

高精度国际时间比对的进展

王 正 明 高 俊 法

(中国科学院陕西天文台 临潼 710600)

摘 要

在过去的 45yr 中原子频标的性能大约每 7yr 提高一个数量级, 从国际标准时间和各国高精度守时的需要出发, 远距离的高精度时间频率传递比对技术也有与之相适应的很大的发展。GPS 卫星在近 20yr 中不仅成为导航定位不可缺少的工具, 在时间、频率的传递方面也发挥出巨大威力; 近年来多通道“全视接收”技术的发展使得时频传输比对的稳定性有了重大改善; GLONASS 卫星系统在高精度时间比对方面正在成为 GPS 系统的重要补充手段; TWSTT 的出现及发展在 21 世纪将具有广阔的应用前景。介绍了近年来该领域的进展与初步实验结果, 还简单介绍了 LASSO 和 Carrier phase 技术的情况。

关键词 时间比对—GPS—GLONASS—TWSTT—共视和全视技术

分类号 P127.12

1 引 言

高精度的远距离时间比对技术, 作为守时工作的三大要素之一, 在过去的 20yr 特别是 20 世纪末的最后几年中取得了长足的发展。世界各国共同参考的标准时间 (UTC) 的形成, 各国或各实验室的标准时间 UTC(*k*) 准确度的保持都需要分布在世界各地的钟的高精度比对。

相距遥远的实验室的钟之间的比对结果的测量噪声使比对结果不能体现出钟本身的质量水平, 同时也会大大降低时间尺度的短期稳定性。在过去的 45yr 中原子频标的性能大约每 7yr 提高一个数量级, 在时间频率的研究和应用领域中, 远距离时间频率比对技术必须与原子频标发展的步伐相适应^[14]。

图 1 显示当今和未来新的时间传递技术以及现在所用的钟 (晶振 Qu、铷泡 Rb、铯束 Cs) 的稳定性情况。从图中可以看出铯钟 1d 左右的稳定度可达 $10^{-13} \sim 10^{-14}$ 。1985 年 GPS 被首次用于远距离时间比对之前, Loran-C 地面导航系统被广泛应用, 该技术一天的最佳稳定度仅为 10^{-12} 。在 TAI 或者一个国家的综合原子时的计算中, 为了反映出钟的良好性能, 必须采用统计分析方法 (平滑、滤波) 把比对中的测量噪声降低到可接受的水平, 设其最短所需的采样平均时间段为 T_0 。在用 Loran-C 进行比对时, T_0 为 50d。在 GPS 的时间信号用

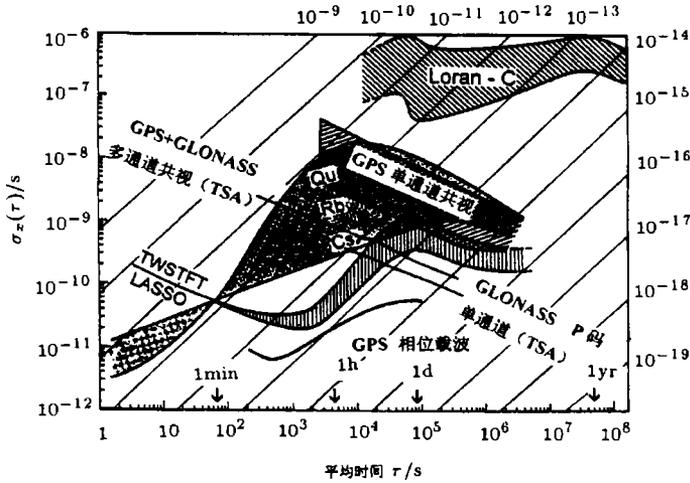


图 1 几种较新的时间比对技术与经典 GPS 单通道共视比对的比较^[14]

表 1 各种比对技术的情况比较

比对手段	系统实例	时间传递 准确度	频率传递 准确度	覆盖范围	使用的方便性	可用性
甚低频 (广播)	Omega	10ms	10^{-11} (1d)	全球	自动比对	连续
电话		1 ~ 10ms	10^{-8} (1d)	电话呼叫 覆盖区域	自动比对	连续
短波 (广播)	BPM	1 ~ 10ms	$10^{-6} \sim 10^{-8}$ (1d)	全球	与用户的准确 度要求有关	连续, 但与操作 员和地区有关
长波 (广播)		1ms	$10^{-10} \sim 10^{-11}$	区域 (洲内)	自动比对	连续
电视 (广播) 共视		10ns	$10^{-12} \sim 10^{-13}$ (1d)	近距	自动比对	与电视台节 目安排有关
卫星电视		0.5 ~ 10μs 10 ~ 100ns	$10^{-10} \sim 10^{-11}$ $10^{-12} \sim 10^{-13}$ (小范围)	通信卫星 覆盖区	自动数据识别 需事后处理	连续
长波 (导航)	Loran-C	1μs	10^{-12}	区域 (洲内)	自动比对	连续
导航卫星 (单站)	GPS 或 GLONASS	20 ~ 500ns	$10^{-10} \sim 10^{-13}$	全球	自动比对	连续
导航卫星 (共视)	GPS 或 GLONASS	5 ~ 20ns	$10^{-13} \sim 10^{-15}$ (1 ~ 50d)	洲际	自动数据识别 需事后处理	连续
卫星双向比对 (TWSTT)		1 ~ 10ns	$10^{-14} \sim 10^{-15}$	通信卫星 覆盖区	自动数据识别 需事后处理	由通信卫星工 作时间表决定

于远距离时间比对后, T_0 改为 10d。GPS 共视技术于 20 世纪 90 年代初开始被广泛采用, 对于 1000km 左右的基线, 用 T_0 为 1d 左右进行平滑, 基本反映了钟的性能^[17]。对于更远距离(洲际)的时间比对, 不仅要把 T_0 延长到 3~5d, 而且还要考虑实测的电离层改正和 GPS 卫星的精密星历表改正。因此, 从 1996 年 1 月起, TAI 计算中的 T_0 改为 5d^[11]。

远距离时间比对技术也应用于航天、军事、交通、电力等行业, 但应用目的不同, 对时间比对技术的准确度要求也不同。过去几十年中, 世界上的远距离时间比对手段及它们所能达到的准确度情况简要地列于表 1^[10]。表中 Loran-C 及列于其前的各种技术在准确度要求为 1 μ s 或低于此的应用领域中仍在发挥作用, 但在标准时间的形成和保持(即守时)方面已无能为力。表中后三项比对手段于 20 世纪 90 年代初以来逐步显示出威力。随着新一代频标的出现, 在 21 世纪的前一二十年中, 多通道 GPS 全视共视比对、GPS+GLONASS 一体化全视比对将向亚纳秒精度进军, 并在 1d 以上的长期稳定度方面起主要作用, TWSTT 及 GPS 载波相位技术将在中、短期稳定度方面起主要作用。

2 GPS 共视比对

GPS 卫星钟由美国海军天文台的协调时 UTC(USNO) 伺服, $|\text{UTC}-\text{UTC}(\text{USNO})|$ 通常小于 30ns, 因此通过 GPS 进行时间比对, 就可以得到某一个地方的钟与协调世界时 UTC 之差(不确定性为 50~60 ns)。在这种单向的时间传递中, 误差因素除了 SA 干扰以外, 主要来自卫星位置误差、地面站坐标误差、信号传递途径中的时延误差等。1980 年 Allan 等人提出了用 GPS 卫星共视方法进行准确时间频率传递的理论^[2]。共视法可消除卫星钟的误差, 同时对于相距不大于 3000 km 的两个接收机来说, 它不仅能降低由于共同的物理因素(卫星位置、电离层的干扰等)引起的不确定性, 而且可以有效地消除 GPS C/A 码的 SA 干扰。在接收机天线位置准确的条件下, 共视比对的不确定性可达 3ns(1000km)~5ns(几千 km)。1995 年开始, BIPM 时间部在计算 TAI 时, 依靠各时间实验室的单通道单频 GPS 接收机每天 48 次跟踪卫星, 把全球约 50 个时间实验室 200 多个钟的资料 $\text{UTC}(k)-\text{Clock}(i)$, 通过共视比对处理, 统一归算成 $\text{UTC}(\text{OP})-\text{Clock}(i)$ 。

当今原子频标发展的趋势有可能在准确度方面接近 1×10^{-15} , 日稳定度接近 1×10^{-16} , 为了与未来的原子频标发展相适应, 近几年来 GPS C/A 码多通道测量、GPS 载波相位时频比对等技术应运而生, 它们将在 TAI 的计算中逐步取代单通道单频的 GPS 共视比对。另外, 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, 不同接收机天线时延的温度系数范围一般为 0.2~2ns/($^{\circ}\text{C}$)。即使在影响最小的情况下, 相距几百 km 的共视观测, 信号时延随温度的变化会在几 d 时间范围内成为比对噪声的主要因素。近年来各种恒温天线(TSA)的研制成功进一步挖掘了 GPS 多通道时间比对的潜力。环境影响的另一个因素是近地面的多路径辐射对信号的干扰, 实验表明在接收机天线上加抗干扰环, 可有效地解决这一问题。

从理论上讲, 任何时刻在任何地点的上空最多会有 12 个 GPS 卫星能被同时观测到^[4], 国际 GPS 共视规范^[1]规定一次 GPS 跟踪长度为 13 min, 加上 2 min 的预置准备和 1 min 的间隙, 全长为 16 min。因此 24h 内用多通道接收机一天共可观测几百次跟踪。图 2 给出了同一地点、以同一钟为外标的两个接收机共视比对时间差异的 Allan 方差。如将图 2 中由上到下

四条曲线编号为 1、2、3、4，在平均时间 $\leq 10^{4.3}$ s 的情况下，曲线 2 所显示的稳定度明显优于曲线 1。由于温度变化对天线时延有较大的影响，曲线 2 的尾部显示出了这种不稳定性。曲线 3 显示用了恒温天线之后，多通道测量取 1d 以上的资料进行平均，稳定度大有提高。

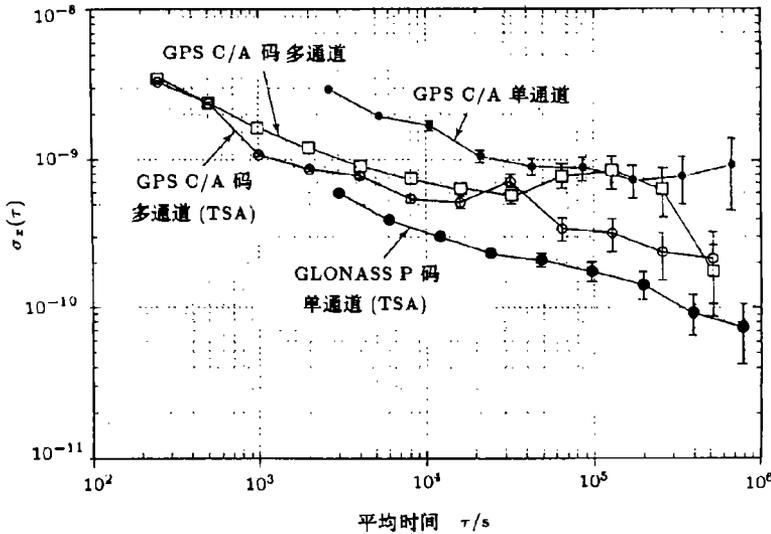


图 2 同一地点以同一钟为外标的两个接收机共视比对时间差的 Allon 方差 [7]

迄今为止，TAI 计算中主要采用单通道 GPS 接收机的共视比对，因此 BIPM 每半年公布一个新的共视表。多通道 GPS 共视称为“全视法” (all-in-view)，在采用“全视法”后，仍然沿用每 16 min 一次跟踪的模式，但因接收机能用多通道观测上空所有的 GPS 卫星，并以 1997 年 10 月 1 日 UTC 0^h 为共同参考历元，就不再需要每半年发布共视表了。

3 GLONASS 共视比对及 GPS/GLONASS 双星系统的一体化接收技术 [4,6,8,14]

俄罗斯的 GLONASS 卫星系统始建于 1982 年，由于它的 C/A 码没有 SA 干扰、P 码不保密、而且全球可用，它已成为继 GPS 之后的高准确度国际时间比对的补充手段。GLONASS 卫星发播的 P 码与 GPS 的 P 码不同。GLONASS P 码对时间同步来说，具有两个主要的优点：(1) 码的波长只是 GLONASS C/A 码的 1/10，是 GPS C/A 码的 1/5，因此它的伪距测量比 GPS 和 GLONASS 的 C/A 码要精确得多。(2) 同时在 L1 和 L2 频率上发播，就可以用双频接收机进行电离层时延的实时高精度测量。

GLONASS 卫星与 GPS 不同的另一个方面是：24 颗 GLONASS 卫星一共在 48 个频率上发播，(以后可能会改为 24 个频率)，而所有的 GPS 卫星只有 2 个频率。由于接收机对应于不同频率的时延是不同的，观测 GLONASS 卫星就具有一定的复杂性。GLONASS 接收机须经过绝对校正，在使用恒温天线的条件下，给出时延随频率变化的改正曲线。如果没有恒温天线，则时延随温度而变，经过校正的时延随频率而变的改正曲线也就无效了。

如果用 GPS+GLONASS 一体化的接收机来进行共视比对, 用 12 个 C/A 码的通道可以同时观测约 10 颗高于 15° 的卫星, 则一天可以作 890 星次的跟踪。长基线比对时也可以达到 160~200 星次的跟踪, 这将更进一步改进比对结果的稳定性。

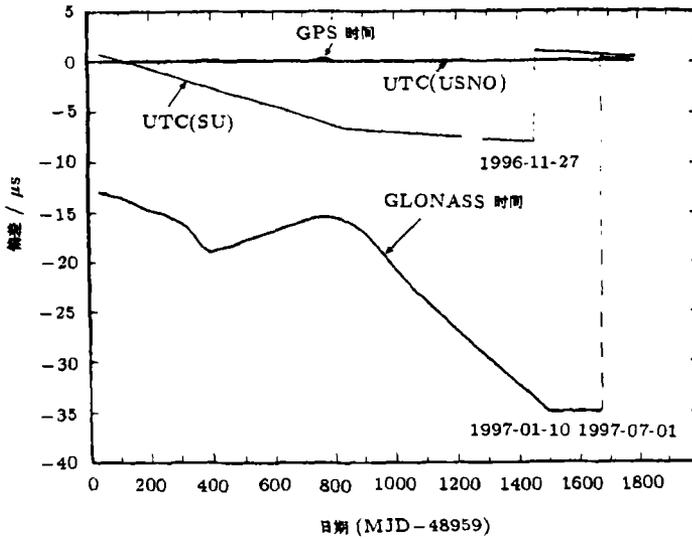


图 3 1992 年 12 月 3 日~1997 年 11 月 27 日 UTC(USNO)、UTC(SU)、GPS 时间、GLONASS 时间与 UTC 的偏离^[14]

虽然 GPS 和 GLONASS 有许多相同之处, 但在许多方面有较大差别, 这就给统一处理两个卫星系统的观测资料带来了困难。首先, GLONASS 卫星时间由俄罗斯国家标准时间 UTC(SU) 伺服, 但 GLONASS 卫星时间、UTC(SU) 和 UTC 三者有较大差别。为了解决这个问题, 1996~1997 年期间, 俄罗斯对 UTC(SU) 和 GLONASS 卫星时间作了 3 次调整(如图 3 所示)。目前 GLONASS 时间相对于 UTC(SU) 的准确度为 200ns, 相对于 UTC 的准确度也基本如此。UTC(SU) 和 GLONASS 时间还有待进一步调整, 使它们更接近 UTC。不过, 尽管这种差异会影响 GLONASS 发播准确的 UTC 时间, 却不会影响用 GLONASS 作共视时间比对。第二, GPS 和 GLONASS 两个卫星系统所用的参考坐标系统不同^[4]。研究证明, 在目前的原子钟性能条件下, 对于 3000km 以下的基线, 共视比对没有必要做事后的精密星历表改正, 但对于更长基线的共视必须做在统一参考系中的精密星历表改正。国际计量委员会(CIPM) 建议全球卫星导航系统采用国际公认的国际地球参考系 ITRF。GPS 的参考系 WGS 84 在经过最近的改进以后, 与 ITRF 相差不到 10cm。GPS 的这种精密星历表也早已由国际地球动力学 GPS 服务(IGS) 常规提供。但是 GLONASS 的参考系 PZ-90 在地球表面上与 ITRF 相差最大达到 20m, 而且使用 PZ-90 在大部分地方会有几 m 的误差。在 GLONASS 卫星参考系不变的情况下, 1997 年 9 月 IGS 第 7 次执行委员会会议上决定开展国际 GLONASS 联测(IGEX), 以编制在 ITRF 参考系中的 GLONASS 精密星历表, 来改正卫星位置误差引起的时延误差。1998 年 10 月起几十个测地和时间实验室参加 IGEX, 并于 1998 年底向民用用户提供了第一个 GLONASS 精密星历表。

实验证明, 用 GPS/GLONASS 一体化的多通道接收机加上 TSA 天线进行时间比对取得

了非常好的结果。图 4 显示 BIPM 在同一地点两个接收机的共视比对，它完全说明了测量比对技术本身的优劣。图中从上到下 5 条曲线中，1、3 的噪声水平相同，为 ± 3 ns；曲线 2 在消除了 GLONASS 不同卫星的频率所引起的时延差异之后，噪声水平也是 ± 3 ns；曲线 4 和 5 分别是 GLONASS P 码单通道未消除和消除了不同卫星的频率所引起的时延差异的情况。曲线 5 的噪声水平约为 600ps，这只是 GPS 单通道比对噪声水平的 1/5。根据 GPS C/A 码单通道与多通道观测的比较结果可以预计，用 GLONASS P 码多通道在 1d 的平均情况下，时间稳定度可达 100ps，这相应于频率稳定度为 1×10^{-15} 。

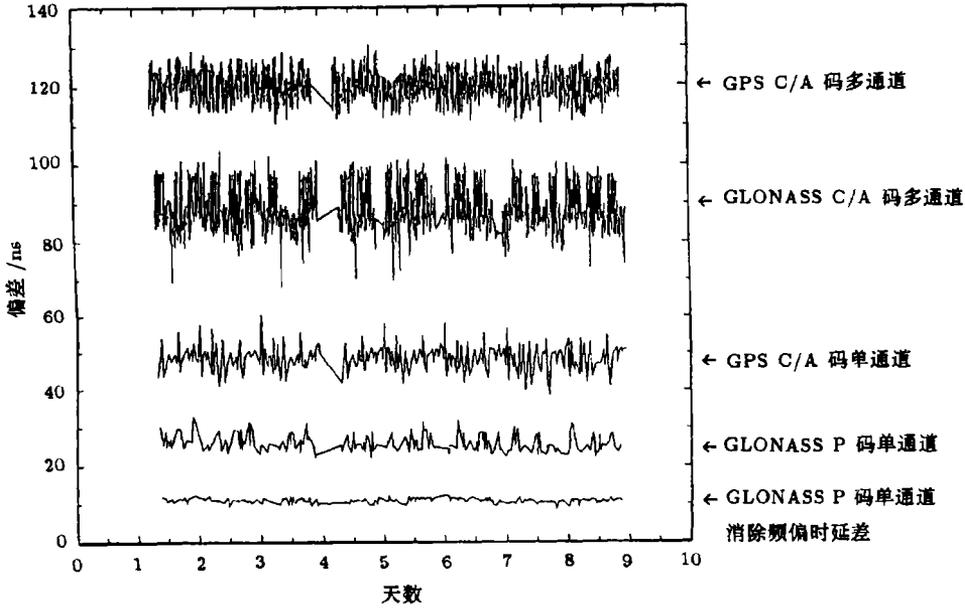


图 4 两个具 TSA 的接收机在同一地点进行不同类型观测的比较^[9]

BIPM 和 ORB(比利时皇家天文台) 两个实验室(相距 300 km) 的 GLONASS P 码单通道共视比对，一天的频率稳定度约为 3×10^{-14} 。BIPM 也对基线为 8000km 的 BIPM 和 USNO 的共视比对资料作了处理，GPS C/A 码多通道(每天 280 次跟踪)和 GLONASS P 码单通道(每天 43 次跟踪)两种技术所得的稳定度相当^[5]。

4 卫星双向时频传递 (TWSTFT)

TWSTFT(Two Way Satellite Time and Frequency Transfer) 是用通信卫星来进行双向时间、频率信号传递的技术。本文讨论的只是时间比对，因此只介绍双向时间比对 TWSTT(Two Way Satellite Time Transfer)。目前 TWSTT 方面的精确度可达几百 ps，当 TWSTT 的潜力得以充分发挥时，预计其精度可达 80 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, 而且受环境温度影响较小。

TWSTFT 必须租用通信卫星, 因此比对不可能连续。一般这样的比对每周进行 2 ~ 3 次, 每次约若干个 2 ~ 5 min 以得到足够的资料, 用取平均的方法来消除测量噪声。目前欧洲的八个和美国的两个时间实验室租用 INTELSAT 706 卫星, 每周一、三、五 UTC 14^h 开始, 30min 用于欧洲内部比对, 再 30min 用于北美和欧洲站间的比对, 每段比对 2 min, 间隔 1 min。亚太地区则用 INTELSAT 177 卫星 (CRL(日本邮政省通讯研究所)-NML(澳大利亚国家计量实验室)) 和 JCSAT-3 卫星 (CRL-CSAO(陕西天文台), CRL-NRLM(日本国家计量研究所))。目前正在计划进一步建网的包括 CRL-TL(中国台湾)、USNO-CSAO、CSAO-TUG(奥地利技术大学)。近年来, 国际上有关组织就 TWSTT 的技术问题作了许多努力, 已经解决或正在进一步研究的问题如下:

(1) 不等间隔资料的处理

测量资料的不连续和不等间距使比对结果达不到理论上的极限精度。通常在时频领域中所用的噪声分析和稳定度估计方法只适用于等间距测量资料, 它们能较好地给出测量数据序列中噪声的大小和类型, 并给出它们在时间域上的特征。当资料点不等间隔时, 必须探讨某种方法在缺了数据的相应时刻上得到逼近真实测量值的模拟数据, 从而得到一系列等间距数据, 以便进行测量噪声的分析和稳定度估计。另一方面, 钟的比对一般都是在某些固定时刻进行的。例如在 TAI 的计算中, 全球的时间比对相应于 MJD 的最后一位为 4 和 9、UTC=0^h 的时刻 (称为标准历元) 进行的, 但 TWSTT 的比对时刻与此不对应。为了符合 BIPM 的规范, 就必须对 TWSTT 的资料进行内插。这就需要寻找一种最佳的滤波平滑方法以消除比对技术本身带来的测量噪声。Tavella 和 Leonardi 经过多年研究, 从理论推导到实际资料的检验, 给出了实用的方法^[16], 基本上解决了这一难题。

(2) TWSTT 地面站设备时延的校正

TWSTT 技术本身有很高的精度, 但要实现 1 ~ 10ns 的准确度, 则要对地面站设备进行严格的信号时延校正。目前各对地面站之间时延差的粗值取自 BIPM 时间部每月 Circular T 中公布的 UTC-UTC(*k*)^[12]。但是经过严格时延校准的 GPS 接收机毕竟还不能代替 TWSTT 地面站设备本身, 要想充分发挥 TWSTT 技术的潜力, 必须在每对地面站之间用 TWSTT 流动站进行多次重复的校正。

卫星上一个天线只能覆盖地面上的一个区域, 对于甚长基线 (8000km) 的比对, 必须在卫星上用两个不同方向的天线和两个信号转发器来完成接收和转发信号, 因此双向信号在卫星内部的路径不一样, 要做这部分时延校正具有相当的难度, 用 TWSTT 流动站不能解决这个问题。用 GLONASS P 码在两站的共视比对来进行校正可能是一个有效的办法。

CCTF(Consultative Committee for Time and Frequency) 下设的 TWSTFT 工作组负责人 Klepczynski 和 Lewandowski 等人把 GPS 单通道共视和 TWSTT 两种技术的实测结果作了大量的比较, 所得结果说明: (1) 两种技术所得到的结果中有明显的系统差波动, 这种波动来自于 GPS 单通道接收机时延受环境温度的影响^[13]; (2) 在短基线 (几百 km) 情况下 10d 资料的平均结果显示 TWSTT 比 GPS 单通道共视稳定度有所改善; (3) 在长基线情况下 (5000 km 以上), TWSTT 比 GPS 单通道共视稳定得多 (见图 5)。

从 1999 年 4 月开始 BIPM 已经开始常规发表 TWSTT 的月报。1999 年 7 月起德国物理技术研究所 (PTB) 和 TUG 两站的 TWSTT 比对资料已正式用于 TAI 的计算。2000 年 1 月

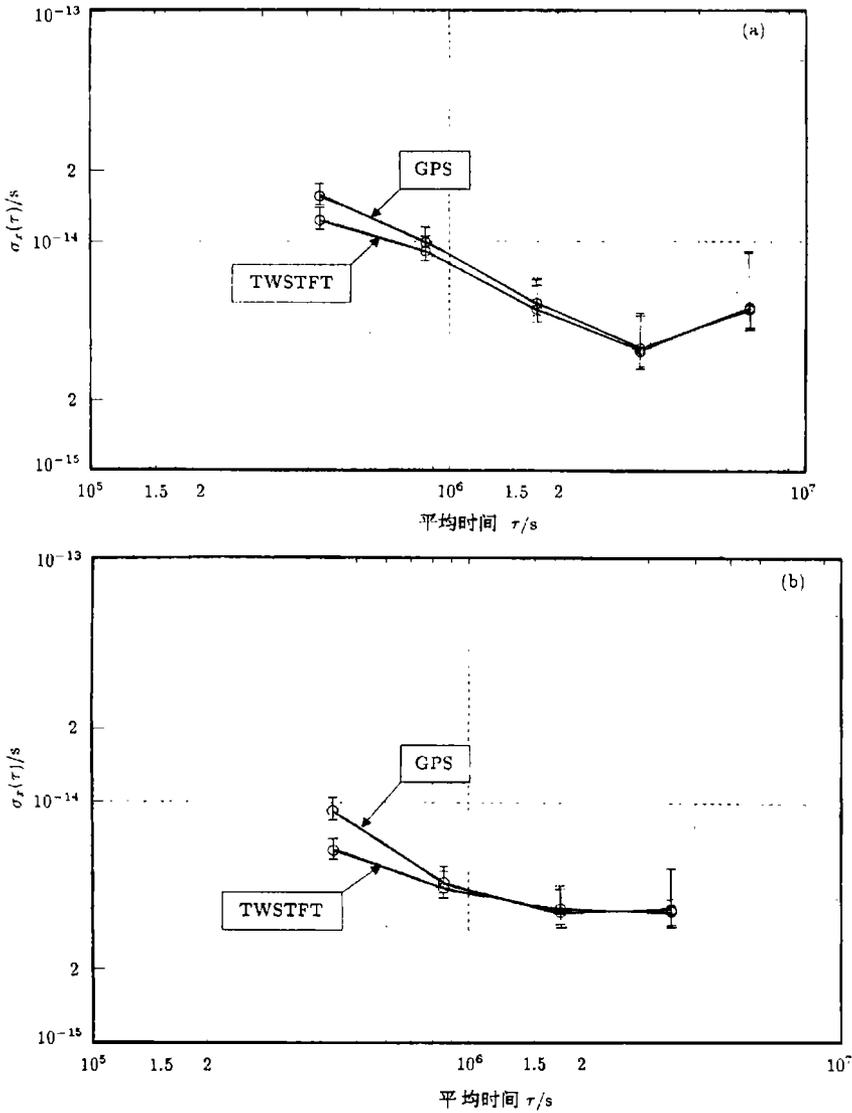


图5 用TWSTT和GPS单通道共视两种技术得到的稳定度比较^[3]

(a) 短基线 UTC(TUG)-UTC(PTB); (b) 长基线 UTC(NIST)-UTC(PTB)

起PTB-VSL(荷兰Van Swinden实验室)和USNO-NPL(英国国家物理实验室)2对TWSTT地面站的比对结果业已用于TAI计算^[12]。每对地面站的GPS共视比对用于TWSTT结果的检验,同时以备万一TWSTT设备出问题时应用。

5 讨论和展望

国际原子时 TAI 的计算中目前仍以 GPS 单通道时间比对为主, 原因是它技术简单、接收机价格低, 但是它 1d 的稳定度仅能勉强满足当前最好的 HP5071A 小铯钟的国际时间比对。目前国际上原子频标的发展情况预示着 2010 年之前新一代的频标将会被广泛应用, 其性能将优于 HP5071A 一个数量级, 这就对时间比对技术提出了新的要求。

从图 1 可以看出, TWSTT(TWSTFT) 在短期稳定性方面大大优于 GPS+GLONASS(TSA) C/A 码多通道共视比对; 在 $10^2 \sim 10^4$ s 的平均时间上也大大优于现在所用的 HP5071A 铯钟; 在长于 1d 的稳定性方面, GLONASS P 码共视比对将优于 TWSTT, 而且相信在用 GLONASS P 码、双频直接测量电离层时延后, 准确度和稳定度还会有较大提高。

各种比对技术的实验已经揭示出必须尽快解决的诸多关键问题: (1) 全球各时间实验室的接收设备时延不稳定, 必须经常进行校正, 是否可能在接收机中建一个内部的校正系统, 来解决这个问题; (2) 比对设备的天线位置必须在统一的参考系中准确测定(至少达 cm 级), 目前 BIPM 处理的全球 GPS 单通道共视比对资料表明亚洲和大洋洲地区的时间实验室在这方面普遍存在问题; (3) 电离层和对流层对接收时延的影响要精确测定, TAI 计算中从 1999 年 7 月起淘汰了原来所用的 OP(巴黎天文台)-CRL 和 OP-NIST(美国国家标准和技术研究所)时延实测改正, 改用 IGS 公布的电离层改正图, 但其他所有实验室 GPS 单通道观测至今仍采用电离层模型改正, 这对于未来高一个数量级的国际比对准确度来说显然是不够的; (4) 几千 km 的基线要用 GPS 和 GLONASS 的精密星历表改正卫星位置误差带来的时延误差; (5) 值得一提的是用导航卫星来进行时间比对直接依赖于导航卫星的信息, GPS P 码不公开和 C/A 码的 SA 干扰限制了民用时间比对。2000 年 5 月 1 日起美国军方已去掉加在 C/A 码上的 SA 干扰, 这为民用提供了方便。GLONASS 卫星系统的前景也许令人担忧, 不过, 另一个全球导航卫星系统(欧盟的 Galileo 卫星系统)正在计划之中, 它将为时间用户提供类似于 GLONASS 的服务; (6) TWSTT 相对于 GPS 共视比对而言的一个缺点是地面站的自动化问题, 其操作比较麻烦、参加比对的两个站之间经常需要协调。当一个地面站与其他若干个地面站进行比对(例如 USNO 对欧洲诸站和 USNO 对 NIST)时, 从与一站比对切换到与另一站进行比对, 就涉及到整个比对程序的安排、数据自动交换、数据处理和存储等问题; (7) TWSTT 的数据密度低及观测时间与 TAI 计算的标准历元不吻合也是该技术的缺点; (8) TWSTT 设备昂贵, 全球的时间实验室不可能广泛应用。因此, 国际高精度时间比对趋向于多种技术并存, 充分发挥各技术的潜力, 取长补短, 互相补充。

图 1 中另外标出了 LASSO(用同步卫星传递激光所载的时间信号)和 GPS 载波相位^[15](Carrier phase)两种技术, 它们在长于 1 min 的稳定性方面均优于 TWSTT。LASSO 实验已经显示出不确定性可达 100ps, 预计第二代的 LASSO 不确定性可达 30ps。但是因为用激光会受到天气条件的影响, 不适用于常规工作。从图 1 可见, GPS 载波相位技术具有最佳的稳定性。目前存在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, 这个问题有待解决。

综上所述, GPS+GLONASS 多通道(TSA)、GLONASS P 码多通道、TWSTT 和 GPS Carrier Phase 等高精度远距离时间比对技术正在各显其能地快速发展, 以满足下一代频标远距离比对的需求。

参 考 文 献

- 1 Allan D, Thomas C. *Metrologia*, 1994, 31(1): 69
- 2 Allan D, Weiss M M. *Proc. 1980 IEEE Frequency Control Symp.*, Philadelphia, PA, 1980, 334
- 3 Azoubib J et al. In: Lee A B ed. *Proc. 30th PTTI*, Reston, Virginia, USA, 1998, Washington: USNO, 393
- 4 Azoubib J, de Jong G, Danaher J et al. *Proc. 29th PTTI*, Long Beach, California, USA, 1997, 299
- 5 Nawroki J, Azoubib J, Lewandowski W et al. *Proc. 1999 Joint Meeting EFTF and the International IEEE FCS*, Besancon, France: IEEE, 1999: 190
- 6 Azoubib J, Lewandowski W et al. *Proc. 1999 Joint Meeting EFTF and the International IEEE FCS*, Micropolis, Besancon, France: IEEE, 1999: 263
- 7 Azoubib J, Lewandowski W, De Jong G. *Proc. 12th EFTF*, Warsaw, Poland, 1998, 87
- 8 Nawroki J, Lewandowski W, Azoubib J. *Proc. 29th PTTI*, Long Beach, Calif., USA, 1997, 319
- 9 Azoubib J, Lewandowski W. *Proc. ION-GPS*, Nashville, Tennessee, USA, 1998, 1729
- 10 Beehler R. *HANDBOOK Selection and Use of Precise Frequency and Time System*, Chapter 2B, Geneva, Switzerland: ITU, 1997. 33
- 11 BIPM Annual Reports of the BIPM Time Section, Vol.8~11, 1996~1998
- 12 BIPM TWSTFT Monthly Report No.1~12 (Published by BIPM Time Section, delivered by EMAIL)
- 13 Lewandowski W, Azoubib J, Klepczynski W J. *Proc. IEEE*, 1999, 87(1): 163
- 14 Lewandowski W, Azoubib J. *GPS WORLD*, Nov. 1998: 30
- 15 Petit G, Thomas C, Jiang Z et al. *IEEE Trans on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control on Frequency Control*, 1999, 46(4): 941
- 16 Tavella P, Leonardi M, Ph. D. Thesis, Torino, Italy: the Politecnico of Torino, 1998
- 17 Thomas C. *HANDBOOK Selection and Use of Precise Frequency and Time System*, Chapter 6, Geneva: Switzerland ITU, 1997: 119

The Progress on Precise Time Transfer and Comparison between Remote Sites

Wang Zhengming Gao Junfa

(Shaanxi Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Lintong 710600)

Abstract

Since about 15 years ago, when GPS receivers were used to accurate time and frequency transfer by common-view observations of GPS satellites, significant improvements have occurred in time comparisons with the uncertainties reaching 10~20 at first and then having further reduced to about 3 nanoseconds. Today the sole method of comparing clocks contributing to TAI is the GPS single channel common-view technique. However, over the past 45 years, the performance of the atomic frequency standards has been improved on average by an order of magnitude every seven years, and the metrology is experiencing the birth of many new and innovative frequency standards which seem to be approaching 1×10^{-15} in accuracy and a short-term stability of 1×10^{-16} . The needs for their future distant comparison challenge the adequate progress in time and frequency transfer. The recent progress resulting from the use of GPS and GLONASS

multi-channel observations, GLONASS P-code, and the specially protected receiver antennas indicates that GPS and GLONASS, as time transfer systems, should have a stability of one part in 10^{15} over one day and will eventually reach several parts in 10^{16} in the next few years. The two-way satellite time and frequency transfer (TWSTT or TWSTFT) is currently taken as one of the most precise and accurate methods for time comparisons between remote sites. The most recent experiments with GPS carrier phase measurements on time and frequency transfer show the extremely promising potential in this field. This paper mainly focuses on the recent progress of GPS single channel, GPS/GLONASS multi-channel and GLONASS P-code common-view technique with the newly developed receivers, and TWSTT. The comparisons between these techniques are described. The GPS carrier phase measurements are mentioned briefly.

Key words GPS—GLONASS—TWSTT—Time comparison—common-view and “all-in-view”

* * * * *

征 订 启 事

本刊 2001 年征订工作业已开始。本刊委托天津市全国非邮发报刊《联订服务部》办理订阅事宜。定价每册 10.00 元, 全年订价 40.00 元。凡需订阅者请将订刊款通过邮局或银行汇款至下列地址即可:

邮政编码: 300381

地 址: 天津市大寺泉集北里别墅 17 号

户头全称: 天津市河西区联合征订服务部

帐 号: 605248-1046196

开户银行: 工商行天津市尖山分理处

电 话: (022) 23973378; (022) 23962479 **传真:** (022) 23973378

网 址: www.LHZD.com **E-mail:** LHZD@public.tpt.tj.cn

汇款时请注明“订阅 2001 年《天文学进展》(编号 5155)”、告知订阅份数、订户名称、收件人姓名、地址、邮政编码, 以便本编辑部在刊物出版后逐期及时邮寄。凡非通过上述渠道订阅本刊者, 如有延误或寄失, 本部概不负责。敬请谅解。

欢迎订阅。谢谢。

《天文学进展》编辑部

2000 年 9 月 30 日