meteosat-P2 上，于 1988 年发射，之后不久法国蓝色海岸天文台 (OCA/CERGA) 激光测月站就收到了回波。OCA 和奥地利 TUG/Graz 两站于 1989 年首次进行了激光时间传递试验。Graz 站采用了一台大能量的红宝石激光器。1992 年，Meteosat-P2 卫星移至大西洋上空，试验开始在美国 McDonald 测月站 (MLRS) 和 OCA 之间进行。

LASSO 试验的目的是验证洲际时钟同步的可行性，使精度达到 1 ns，促进不同实验室时

间尺度比较技术的发展，同时也对不同时间传递技术的性能进行比较。

Meteosat-P2 卫星在地球同步轨道上运行，主要用于气象学研究。 LASSO 试验星上的装备包括 4 部分：后向反射器阵列、激光探测器、计时装置、高稳定度振荡器 (USO) 。后向反射器阵列由 98 个 (外形尺寸为 340 mm×155 mm×35 mm) 后向反射器组成，可视范围为 ±20° ；探测器视场角为 ±10° ；时间系统采用 USO ，其频率稳定度 $< 10^{-10}/0.1$ s 、$< 5\times10^{-10}/60$ s 、$< 10^{-10}$ /1 d ；计时器的分辨率为 69 ps 。地面部分原则上可以任意选用激光测卫站或测月站。但是，大多数卫星测距站只测量激光脉冲发射至返回的时间间隔，而不是时刻值。而且 Meteosat-P2 卫星距离很远 (36000~38000 km) ，大多数卫星激光测距站测不到。因此，只有采用事件计时器且激光功率较大的测站才可以进行 LASSO 试验。 MLRS 站是美国唯一参加试验的站点。在欧洲、法国东南地区，卫星高度只有 13° ；中欧和北欧地区卫星高度更低。因此， LASSO 最后仅利用了两个测月站 MLRS 和 OCA 来进行试验。这两个站由望远镜、激光器 (532 nm) 、探测器和计时系统组成。铯原子钟提供标准时间尺度。试验在 1992 年 7 月间进行，结果得到 OCA 和 MLRS 两个测站原子钟之间的钟差精度优于 100 ps ，稳定度达到 $10^{-13}/1000$ s [6] 。

需要指出， LASSO 试验的星载设备是上世纪 80 年代初研制的，比较落后，精度也不高，尚有大幅度提高的空间。

3.1.4　航天飞机激光时间比对试验

美国 NASA 的科学家于 1977 年提出，利用航天飞机装载激光器、接收器、计时器和原子钟来进行全球时间传递 [7] 。与 LASSO 计划不同，该试验只需地面站配备激光反射器、光子接收器和计时器即可，其费用远比建激光测距站要低，这样地面上各个时频实验室都可以参加试验。但此计划后来未能实施。

1980 年， NASA 和美国国家标准局、马里兰大学、史密森天体物理台 (SAO) 、海军天文台等单位联合发起另一项航天飞机全球时间频率传递计划 STIFT (Shuttle TIme and Frequency Transfer experiment) [8,9] 。该计划与 LASSO 计划的比对方式相似，即航天飞机上放置激光反射器、激光接收器和计时装备，地面站由全球够条件的卫星激光测距站参加。这次试验的主要特点有两点：一是航天飞机上带有一个高性能的氢原子钟，由史密森天体物理台 Vessot 研究组提供；二是同时采用微波系统进行时间比对，激光系统对微波系统进行校准，提供传播路径和仪器设备中的时延改正。因此，该计划综合了激光比对 (高精度) 和微波比对 (全天候) 的优点。可惜它亦未能付诸实施。

3.1.5　EURECA 计划

1992 年，以美国 SAO 的 Vessot 研究组为首， NASA 、 ESA 、瑞士 Neuchatel 天文台 (ON) 、德国航天局 (DLR) 和意大利都灵理工大学 (PET) 等联合倡议，提出了 EURECA 计划 [10] 。该计划设想在 EURECA-3 卫星上搭载氢钟、激光和微波时间比对设备，目的在于试验空间氢钟的性能，比较各种时间频率测量和同步技术，实现远程实验室之间的高精度时间比对。拟携带两台氢钟，分别由 SAO 和 ON 天文台提供。

SAO 拟提供的氢钟直径 44 cm ，长 86 cm ，质量 67 kg ，功耗 27 W 。该氢钟比 1976 年引力红移试验 (GP-A) 时的氢钟已有很大改进 [11] 。预计激光测距的精度为 20 ps ，短期频率比对精度为 4×10^{-15} ，长期比对精度将好于 1×10^{-15} 。计划采用 PRARE (Precise RAnge and

Range-rate Equipment) 微波系统作微波时间比对，激光比对设备与其他计划相同。EURECA 计划原定于 1997~1998 年进行，后因 EURECA-3 卫星计划取消而未果。

3.1.6 T2L2 (Time Transfer by Laser Link) 计划

20 世纪 90 年代中期，法国 OCA 激光测距站提出了 T2L2 计划，拟通过地球卫星实现远距离两地时钟的同步。如图 4 所示，通过光脉冲在两个测距站和卫星之间的传播进行两地时钟的同步。由于计时器和光子探测器等技术的进步，T2L2 的时间比对精度要高于 LASSO 试验。预期两个地面测站新一代的时钟同步的精度达到 70 ps；相对频率稳定度在共视弧段 200 s 内可达到 3×10^{-15}，10 d 内积累多次连续测量可达到 3×10^{-17}。T2L2 时间传递的稳定度和精度比 GPS 及 TWSTT 要高出两个数量级。

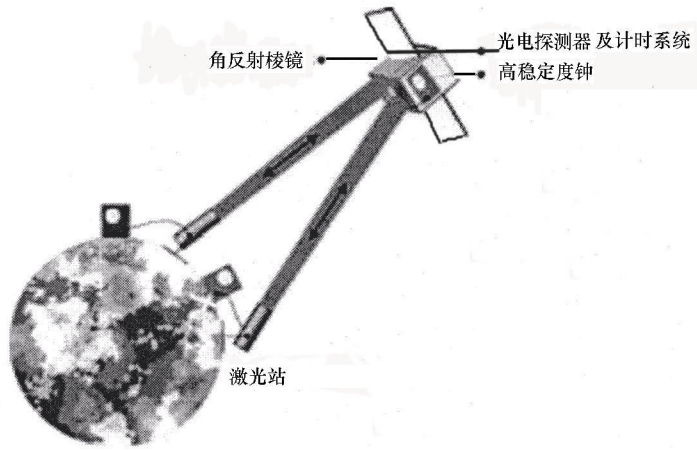

图 4 T2L2 试验示意图 [13]

该计划包括地面站和空间载荷两部分。地面站包括望远镜、激光器、光学计时器、电子计时器 (即事件计时器，原文为了区别于光学计时器，称之为电子计时器)、回波探测器以及参与时间传递的钟。其中激光器为 Nd:YAG 激光器，发射频率 10 Hz，输出激光脉冲波长 532 nm，脉宽 50~200 ps。光学计时器测定光脉冲发射的精确时刻，电子计时器用来测定接收回波的光电二极管输出信号的精确时刻。此光电二极管工作在雪崩状态，可探测单光子回波，测时精度为 35 ps，对 100 个以上的光子的回波，其精度可好于 10 ps。

整个 T2L2 空间载荷的重量为 15 kg，样机由 Dassault 公司研制。此样机在实验室内进行了模拟时间传递试验，结果如下 [12]：

(1) 实验标准差：10 ps；

(2) 时间稳定性：200 s，<0.4 ps；10000 s，<0.2 ps；

(3) 漂移：2 d，<5 ps。

1998 年 6 月，OCA 天文台进行了 T2L2 空间样机的地面模拟试验 [13]。试验在 OCA 测月站和一个流动站 FTLRS (French Transportable Laser Ranging System) 之间进行，两站相距几米，共用一个时钟信号 (HP5071A 铯钟)，T2L2 空间载荷放置于距离测站 2.5 km 的山顶。试验采用的频标时间稳定度在 10 s 内为 5×10^{-13}。FTLRS 的设备与测月站相同。对连续 10

d 的测量资料分析表明，两个测站在单光子模式下的测时精度好于 40 ps， T2L2 样机的时间稳定度在 1000 s 内达到了 0.2 ps 。

1995 年， T2L2 计划准备利用俄罗斯“和平号”空间站进行试验，后因政治原因取消。1998 年，该计划被欧洲空间局 (ESA) 接受为 ACES (Atomic Clocks Ensemble in Space) 计划的一部分。但由于 ACES 的载荷重量、散热、功耗和经费均超标，再加上与微波传递手段相比，作为校准手段的 T2L2 受天气影响较大，故被取消。随后，针对 T2L2 计划又提出了两条可能的途径： (1) 利用法国空间研究中心 (CNES) Myriade 系列微卫星。 Myriade 是能够承受 40 kg 负荷的小平台，装有 T2L2 载荷的某个 Myriade 卫星将专用于地面时间传递。 2002 年初开始第一阶段的研究，第二阶段星上装置的研究 (始于 ACES 计划) 已在新的微卫星环境下进行，预计于 2003 年完成； (2) 搭载到第一颗 Galileo 样星 (GSTB V2) 上，其目的是测量空间时钟的性能，并校验将用于 Galileo 的微波比对系统 [14] 。

新建议的 T2L2 载荷包括： (1) 单光子雪崩二极管探测器一个； (2) 事件计时器一台，计时精度优于 2 ps ； (3) 铷钟一台，稳定度优于 $10^{-12}\tau^{-1/2}$ ； (4) 激光反射器阵列，其大小取决于运载能力。全部载荷总重量为 20 kg ，功耗约 50 W 。

由于新一代的空间钟、地面钟的稳定度和准确度都已达到 10^{-16} 量级， T2L2 作为新一代的时间比对技术应是十分需要的。但目前这一计划究竟何时实施，仍需等待。

3.1.7　行星际测距和时间传递

NASA/GSFC 的 Degnan [15,16] 于 1996 年提出利用异步激光应答器进行行星际激光测距和时间传递的设想。其原理是地面激光测距站和行星际飞船分别向对方发射激光脉冲，然后由两者的计时器和时钟分别记录发出激光脉冲和从对方收到激光脉冲的时刻，以求出飞船到地面的距离和两个时钟的钟差。

图 5 为火星探测器上的异步激光应答器与地面激光测距站进行时间传递的原理图。

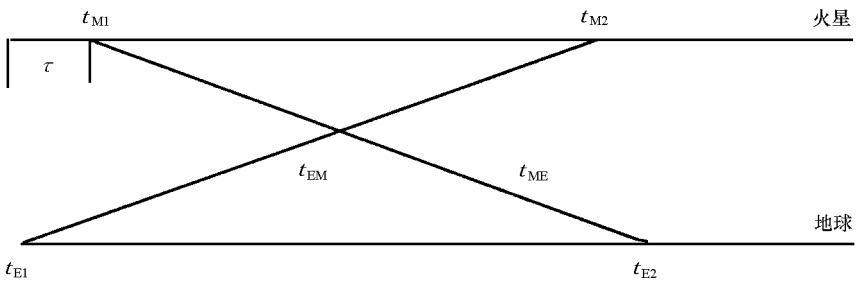

图 5　火星激光应答器与地面测距站进行时间传递的原理图

地面站在 t_{E1} 时刻发射激光脉冲，经过 t_{EM} 时间后，在 t_{M2} 时刻到达火星。另一方面，火星在 t_{M1} 时刻发射一个脉冲，经过 t_{ME} 时间后，在 t_{E2} 时刻到达地球。发射和到达的时刻分别以各自的钟作为标准时间尺度。火星上得到的数据通过微波传送回地球。在一次应答周期中，从地球和火星发射的脉冲之间的时间间隔为 τ ，结合脉冲到达的时刻就能求出地面钟和行星际飞船时钟间的钟差。具体公式如下：

$$R = \frac{c}{2}\left(t_{ME} + t_{EM}\right) = \frac{c}{2}\left[\left(t_{E2} - t_{E1}\right) + \left(t_{M2} - t_{M1}\right)\right] \ , \tag{2}$$

$$\tau = \frac{[(t_{\mathrm{E2}} - t_{\mathrm{E1}}) + (t_{\mathrm{M2}} - t_{\mathrm{M1}})]}{2\left(1 + \frac{\dot{R}}{c}\right)} , \tag{3}$$

其中，R 和 τ 分别是图 5 中 t_{EM} 和 t_{ME} 交点处的瞬时距离和瞬时钟差，$t_{\mathrm{E2}} - t_{\mathrm{E1}}$ 、$t_{\mathrm{M2}} - t_{\mathrm{M1}}$ 分别由地面和飞船上的接收器测得。修正量 $\frac{\dot{R}}{c}$ 可以由行星星历、微波传递或者激光测距资料得到。

行星际测距可以达到分米级精度，地面钟与行星际飞船时钟间的时间传递可达亚纳微秒级精度。行星际飞船可以位于太阳系内任何轨道上或者位于太阳系内任何行星上。由于飞船对载荷的尺寸、重量和功率的严格限制，不可能利用大功率的激光器发射激光，也不可能采用大口径的望远镜接收来自地面微弱的光信号，但是可以通过改进地面站装置，保证两个探测器都以近似相等的回波率探测对方发出的信号，当然采用单光子探测器效果会更好。异步激光应答器的设计有两个关键技术，一是高重复率 Q 开关微型激光发射器，二是相关距离接收器 (Correlation Range Reciever) 。接收器应该具有厘米级距离精度和亚角秒指向精度。为地球 – 火星间激光传递研制的行星际飞船载荷样机采用直径为 14.7 cm 的望远镜，及与 SLR2000 系统 (NASA 研制的新一代自动化毫米级卫星激光测距系统) 相同的激光器，激光能量为 135 μJ ，发射频率 2 kHz 。相关距离接收器利用一个四象限探测器，使双向测距指向精度达到亚角秒级。地球 – 火星模拟试验中，地面站采用 SLR2000 系统，此系统极大地改进了光束发散角，每分钟能够在地球和火星间 (距离为 0.52~2.52 AU) 进行上千次到上万次测量。

2001 年， OCA 向法国空间研究中心提出利用 T2L2 进行太阳系单向激光测距的 TIPO (Telemetrie InterPlanetaire Optique) 计划 [14] 。该计划设想在围绕太阳或行星运行的空间飞行器上安装时钟、计时装置和光电探测器。其原理是从地面激光站向太空飞船发射激光脉冲，激光脉冲相对于地面时钟和飞船时钟的时刻被分别测定，这样地球和飞船的距离就可以从这些时间值中求出。由于双向激光测距回波能量与距离 4 次方成反比，而单向激光测距接收的能量仅与距离平方成反比，因此单向激光测距有可能在太阳系范围内进行，同时也可以与 ASTROD (Astrodynamical Space Test of Relativity using Optical Device) 计划合作。 TIPO 可以作为 ASTROD 载荷的一部分。但是 TIPO 计划中由于飞船上没有带激光器，不是双向发射和双向接收的，飞船上时钟的钟差会求不准，有较大误差。因此，还是 Degnan 提出的方法更为可行。

3.2 国内进展

中国科学院上海天文台于 1981~1982 年间开展了地面高精度激光时间传递试验。试验在相距 25.2 km 的徐家汇总部和佘山站两地进行 [17,18] 。佘山站装有一台口径为 30 cm 的人造卫星激光测距仪，采用叶绿素 d 为红宝石激光器的 Q 开关，输出能量 1~2 J ，脉宽 15~20 ns ，每分钟发射约 25 次，通过望远镜向徐家汇方向发射激光脉冲，并接收返回的激光脉冲。两台 0.1 ns 分辨率的计数器分别记录激光发射脉冲和原子钟秒脉冲之间的时间间隔 T_A ，以及激光脉冲的往返时间 τ 。徐家汇总部装有后向反射器和一台口径 90 mm 的接收望远镜，其光电通道和佘山站相同。一台 0.1 ns 分辨率的计数器记录接收到的激光脉冲与徐家汇总部原子钟的秒脉冲之间的时间间隔 T_B 。徐家汇总部与佘山站的时间差可从下式求出：

$$\Delta T = T_A - T_B - \frac{\tau}{2} . \tag{4}$$

经过多次测量，最后得到结果为：在每组连续 2 min 的比对时间内，钟差平均值精度为

1.3 ns，两地铷原子钟的相对频率稳定度为 $1.9\times10^{-12}/7$ min，这与国产铷钟在实验室内实测的 7 min 取样的频率稳定度数据大致接近。实验测出两地铷原子钟的相对频差为 $(+9.7\pm0.5)\times10^{-12}$。

为了进一步开展卫星－地面激光时间比对方法和技术的研究，我们目前正在利用比较先进的设备进行激光时间比对地面模拟试验。

该试验是在上海天文台徐家汇总部实验室里建立 A 站和 B 站，在室外距离约 250 m 处放置一个平面反射镜。从 A 站发射激光脉冲，经平面镜反射进入 B 站，同时位于 B 站的角反射器原路返回接收到的一部分激光脉冲，再经平面镜反射进入 A 站接收镜。平面镜起到光路转折的作用。图 6 为地面激光时间比对系统框图。这样设置的优点是两站的氢钟实际放在同一实验室内，环境温度变化相同，又便于两台钟的实时精确比对，也有利于研究激光时间比对系统的系统误差。激光系统采用自滤波非稳腔 Nd:YAG 激光器，脉宽 30 ps，4 台 SR-620 作为高精度计时器，用光电二极管接收激光信号。两站都以上海天文台研制的氢钟作为高稳定度频率标准。整个试验系统用一台工控机完成 4 台计时器的实时采集、激光点火信号的控制、距离门的设置以及对测量资料的处理和分析工作。2003 年 6 月的初步试验结果表明，100 s 内的时间比对精度为 24 ps。在近 2 h 时间里，测出两台氢钟的相关频率差为 $(5.82\pm0.04)\times10^{-13}$，这与利用计时器直接比对得到的结果 $(5.77\pm0.03)\times10^{-13}$ 几乎完全相同[19]。

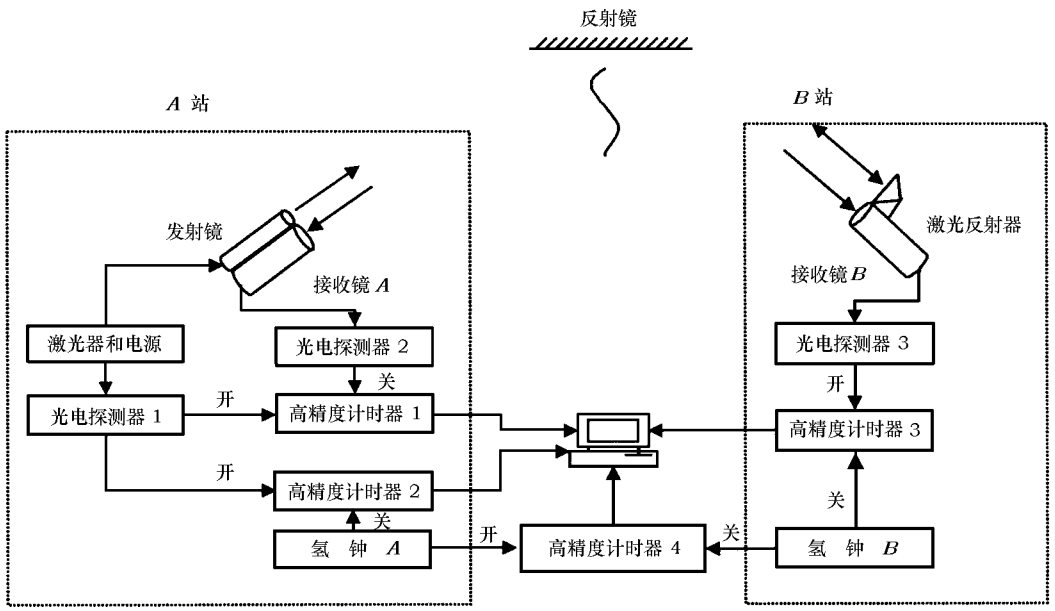

图 6　地面激光时间比对系统框图

4　卫星－地面激光时间传递精度分析

卫星上放置高精度钟、激光反射器、光电探测器和计时装置。从两个地面测距站分别向卫星发射激光脉冲，经过卫星上激光反射器反射后返回一部分光子。两个地面站分别记录激光

脉冲的发射时刻和经过卫星反射器反射的返回时刻。卫星上的计时器记录它们到达卫星的时刻。对 A 站发出的激光脉冲，可以精确计算出地面上 A 站钟和星载钟的钟差 x_{AS} 。对 B 站发出的激光脉冲，同样可以得到 B 站钟和星载钟的钟差 x_{BS} 。由此可以得到 A 站和 B 站钟之间的钟差 x_{AB} 。以下以 T2L2 试验为例。

在地面钟 A 和空间钟 S 之间的时间差 x_{AS} 可由下式计算得到：

$$x_{AS} = [(t_{\mathrm{Start}} + t_{\mathrm{Return}})/2]_{\mathrm{Ground}} - [t_{\mathrm{Board}}]_{\mathrm{Space}} + \tau_{\mathrm{Relativity}} + \tau_{\mathrm{Atmosphere}} - \langle\tau_{\mathrm{Calibration_Ground}}\rangle/2 + \tau_{\mathrm{Geometric_Space}}/2 \ , \tag{5}$$

其中， t_{Start} 、 t_{Return} 是激光脉冲相对地面时间尺度的发射时刻和返回时刻； t_{Board} 是激光脉冲相对星上时间尺度到达卫星的时刻； $\tau_{\mathrm{Relativity}}$ 是相对论改正项； $\tau_{\mathrm{Atmosphere}}$ 是激光脉冲上行和下行的大气时延之差，由大气折射系数短期变化引起； $\tau_{\mathrm{Calibration_Ground}}$ 是地面测距站的系统延迟； $\tau_{\mathrm{Geometric_Space}}$ 是考虑到空间等效反射点不在探测点上引起的延迟，可以通过优化光学部分的设计使其为 0 。

同样的方法可以求出 x_{BS} ，则 A 、 B 的钟差 $x_{AB} = x_{AS} - x_{BS}$ 。

地面钟 A 和空间钟 S 的钟差精度可由下式求出：

$$\sigma_{AS} = \sigma^2_{\mathrm{Start}}/4 + \sigma^2_{\mathrm{Return}}/4 + \sigma^2_{\mathrm{Space}} + \sigma^2_{\mathrm{Relativity}} + \sigma^2_{\mathrm{Atmosphere}} + \sigma^2_{\mathrm{Calibration_Ground}}/4 + \sigma^2_{\mathrm{Geometric_Space}}/4 \ , \tag{6}$$

其中， σ_{Start} 和 σ_{Return} 分别为 12 ps 、 35 ps ， σ_{Space} 为 10 ps ， $\sigma_{\mathrm{Atmosphere}}$ 约为 20 ps ， $\sigma_{\mathrm{Relativity}}$ 、 $\sigma_{\mathrm{Calibration_Ground}}$ 、 $\sigma_{\mathrm{Geometric_Space}}$ 这 3 项可计为 0 ，由此得到 $\sigma_{AS} = 30$ ps 。可假定 $\sigma_{BS} = 30$ ps ，则 $\sigma_{AB} = \sqrt{2}\sigma_{AS} = 42$ ps 。

5 激光时间比对系统的关键技术

5.1 激光系统

现在各测距站激光系统一般采用 Nd:YAG 锁模激光器，它有主动和被动两种锁模方法。通常被动锁模用可饱和吸收染料实现，主动锁模用声光调制器实现。为了进一步改善激光器件的稳定性，近年来采用半导体泵浦固体激光器 [20] 。例如 NASA/GSFC 研制中的半导体激光泵浦小型 Nd:YAG 被动调 Q 器件，其脉宽为 140 ps ，脉冲能量为 100 μJ (532 nm) ，重复率 2 kHz ，稳定性好，适合无人观测站。

5.2 高精度计时器

通用的时间间隔计数器 (例如 HP5370) 的测时分辨率达到 20 ps ，测时精度为 35 ps 。由于分辨率高，稳定性好，这种计数器为国际广泛采用。SR-620 是 Stanford Research 公司生产的时间间隔计数器，它的测时精度与 HP5370 相当，并具有多种接口，使用方便，价格较低，因而倍受关注。上述这些常规的时间间隔测量仪器均只能对时间间隔逐个进行测量，即主波开门，回波关门，完成一次测距，因此测量频率受到卫星距离的限制。

事件计时器是美国马里兰大学 Alley 研究组发明的，最早用于月球激光测距，利用它可以大大提高测量频率。目前，研制事件计时器的国家有美国、法国[21]、澳大利亚、拉脱维亚[22]等。其中，法国 Dassault 公司研制的事件计时器是为 T2L2 计划准备的，它符合航天设备要求，测时精度达到 3 ps，相应的测距误差仅为 0.5 mm 左右，此事件计时器也称为皮秒计时器 (Pico-timer)。

5.3　光电接收器

从卫星上的激光反射器反射回来的激光回波十分微弱，有时甚至仅单光子水平，因此必须采用高灵敏度的光电接收器件才能接收到它。同时，为了保证测距精度，要求接收器件应有十分快速的时间响应。

目前较多采用的光子探测器是单光子雪崩二极管 (SPAD)，由美国马里兰大学最先 (1985 年) 开始研制和使用。1988~1989 年，捷克技术大学研制了高精度的 SPAD 接收器，对 0.532 μm 的激光，它的量子效率可达 20%，时间游动约 20~30 ps，测距精度可达 3~5 mm。早期的 SPAD 光敏面直径仅 0.1 mm，有效视场很小，一般仅有 40″ 左右，准直要求很高。1994 年，捷克技术大学研制成功了光敏面直径为 0.2 mm 的 SPAD 接收器，它采用半导体制冷技术，大大减小了噪声[19]。1996 年，SPAD 增加了时间游动补偿功能，增大了接收动态范围，进一步提高了测距精度。以前采用微通道板光电倍增管时，需要另加恒比鉴别器；而 SPAD 是和鉴别器、时间游动补偿电路封装在一起的，无需另加电路板。

6　小　　结

激光时间传递技术在各种时间比对方法中精度最高。随着关键技术的发展，其精度还会进一步提高。未来的空间时间尺度将由高性能的原子钟提供，因此掌握激光时间传递技术十分必要。

参考文献：

[1] 王正明，高俊法. 天文学进展，2000, 18(3): 181

[2] 潘峰，翟造成. 天文学进展，2002, 20 (3): 7

[3] Alley C O. In: Meystre P, Scully M eds. Quantum Optics, Experimental Gravity and Measurement Theory, New York : Plenum Publishing Corporation, 1983: 363

[4] Alley C O, Nelson R A, Shih Y H *et al.* Proc. Precise Time and Time Interval Meeting (PTTI), USA, 1988: 261~285

[5] Serene B, Albertinoli P. ESA Journal, 1980, 4: 59

[6] Fridelance P, Veillet C. Metrologia, 1995, 32: 27

[7] Reinhardt V S *et al.* Proc. of 9th PTTI, USA, 1977

[8] Allan D W, Alley C O, Decher R *et al.* NASA TM-78288, 1980

[9] Decher R *et al.* Proc. 12nd Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting, USA, 1980: 99

[10] Vessot R F C, Mattison E M, Nystrom G U *et al.* Proc. of the 6th Euroean Frequency and Time Forum, Holland, 1992: 19

[11] Vessot R F C *et al.* Phys. Rev. Lett., 1980, 45(26): 2081

[12] Samain E, Fridelance P. Metrologia, 1998, 35: 151
[13] Samain E. In: Wolfgang S, Ulrich S, Reiner D eds. Proc. of 11th International Workshop on Laser Ranging, Germany: Deggendorf, 1998: 545
[14] Samain E. Time Transfer by Laser Link, http://cddisa.gsfc.nasa.gov/lw13/docs/papers/adv_samain_1m.pdf, 2002
[15] Degnan J J. In: Yang F M, Chen W Z eds. Proc. of 10th International Workshop on Laser Ranging, Shanghai: Shanghai Astronomical Observatory, 1996: 24
[16] Degnan J J. Surveys in Geophysics, 2001, 22: 431
[17] 杨福民，庄奇祥，苏锦源等. 应用激光， 1982, 2(4): 19
[18] 杨福民，庄奇祥，苏锦源等. 科学通报， 1983, 28(12): 738
[19] 李鑫. 硕士论文，上海：中国科学院上海天文台， 2003: 50∼80
[20] 张忠萍，杨福民. 天文学进展， 2001, 19(2): 283
[21] Samain E. An Ultra Stable Event Timer, http://cddisa.gsfc.nasa.gov/lw13/docs/papers/time_samain_1m.pdf,2002
[22] Bespalko Y A V, Boole E, Lapushka K. A010 Family of Time Interval Counters Adapted to SLR Applications, http://cddisa.gsfc.nasa.gov/lw13/docs/papers/time_artyukh_1m.pdf, 2002

Progress in Time Transfer by Laser Pulses

LI Xin, YANG Fu-min

(*Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China*)

Abstract: Time transfer by laser pulses is based on the propagation of light pulses between satellite and ground clocks or between remote clocks on earth. It will realize the synchronization of these clocks with high accuracy and stability. Several experiments of the time transfer by laser pulses had been successfully carried out in some countries. These experiments validate the feasibility of the synchronization of clocks by laser pulses. The paper describes the results of these experiments. The time comparison by laser pulses between atomic clocks on aircraft and ground ones in the United States, and the LASSO and T2L2 projects in France are introduced in detail.

Key words: astronomical facilities and technique; time transfer by laser link; review; time comparison by laser pulses; accurate timer; photodetector