

文章编号: 1000-8349(2004)03-0219-08

卫星双向时间比对及其误差分析

刘 利¹, 韩春好²

(1. 信息工程大学 测绘学院, 郑州 450052; 2. 中国科学院 测量与地球物理研究所, 武汉 430077)

摘要: 介绍了卫星双向时间比对 (TWSTT) 方法的发展过程及其基本原理, 讨论了 TWSTT 的误差源, 分析了各误差源对精度影响。得出影响 TWSTT 精度的主要误差源为设备时延误差和路径传播时延误差, 而由于卫星和地面站运动引起的误差相对较小, 从而给出了实际应用时不同比对精度下需要考虑的误差源及对误差源的精度要求。

关键词: 天体测量学; 卫星双向时间比对 (TWSTT); 综述; 时间; 误差

中图分类号: P127.1⁺2 **文献标识码:** A

1 引 言

时间是一个基本物理量, 是描述物质运动的基础。高精度的时间服务对于导航定位、航空航天、深空探测、军事行动、物理研究、交通运输以及信息传递等都具有极其重要的意义, 而高精度的时间比对技术是实现高精度时间系统的关键^[1]。可以说, 没有高精度的时间比对技术就不可能使分布在不同地面实验室、不同空间飞行器和不同用户的时钟保持高精度的时间同步, 也就不可能实现高精度的守时和授时。

现代高精度的时间比对技术是随着技术的进步和时间服务精度的不断提高而逐步发展起来的。1905 年美国首先实现了无线电授时, 解决了大范围时间覆盖的问题, 其时间比对精度为毫秒量级。短波无线电授时持续了约半个多世纪。1958 年, 罗兰 - C (LORAN-C) 导航台链开始工作, 它的时间同步精度达到微秒量级。但是, 该系统覆盖范围有限, 精度远远满足不了现代科学研究和航天发展的需要。自人造卫星上天之后, 利用卫星传输时间频率信号进行时间比对得到了广泛重视, 人们开始把目光注意到卫星时间频率传递上。1960 年, 首次采用 ECHO I 卫星做单向时间传递试验, 因时延无法准确测定, 结果很不理想。1962 年美国海军天文台 (USNO) 和 NRL (现 NPL, National Physical Laboratory) 用 TELSTAR 卫星做了跨大西洋的时间比对试验; 1965 年 USNO 和 RRL (现 CRL, Communications Research Laboratory) 用 RELAY II 卫星做了跨太平洋的时间比对试验, 当时的比对精度达到 $0.1 \sim 1 \mu\text{s}$ ^[2]。随着扩频技术和伪随机码技术的应用, 时间比对精度大大提高, 现在卫星双向时间比对 (TWSTT) 的

收稿日期: 2003-11-25; 修回日期: 2004-04-21

精度已达到几百 ps^[3,4]。与 GPS 共视法相比, TWSTT 的比对精度高约 1 个数量级, 并且需要的观测时间短; 但是它的自动化程度低, 操作比较麻烦, 而且设备昂贵, 因此很难得到广泛应用^[3]。

目前欧洲 8 个和美国 2 个时间实验室租用国际通信卫星 (INTELSAT 706), 每周一、三、五 UTC 14 h 开始进行时间比对, 其中 30 min 用于欧洲内部实验室之间的比对, 再 30 min 用于欧洲和美国实验室之间的比对, 每个时段比对 2 min, 间隔 1 min。亚太地区则租用 INTELSAT 177 (CRL 与 NML, 即 National Measurement Laboratory 之间) 和 JCSAT-3 卫星 (CRL 与中国科学院国家授时中心即 NTSC、CRL 与日本国家计量研究所即 NRML 之间) 进行时间比对^[3]。现在已有 12 条卫星双向链正式参加国际原子时 (TAI) 的计算, 同期的 GPS 共视法资料作为备用。根据国际计量局 (BIPM) 的建议, 在现有 GPS 共视法的基础上, 希望有条件的国家和地区建立全球的卫星双向比对链^[5]。因此, 今后将有更多的双向比对链参加 TAI 的计算, TWSTT 也将成为最主要的时间比对方法之一。

2 TWSTT 基本原理

TWSTT 的基本原理如图 1 所示。设两个钟 A 和 B 分别在钟面时 T_A 和 T_B 互发时间信号, 经过卫星转发后为对方所接收, 则钟 B 经时延 $\tau_{A \rightarrow B}$ 后在钟面时 T_B' 接收到钟 A 的时间信号, 钟 A 经时延 $\tau_{B \rightarrow A}$ 后在钟面时 T_A' 接收到钟 B 的时间信号。若 A 站将自己记录的接收时刻和传播时延 $\tau_{A \rightarrow B}$ 传播给 B 站, 则 B 站经计算可得到钟 B 相对于钟 A 的钟差, 并由此来调整 B 站的时钟。

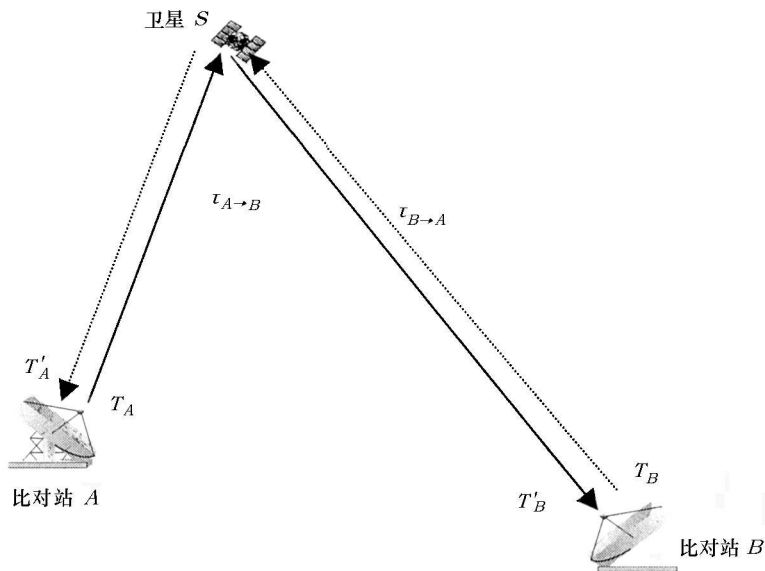


图 1 TWSTT 基本原理

根据上述的基本原理有

$$\begin{cases} R_{BA} = \tau_{A \rightarrow B} + \Delta T_{AB} = \tau_A^U + \tau_B^D + \tau_A^T + \tau_B^R + \tau_S^{AB} + \Delta\tau_{\text{sag}}^{AB} + \Delta T_{AB} \\ R_{AB} = \tau_{B \rightarrow A} - \Delta T_{AB} = \tau_B^U + \tau_A^D + \tau_B^T + \tau_A^R + \tau_S^{BA} + \Delta\tau_{\text{sag}}^{BA} - \Delta T_{AB} \end{cases}, \quad (1)$$

其中, τ_i^U 和 τ_i^D ($i = A$ 或 B) 为第 i 站的上行和下行信号时延, τ_i^T 和 τ_i^R ($i = A$ 或 B) 为第 i 站的发射和接收时延, τ_S^{AB} 和 τ_S^{BA} 为两条链路的卫星转发器时延, $\Delta\tau_{\text{sag}}^{AB}$ 和 $\Delta\tau_{\text{sag}}^{BA}$ 为两条链路 Sagnac 效应引起的时延。

(1) 式中的两式相减有^[4,6,7]

$$\begin{aligned} \Delta T_{BA} = & \frac{1}{2}(R_{BA} - R_{AB}) + \frac{1}{2}[(\tau_B^U + \tau_A^D) - (\tau_A^U + \tau_B^D)] + \\ & \frac{1}{2}(\tau_S^{BA} - \tau_S^{AB}) + \frac{1}{2}[(\tau_B^T + \tau_A^R) - (\tau_A^T + \tau_B^R)] + \Delta\tau_{\text{sag}}, \end{aligned} \quad (2)$$

(2) 式包含了所有引起时延不对称的因素。其中, 右边第 1 项为两站测得的时差之差, 第 2 项为卫星上行和下行信号时延之差, 第 3 项为两条链路的卫星转发器时延之差, 第 4 项为两站设备的发射和接收时延之差, 最后一项为 Sagnac 效应引起的时延改正。

3 误差分析

由 (2) 式可见, 影响 TWSTT 精度的主要因素可分为 3 部分: (1) 设备时延误差; (2) 传播路径时延误差; (3) 卫星和地面站运动引起的误差。下面逐一加以分析。

3.1 设备时延误差

设备时延误差对应于 (2) 式中的第 1 项、第 3 项和第 4 项, 主要包括地面站计数器测量误差、调制解调器误差、卫星转发器时延误差和地面站设备发射与接收时延误差。

(1) 计数器测量误差

地面站之间的时差一般由高精度的计数器测量得到。对于通常的计数器, 其测量误差约为 0.1 ns, 而现代高精度计数器的测量精度已经达到几十 ps^[8]。因此, 该项误差对于纳秒级的精度可以忽略, 但对于 0.1 ns 级的精度不能忽略。

(2) 调制解调器误差

对于 TWSTT, A 站的时间基准秒脉冲 (1 pps) 经调制变成中频 70 MHz, 再由发射天线变成发射频率后传送至卫星, 卫星转发器把信号变成下行频率送至 B 站, B 站接收天线接收后将信号变频为中频 70 MHz, 经终端调制解调器 (MODEM) 解调后得到本地时间基准与 A 站秒脉冲的时刻差。可见, 信号经调制和解调都会产生误差, 因此内部 MODEM 的发射和接收时延差也必须进行准确标定, 具体方法如下^[9]:

1) 并址两个 MODEM, 然后来测量一个 MODEM 的发射时延和另一个 MODEM 的接收时延和;

2) 通过连接每个 MODEM 的 IF 输入和 IF 输出来测量发射和接收时延和, 利用示波器测量发送的 1 pps 和 MODEM 的 IF 相位调制输出信号之间的发射时延。最后, MODEM 的接收时延由上面测量的时延和减去发射时延得到。

对于 TWSTT, 现在国际上采用的 MODEM 主要是 MITREX 和 ATLANTIS 两类, 一般估计其误差约为 30~100 ps^[10]。

(3) 卫星转发器时延误差

在两站间进行时间信号比对时, 都需要先将自己的时间信号发送给卫星, 经卫星转发器转发后再传送到对方比对站。卫星转发器时延主要包括收发天线时延和转发通道时延, 一般约为 20 ns。当卫星收发天线和转发通道对两站的信号完全相同时, 两站间的卫星转发器时延相等, 即 $\tau_S^{BA} = \tau_S^{AB}$ 。但是, 当卫星对每个地面站采用不同的收发频率、不同的转发通道或不同的天线波束时, 两站间的卫星转发器时延并不相等, 例如使用大西洋上的 INTELSAT 时就是这样。在这种情况下, 应该在卫星发射前对 τ_S^{AB} 和 τ_S^{BA} 或者两者的差值 $\tau_S^{BA} - \tau_S^{AB}$ 进行测量, 或者采用其他更精确的时间比对方法加以测量和标定^[9]。当然, 卫星转发器时延经两条路径相减能够较好地消除或削弱, 其误差一般不会超过 80 ps。

(4) 地面站设备发射与接收时延误差

地面站设备发射与接收时延主要包括电缆时延、发射和接收系统随气象 (主要是温度) 的变化误差等。

随着 TWSTT 精度的不断提高, 其误差已经与地面站的设备时延误差达到同一量级, 也就是说, 地面站的设备时延误差已经成为限制 TWSTT 精度进一步提高的最大障碍^[8]。而且, 地面站设备时延误差的产生机制还没有完全弄清, 很多学者倾向于将其归结为设备受温度影响的误差, 但真正原因还有待进一步研究。因此, 该问题受到国内外很多学者的重视, 他们进行了大量的研究和实验^[11~14]。

为了精确测定各项设备的时延值, Hackman 等人^[12]提出了共钟方法。采用该方法测得: 仅有计数器时, 设备时延误差约为 50 ps; 加上调制解调器后, 其误差约为 150 ps; 再经过卫星转发后, 误差约为 330 ps。

为了精确测定设备时延与气象因素的关系, 很多学者做了大量的试验。中国科学院国家授时中心孙宏伟等人^[8]研究指出, 户外单元 (包括发射和接收系统) 与温度的关系最大, 一般温度系数为 $-85 \text{ ps}/^\circ\text{C}$, 整个温度系数约为 $(-100 \pm 30) \text{ ps}/^\circ\text{C}$ 。美国 NIST (National Institute of Standards and Technology) 学者们的结果是^[13], 接收时延温度系数为 $(-150 \pm 10) \text{ ps}/^\circ\text{C}$, 发射延迟温度系数为 $(-50 \pm 10) \text{ ps}/^\circ\text{C}$, 整个温度系数约为 $(-100 \pm 30) \text{ ps}/^\circ\text{C}$ 。该项误差可通过温度控制和对数据的温度补偿得到降低。

地面站发射与接收系统的电缆时延能够事先测定并加以扣除, 其误差一般在 0.2~0.5 ns 之间^[14], 例如: BIPM 提供 NIST 与 PTB (Physikalisch-Technische Bundesanstalt) 之间在 MJD 52276 日的地面站延迟标准偏差为 0.2 ns^[6]。

3.2 传播路径时延误差

传播路径时延误差对应于 (2) 式中的第 2 项, 它是由卫星上行和下行信号路径时延引起的误差, 主要包括传播路径几何延迟误差、电离层时延误差以及对流层时延误差等成分。

(1) 测站和卫星坐标误差

传播路径几何延迟可根据卫星和地面站在归算时刻的坐标计算得到, 其中不对称部分是由于卫星位置随时间不断变化, 而两地面站到卫星的传播时间不同以及两地面站间时间不完全同步引起的。由卫星和地面站运动引起的误差在 3.3 节中有专门分析, 因此这里先不考虑上

述不对称部分的影响。

对于相同的归算时刻, 如果地面站和卫星位置含有误差, 该误差将直接影响卫星与地面站间计算的时延值, 但是由于钟差计算式中存在上、下路径之差, 因此, 经两条路径相减, 该项误差能够消除。也就是说, 在相同的归算时刻和不考虑不对称部分影响的情况下, 地面站和卫星位置误差对计算钟差没有影响。

(2) 电离层延迟误差

电离层延迟一般采用电离层延迟模型进行改正, 它主要与信号频率的平方成反比。对于 TWSTT 每个地面站 i 的上、下行路径, 电离层时延可以采用下式进行改正:

$$\tau_i^{\text{ion}} = \frac{40.28 \text{ TEC}_{iS}}{c} \left(\frac{1}{f_U^2} - \frac{1}{f_D^2} \right), \quad (3)$$

其中, f_U 和 f_D 分别为地面站 i 的上行和下行信号频率, TEC_{iS} 为地面站 i 与卫星间信号传播路径的电离层总电子含量, c 为真空中的光速。

如果信号传播路径的总电子含量 TEC 取为典型值 $1 \times 10^{18}/\text{m}^2$, 对于 TWSTT 中采用的 Ku 波段频率 (上行 $f_U \approx 14.0 \text{ GHz}$, 下行 $f_D \approx 12.0 \text{ GHz}$), 上、下行路径电离层时延之差约为 0.25 ns , 则每个地面站电离层时延对计算相对钟差的影响约为 0.125 ns [6,9]。在短时间内, 地固系中地面站与卫星间的两条信号传播路径基本不变, 所以根据 (2) 式可知, 总的电离层时延对计算结果的影响为

$$\tau^{\text{ion}} = \frac{20.14(\text{TEC}_{AS} - \text{TEC}_{BS})}{c} \left(\frac{1}{f_U^2} - \frac{1}{f_D^2} \right). \quad (4)$$

可见, 经过双向传递, 总的电离层时延的影响由两站电离层时延求差能进一步减小。如果两站间电离层延迟具有 70% 的相关性, 则在总电子含量 TEC 取为典型值的情况下, 总的电离层时延产生的误差约为 37.5 ps 。因此, 电离层时延误差对于 0.1 ns 量级的计算精度可以忽略, 但对 10 ps 量级的计算精度则需要考虑。

(3) 对流层延迟误差

对流层延迟可采用对流层延迟模型进行改正, 常用的有 Hopfield 模型、改进的 Hopfield 模型和 saastamoinen 模型等。各模型之间主要在低高度角时存在差异, 而在天顶方向的差别很小 (一般约为几厘米)。由于对流层延迟在频率高于 20 GHz 时是频率不相关的, 并且每一地面站上、下行链路的时间间隔一般小于 0.3 s , 在这么短的时间内, 地面站的气象参数和地固系中的卫星仰角都基本不变, 因此, 经上、下两条路径相减, 对流层时延能够得到很好的消除, 它引起的不对称部分一般不再考虑 [6,9]。

3.3 卫星和地面站运动引起的误差

卫星和地面站运动引起的误差对应于 (2) 式的最后一项以及第 2 项中的不对称部分, 主要包括两地面站至卫星距离不同引起的误差、两地面站的钟不同步引起的误差和 Sagnac 效应误差。

地球同步卫星在地心地固系中的运动很慢, 其运动速度小于 10 m/s [15], 下面就在此情况下进行讨论。

(1) 两站到卫星的距离不等引起的误差

在 TWSTT 的实际操作中, 为了减小误差, 往往要求卫星接收两站发射信号的时间尽量相同。但是, 由于卫星在地固系中的运动、相对钟差的存在以及两站相对卫星不一定能保持对称, 这一条件并不一定能满足。为了减小不对称带来的影响, 地面站一般通过轻微调整发射时延 ($< 17 \text{ ms}$) 来进行补偿。当采用该方法后仍不能补偿时, 这一影响必须加以改正^[9]。

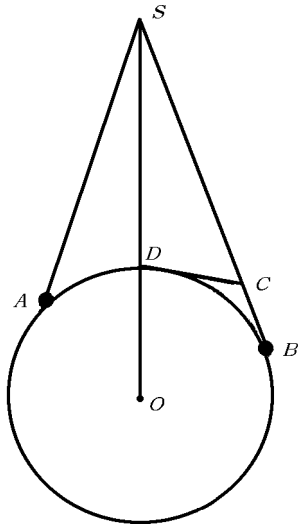


图2 两地面站到卫星之间的距离差 (2) 两站钟面时不同步引起的误差

因为两地面站的钟是不完全同步的, 所以两信号的发射时间不同, 这也将导致一定的误差, 但很容易用一般方法把两个钟事先粗同步在 $10 \mu\text{s}$ 内。对于参加 TWSTT 的站, 它们事先已经同步到很高的精度 (一般小于 $1 \mu\text{s}$), 所以, 仅由于两站间钟面时的不同步 (取为 $1 \mu\text{s}$) 引起的卫星位置变化约在 10^{-5} m , 换算为时间约在 10^{-14} 量级, 完全可以忽略。

(3) Sagnac 效应误差

Sagnac 效应是由于采用了随地球旋转的坐标系引起的, 地球自转使得地固系成为一个非惯性系, 它导致空间传播路径发生变化, 该项可表示为^[6,15]

$$\Delta\tau_{\text{sag}} = \frac{-\omega E}{c^2}, \quad (5)$$

其中, c 为光速, ω 为地球自转角速度, E 是卫星、地心和两测站连线构成的多边形在赤道面上投影所围成的面积, 即

$$E = [Y_S (X_A - X_B) - X_S (Y_A - Y_B)], \quad (6)$$

式中, (X_S, Y_S) 为卫星在地固系中的坐标, (X_i, Y_i) ($i=A$ 或 B) 为第 i 站在地固系中的坐标。

如果在两地面站建设时考虑了上面第一项因素的影响, 并且两地面站事先也已经同步到很高的精度, 那么前面两项的影响就可以忽略。在此情况下, 卫星和地面站位置含有的误差仅将引起 $\Delta\tau_{\text{sag}}$ 的误差。假设 $\Delta\tau_{\text{sag}}$ 具有最大值 (两地面站处于赤道上并且经度相差 90°), 由 $\Delta\tau_{\text{sag}}$ 的表达式可以估计, 卫星位置含有 1000 m 误差时, $\Delta\tau_{\text{sag}}$ 的计算误差约为 7 ps 。在当前 TWSTT 提供的数据中, 卫星的大地坐标 L 精确到 $1'$, 即误差约 $0.5'$, 在赤道面上换

算为距离误差约为 7000 m, 则即使全部转化为 $\Delta\tau_{\text{sag}}$ 的计算误差, 该项误差最大影响仅约为 50 ps。当地面站位置均含有 1000 m 的误差时, $\Delta\tau_{\text{sag}}$ 的计算误差约为 100 ps。地面站位置误差一般好于 10 m, 由此引起的 $\Delta\tau_{\text{sag}}$ 误差约为 1 ps。因此, 目前 TWSTT 的计算精度约在 0.1 ns 量级。随着比对精度的提高, 要求精度为 10 ps 时, 卫星位置误差必须限制在 1400 m 以内。

表 1 列出了上述各误差源对 TWSTT 的影响。

表 1 各误差源对 TWSTT 的影响

误差源		影响量级 /ps	TWSTT 精度量级		
			1 ns	0.1 ns	10 ps
设备时延误差	调制解调器	30~100	可忽略	不可忽略	不可忽略
	计数器	100	可忽略	不可忽略	不可忽略
	地面发射和接收设备	200~500	可忽略	不可忽略	不可忽略
	卫星转发器	80	可忽略	可忽略	不可忽略
路径延迟误差	电离层延迟	37.5	可忽略	可忽略	不可忽略
	对流层延迟	0	可忽略	可忽略	可忽略
卫星和地面站运动误差	两站到卫星距离 300 km	30	可忽略	可忽略	不可忽略
	两站时间不同步 (1 μs)	0.03	可忽略	可忽略	可忽略
	卫星位置误差 7 km	50	可忽略	可忽略	不可忽略
	地面站位置误差 10 m	1	可忽略	可忽略	可忽略

4 结 论

TWSTT 是一种高精度的时间比对技术, 目前已应用于 BIPM 计算 TAI 中。BIPM 建议, 有条件的守时实验室要建立更多的 TWSTT 时间比对链来参加 TAI 的计算, 以代替现有的 GPS 共视法。可见, 不久的将来, TWSTT 技术将代替 GPS 共视法而成为最主要的时间比对方法。

影响 TWSTT 精度的主要误差源为设备时延误差和路径传播时延误差, 而由卫星和地面站运动引起的误差相对较小。在纳秒量级的时间比对中, 各误差源不需要特别考虑, 准确地测得设备时延和采用现有的改正模型进行计算即可。在 0.1 ns 量级的时间比对中, 需要考虑的误差源主要有调制解调器误差、计数器误差、地面发射与接收设备误差和电离层延迟改正误差。其中, 调制解调器和地面发射与接收设备时延需要更准确地测定, 计数器误差则可采用更高分辨率的计数器来减小。随着比对精度的提高, 要求精度为 10 ps 量级时, 除了上面几种误差源需要进一步减小外, 电离层延迟改正误差也必须考虑在内, 另外还涉及两站到卫星的距离不等引起的误差和卫星位置误差的影响。

参考文献:

- [1] 韩春好. 天文学进展, 2002, 20(2): 107
- [2] 李志刚, 李焕信, 张虹. 天文学报, 2002, 43(4): 422
- [3] 王正明, 高俊法. 天文学进展, 2000, 18(3): 181
- [4] 惠卫华, 李焕信. 陕西天文台台刊, 2001, 24(2): 115
- [5] 王正明. 2003年全国时频年会论文集, 贵阳, 2003: 16
- [6] Recommendation ITU-R TF. 1153-1. 1995-1997
- [7] Hanson D W. 1989 IEEE Freq. Cont. Symp., 1989: 174
- [8] 孙宏伟, 李志刚, 李焕信等. 宇航计测技术, 2001, 21(2): 9
- [9] Recommendation ITU-R TF. 1153-2. 1995-1997-2003
- [10] Lewandowski W. The 9th meeting of CCTF, Xi'an, 2001
- [11] Ascarrunz F G, Jefferts S R, Parker T E. IEEE CPEM 1996 Conf. Dig., 1996: 518
- [12] Hackman C, Jefferts S R, Parker T E. IEEE Intl. Freq. Cont. Symp., 1995: 275
- [13] Jefferts S R, Weiss M A, Levine J *et al.* IEEE Trans. Instrum. Meas., 1997, 46: 205
- [14] Ascarrunz F G, Jefferts S R, Parker T E. IEEE Intl. Freq. Cont. Symp., 1998: 250
- [15] Petit G, Wolf P. A&A, 1994, 286: 971

Two Way Satellite Time Transfer and its Error Analysis

LIU Li¹, HAN Chun-hao²

(1. *Institute of Surveying and Mapping, Information Engineering University, Zhengzhou 450052, China*; 2. *Institute of Geodesy and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430077, China*)

Abstract: In this paper, the development process and the basic theory of Two Way Satellite Time Transfer (TWSTT) are introduced. Then the error sources of TWSTT are discussed, and the influence of the error sources to the transfer accuracy is analyzed. The results show that the equipment delay error and the propagation delay error are the major error sources in the TWSTT, but the errors which caused by motion of the earth stations and the satellite are small. At last, in the difference transfer accuracy, we give the results that what error sources must be considered and what accuracy of the error sources must be achieved.

Key words: astrometry; Two Way Satellite Time Transfer (TWSTT); review; Time; Error