第 50 卷 第 2 期 天 文 学 报 Vol.50 No.2
2009 年 4 月 ACTA ASTRONOMICA SINICA Apr., 2009

星地无线电双向时间比对模型及试验分析

刘 利[1,2†] 朱陵凤[1] 韩春好[1,2] 刘晓萍[1] 李 超[1]

(1 北京 5136 信箱 北京 100094)
(2 中科院上海天文台 上海 200030)

摘要 星地时间同步是卫星导航系统的一个关键技术，是实现卫星导航定位的基础。针对星地时间同步问题，讨论了一种星地无线电双向时间比对方法，详细推导了该方法中星地上下行伪距的归算模型，给出了星地钟差的实用计算模型．该方法通过上下行伪距求差，消除了对流层延迟、卫星星历误差和地面站站址坐标误差等共有误差影响，与信号频率有关的电离层延迟也被很大程度地削弱，从而大大提高了时间比对精度．最后，利用实测数据进行了试验分析，结果表明：星地无线电双向时间比对精度能够达到约 0.34ns, 验证了理论方法和模型的正确性．

关键词 时间，技术：其它诸多方面
中图分类号： P 123; **文献标识码**： A

1 引言

伪距是卫星导航的基本观测量，而伪距是通过测量信号传播时间乘以光速得到的，即 1 微秒的时间测量误差意味着 300 米的测距误差，因此，建立和维持高精度的时间基准是卫星导航定位的基础，可以说，没有高精度的时间基准，就不可能实现高精度的卫星导航与定位 [1,2].

不同时间信号之间的比对称为时间比对．经过时间比对，不同时钟之间就可以完成时间同步．远距离高精度的时间比对不仅是异地实验室时间比对和国际原子时 (TAI) 保持的需要，而且是卫星导航系统高精度系统时间建立与保持的需要．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方的地面实验室、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 [2].

随着卫星技术和通讯技术的发展, 原来的时间比对方法逐步被卫星时间比对所代替．基于卫星导航系统，最早发展起来的时间比对技术是 GPS 单向时间比对，但是 GPS 单向法只能达到约 20ns 的精度，不能满足现代实验室之间高精度时间比对的需要．在此基础上，人们提出了 GPS 共视法 [3]. 共视法能够使两站间的共同误差得到消除或削弱，因此大大提高了时间比对精度 [3−5]. 从 1995 年开始， BIPM 在国际原子时计算时就开始采用 GPS 共视结果， GPS 共视目前已经成为国际原子时系统最主要的时间比对手段．

2008-04-22 收到原稿， 2008-05-29 收到修改稿

† liuli_cy@sohu.com

最早进行的 GPS 共视采用的是 GPS 单通道 C/A 码，为了与原子频标的发展相适应，近年来， GPS C/A 码多通道时间比对、 GPS P 码时间比对、 GLONASS P 码时间比对和 GPS 载波相位时频比对等技术应运而生 [6,7]. 另外，有人提出了 GPS/GLONASS 一体化共视比对方法 [8], 也有人提出将测地型 GPS 接收机用于时间比对 [9], 还有人进行了激光时间比对试验 [10], 都取得了很好的结果.

本文针对卫星导航系统星地时间比对问题，探讨了一种星地无线电双向时间比对方法，并结合实测数据进行了试验分析.

2 基本定义

钟差是指同一时刻两台钟的钟面时之差. 一台原子钟与系统时间的钟差 $\Delta T(t)$ 可定义为

$$\Delta T(t) \equiv T(t) - t\,, \tag{1}$$

其中： $T(t)$ 为钟面时； t 为系统时间. 如无特殊说明，本文中的 T 均表示钟面时，t 均表示系统时间.

如果将 A 、 B 两个观测者携带的两台原子钟的相对钟差 (记为 $\Delta T_{\rm AB}\,(t)$) 定义为同一系统时间的钟面时之差，即

$$\begin{aligned} \Delta T_{\rm AB}\,(t) &\equiv T_{\rm B}\,(t) - T_A\,(t) \\ &= \Delta T_{\rm B}\,(t) - \Delta T_{\rm A}\,(t)\,, \end{aligned} \tag{2}$$

其中： $T_{\rm A}\,(t)$ 、 $\Delta T_{\rm A}\,(t)$ 和 $T_{\rm B}\,(t)$ 、 $\Delta T_{\rm B}\,(t)$ 分别为 A 、 B 两个观测者在同一系统时间 t 的钟面时和钟差.

伪距可以定义为信号的本地接收时刻 (本地钟面时) 与信号所携的表征时间值之差. 设信号由 A 站发射， B 站接收，则伪距 $\rho'_{\rm AB}$ 可以表示为：

$$\rho'_{\rm AB}(T_{\rm B}) \equiv c\,(T_{\rm B}\,(t_{\rm B}) - T_{\rm A}(t^e_{\rm A}))\,. \tag{3}$$

式中， $T_{\rm A}(t^e_{\rm A})$ 为 A 站 $t^e_{\rm A}$ 时刻发射信号 (伪噪声码) 的表征时间值； $T_{\rm B}\,(t_{\rm B})$ 为 B 站接收该信号时的本地钟面时刻.

3 基本原理

如图 1 所示，星地无线电双向法的基本原理是：卫星 S 和地面站 k 分别在本地钟的控制下产生并发播伪码测距信号，地面站 k 在本地 1pps 对应的钟面时 $T_{\rm k}\,(t_0)$ 时刻观测得到下行伪距 $\rho'_{\rm Sk}\,(t_0)$(该伪距中含有负的卫星钟差), 卫星 S 在本地 1pps 对应的钟面时 $T_{\rm S}\,(t_1)$ 时刻观测得到上行伪距 $\rho'_{\rm kS}\,(t_1)$(该伪距中含有正的卫星钟差), 同时，卫星将自己的上行伪距观测值通过通信链路发送给地面站 k, 地面站 k 利用本地测量的下行伪距和接收到的上行伪距求差，就能得到卫星相对于地面站 k 的钟差，从而完成星地之间的时间比对.

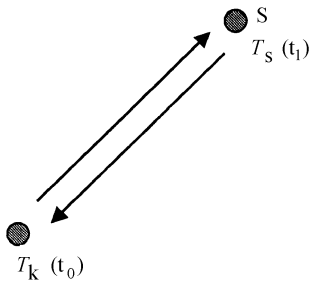

图 1　星地无线电双向时间比对原理图

Fig. 1　The theory map of two-way radio time transfer between the earth and satellites

对于卫星与地面站之间的时间比对，需要计算的是卫星钟差，这时一般将地面站钟作为参考，即地面站钟差已知或 $\Delta T_{\mathrm{k}}(t)=0$. 因此，对于下行伪距，根据无线电时间比对的基本原理有 [2].

$$\Delta T_{\mathrm{S}}(t_0)=\frac{1}{c}\left[\rho_{\mathrm{Sk}}^{geo}(t_0)-\rho'_{\mathrm{Sk}}(t_0)\right]+\Delta\tau'_{\mathrm{Sk}}\,, \tag{4}$$

其中：$\Delta T_{\mathrm{S}}(t_0)$ 为下行伪距观测时刻 t_0 对应的卫星钟差，$\rho_{\mathrm{Sk}}^{geo}(t_0)$ 为信号由卫星传播到地面站 k 的空间距离，$\rho'_{\mathrm{Sk}}(t_0)$ 为地面站 k 在 t_0 时刻观测的伪距，$\Delta\tau'_{\mathrm{Sk}}$ 为信号由卫星传播到地面站 k 的路径上地球自转、引力时延、大气时延和设备时延等引起的时间延迟改正. 同理，对于上行伪距可以表示为

$$\Delta T_{\mathrm{S}}(t_1)=\frac{1}{c}\left[\rho'_{\mathrm{kS}}(t_1)-\rho_{\mathrm{kS}}^{geo}(t_1)\right]-\Delta\tau'_{\mathrm{kS}}\,, \tag{5}$$

其中：$\Delta T_{\mathrm{S}}(t_1)$ 为上行伪距观测时刻 t_1 对应的卫星钟差，$\rho_{\mathrm{kS}}^{geo}(t_1)$ 为信号由地面站 k 传播到卫星的空间距离，$\rho'_{\mathrm{kS}}(t_1)$ 为卫星在 t_1 时刻观测的伪距，$\Delta\tau'_{\mathrm{kS}}$ 为信号由地面站 k 传播到卫星的路径上地球自转、引力时延、大气时延和设备时延等引起的时间延迟.

根据星地无线电双向时间比对的基本原理有

$$\Delta T_{\mathrm{S}}(t_0)+\Delta T_{\mathrm{S}}(t_1)=\frac{1}{c}\left[\rho_{\mathrm{Sk}}^{geo}(t_0)-\rho'_{\mathrm{Sk}}(t_0)\right]+\Delta\tau'_{\mathrm{Sk}}-\frac{1}{c}\left[\rho_{\mathrm{kS}}^{geo}(t_1)-\rho'_{\mathrm{kS}}(t_1)\right]-\Delta\tau'_{\mathrm{kS}}\,, \tag{6}$$

可见，为了准确的求得星地钟差，必须详细计算上式中的信号传播空间距离及各项时延改正.

4　计算模型

4.1　下行伪距归算模型

可以推导，在地心非旋转坐标系中有 [2,11,12]

$$\Delta T_{\mathrm{S}}(t_0)=\frac{1}{c}\left\{\rho_{\mathrm{Sk}}+\frac{\vec{\rho}_{\mathrm{Sk}}\cdot\dot{\vec{x}}_{\mathrm{S}}}{c}+\frac{\rho_{\mathrm{Sk}}}{2c^2}\left[\dot{\vec{x}}_{\mathrm{S}}^{\,2}+\vec{\rho}_{\mathrm{Sk}}\cdot\ddot{\vec{x}}_{\mathrm{S}}+\frac{\left(\vec{\rho}_{\mathrm{Sk}}\cdot\dot{\vec{x}}_{\mathrm{S}}\right)^2}{\rho_{\mathrm{Sk}}^2}\right]-\rho'_{\mathrm{Sk}}(t_0)\right\}+\Delta\tau'_{\mathrm{Sk}}\,, \tag{7}$$

其中： ρ_{Sk} 为 t_0 时刻地面站 k 接收天线中心到卫星 S 发射天线中心的几何距离，可以进一步表示为

$$\rho_{\mathrm{Sk}}\left(t_0\right)\equiv\left|\vec{x}_{\mathrm{k}}\left(t_0\right)-\vec{x}_{\mathrm{S}}\left(t_0\right)\right|, \tag{8}$$

$\vec{x}_{\mathrm{k}}\left(t_0\right)$ 、 $\vec{x}_{\mathrm{S}}\left(t_0\right)$ 分别为 t_0 时刻地面站 k 和卫星 S 在地心非旋转坐标系的坐标， $\vec{\rho}_{\mathrm{Sk}}$ 为 t_0 时刻卫星 S 到地面站 k 的空间矢量， $\dot{\vec{x}}_{\mathrm{S}}$ 、 $\ddot{\vec{x}}_{\mathrm{S}}$ 分别为 t_0 时刻卫星 S 在地心非旋转坐标系的速度和加速度.

在地固系中，如果只考虑到卫星速度 1 次幂有

$$\Delta T_{\mathrm{S}}\left(t_0\right)=\frac{1}{c}\left[P_{\mathrm{Sk}}+\frac{\vec{P}_{\mathrm{Sk}}\cdot\dot{\vec{X}}_{\mathrm{S}}\left(t_0\right)}{c}+\frac{\omega}{c}\left(X_{\mathrm{S}}Y_{\mathrm{k}}-X_{\mathrm{k}}Y_{\mathrm{S}}\right)-\rho'_{\mathrm{Sk}}\left(t_0\right)\right]+\Delta\tau'_{\mathrm{Sk}}, \tag{9}$$

其中： $\vec{P}_{\mathrm{Sk}}$ 为 t_0 时刻地面站 k 和卫星 S 在地固系中的空间矢量， $P_{\mathrm{Sk}}=\left|\vec{P}_{\mathrm{Sk}}\right|$ 为 $\vec{P}_{\mathrm{Sk}}$ 的模， $\dot{\vec{X}}_{\mathrm{S}}\left(t_0\right)$ 为 t_0 时刻卫星 S 在地固系的速度矢量， ω 为地球自转角速度， X_{k} 、 Y_{k} 分别为 t_0 时刻地面站 k 在地固系 X 和 Y 方向的坐标分量， X_{S} 、 Y_{S} 为对应 t_0 时刻卫星 S 的坐标分量.

结合上式并考虑到地球自转、引力时延、大气延迟以及设备时延等改正项有

$$\begin{aligned}\Delta T_{\mathrm{S}}\left(t_0\right) &= \frac{1}{c}\left[P_{\mathrm{Sk}}+\frac{\vec{P}_{\mathrm{Sk}}\cdot\dot{\vec{X}}_{\mathrm{S}}\left(t_0\right)}{c}+\frac{\omega}{c}\left(X_{\mathrm{S}}Y_{\mathrm{k}}-X_{\mathrm{k}}Y_{\mathrm{S}}\right)-\rho'_{\mathrm{Sk}}\left(t_0\right)\right]\\ &\quad+\tau^{\omega}_{\mathrm{Sk}}+\tau^{G}_{\mathrm{Sk}}+\tau^{ion}_{\mathrm{Sk}}+\tau^{tro}_{\mathrm{Sk}}+\tau^{e}_{\mathrm{S}}+\tau^{r}_{\mathrm{k}},\end{aligned} \tag{10}$$

其中： $\tau^{\omega}_{\mathrm{Sk}}$ 、 τ^{G}_{Sk} 、 τ^{ion}_{Sk} 、 τ^{tro}_{Sk} 、 τ^{e}_{S} 、 τ^{r}_{k} 分别为信号由卫星传播到地面站 k 路径上的地球自转时延改正、引力时延、电离层延迟、对流层延迟、卫星发射设备延迟和地面站接收设备延迟.

上式即为下行伪距在地固系中的实用归算模型.

4.2 上行伪距归算模型

同理，在地心非旋转坐标系中有

$$\Delta T_{\mathrm{S}}\left(t_1\right)=\frac{1}{c}\left\{\rho'_{\mathrm{kS}}\left(t_1\right)-\rho_{\mathrm{kS}}-\frac{\vec{\rho}_{\mathrm{kS}}\cdot\dot{\vec{x}}_{\mathrm{k}}}{c}-\frac{\rho_{\mathrm{kS}}}{2c^2}\left[\dot{\vec{x}}_{\mathrm{k}}^{\,2}+\vec{\rho}_{\mathrm{kS}}\cdot\ddot{\vec{x}}_{\mathrm{k}}+\frac{\left(\vec{\rho}_{\mathrm{kS}}\cdot\dot{\vec{x}}_{\mathrm{k}}\right)^2}{\rho^2_{\mathrm{kS}}}\right]\right\}-\Delta\tau'_{\mathrm{kS}}, \tag{11}$$

其中： ρ_{kS} 为 t_1 时刻地面站 k 发射天线中心到卫星 S 接收天线中心的几何距离和几何距离改正，可以进一步表示为

$$\rho_{\mathrm{kS}}\equiv\left|\vec{x}_{\mathrm{S}}\left(t_1\right)-\vec{x}_{\mathrm{k}}\left(t_1\right)\right| \tag{12}$$

$\vec{x}_{\mathrm{k}}(t_1)$、$\vec{x}_{\mathrm{S}}(t_1)$ 分别为 t_1 时刻地面站 k 和卫星 S 在地心非旋转坐标系的坐标，$\vec{\rho}_{\mathrm{kS}}$ 为 t_1 时刻地面站 k 到卫星 S 的空间矢量，$\dot{\vec{x}}_{\mathrm{k}}$、$\ddot{\vec{x}}_{\mathrm{k}}$ 分别为 t_1 时刻地面站 k 在地心非旋转坐标系的速度和加速度.

同理，在地固系中，如果只考虑到地面站速度 1 次幂有

$$\Delta T_{\mathrm{S}}(t_1)=\frac{1}{c}\left[\rho'_{\mathrm{kS}}(t_1)-P_{\mathrm{kS}}-\frac{\vec{P}_{\mathrm{kS}}\cdot\dot{\vec{X}}_{\mathrm{k}}(t_1)}{c}-\frac{\omega}{c}\left(X_{\mathrm{k}}Y_{\mathrm{S}}-X_{\mathrm{S}}Y_{\mathrm{k}}\right)\right]-\Delta\tau'_{\mathrm{kS}}\,, \tag{13}$$

其中：$\vec{P}_{\mathrm{kS}}$ 为 t_1 时刻地面站 k 和卫星 S 在地固系中的空间矢量，$P_{\mathrm{kS}}=\left|\vec{P}_{\mathrm{kS}}\right|$ 为 $\vec{P}_{\mathrm{kS}}$ 的模，$\dot{\vec{X}}_{\mathrm{k}}(t_1)$ 为 t_1 时刻地面站 k 在地固系的速度矢量，X_{k}、Y_{k} 分别为 t_1 时刻地面站 k 在地固系 XY 方向的坐标分量，X_{S}、Y_{S} 分别为 t_1 时刻卫星 S 在地固系 XY 方向的坐标分量.

对于第二项，由于地面站在地固系中的运动速度很小，因此，该项可以忽略，上式可以简化为

$$\Delta T_{\mathrm{S}}(t_1)=\frac{1}{c}\left[\rho'_{\mathrm{kS}}(t_1)-P_{\mathrm{kS}}-\frac{\omega}{c}\left(X_{\mathrm{k}}Y_{\mathrm{S}}-X_{\mathrm{S}}Y_{\mathrm{k}}\right)\right]-\Delta\tau'_{\mathrm{kS}}\,, \tag{14}$$

同样，考虑到地球自转、引力时延、大气延迟以及设备时延等改正项有

$$\Delta T_{\mathrm{S}}(t_1)=\frac{1}{c}\left[\rho'_{\mathrm{kS}}(t_1)-P_{\mathrm{kS}}-\frac{\omega}{c}\left(X_{\mathrm{k}}Y_{\mathrm{S}}-X_{\mathrm{S}}Y_{\mathrm{k}}\right)\right]-\tau^{\omega}_{\mathrm{kS}}-\tau^{G}_{\mathrm{kS}}-\tau^{ion}_{\mathrm{kS}}-\tau^{tro}_{\mathrm{kS}}-\tau^{e}_{\mathrm{k}}-\tau^{r}_{\mathrm{S}}\,. \tag{15}$$

其中：$\tau^{\omega}_{\mathrm{kS}}$、$\tau^{G}_{\mathrm{kS}}$、$\tau^{ion}_{\mathrm{kS}}$、$\tau^{tro}_{\mathrm{kS}}$、$\tau^{e}_{\mathrm{k}}$、$\tau^{r}_{\mathrm{S}}$ 分别为信号由地面站 k 传播到和卫星路径上的地球自转时延改正、引力时延、电离层延迟、对流层延迟、地面站发射设备延迟和卫星接收设备延迟.

上式就是上行伪距在地固系中的实用归算模型.

4.3 钟差计算模型

由于原子钟不可避免地存在频率准确度偏差，也就是说，钟差也是时间的函数，不同时间的钟差结果会存在差异，而上面推导得到的上行伪距计算模型对应的时间与下行伪距时间不一致，因此，为得到真实的星地钟差值，需要对其中的至少一个伪距计算模型进行不同时刻归算. 考虑到星地时间同步的参考钟为地面钟，即下行伪距的观测时刻与系统时间相一致，所以需要对上行伪距观测值进行时间归算. 上述伪距归算涉及到计算 $\dot{\rho}'_{\mathrm{kS}}(t_0)$ 和 $\ddot{\rho}'_{\mathrm{kS}}(t_0)$, 而 $\dot{\rho}'_{\mathrm{kS}}(t_0)$ 和 $\ddot{\rho}'_{\mathrm{kS}}(t_0)$ 的计算又涉及卫星和地面站坐标及其偏导数，计算过程比较复杂，为此，下面给出一种相对简单又能保证计算精度的计算模型.

考虑到

$$\Delta T_{\mathrm{S}}(t_1)\approx\Delta T_{\mathrm{S}}(t_0)+R_{\mathrm{S}}\cdot(t_1-t_0)\,, \tag{16}$$

其中：R_{S} 为卫星钟的钟速.

如果忽略大气时延和设备时延等引起的上下行时间不一致影响，则 $t_1-t_0\approx\Delta T_{\mathrm{S}}$, 那么 (6) 式可以表示为

$$2\Delta T_{\mathrm{S}}(t_0)+R_{\mathrm{S}}\cdot\Delta T_{\mathrm{S}}(t_0)=\frac{1}{c}\left[\rho^{geo}_{\mathrm{Sk}}(t_0)-\rho'_{\mathrm{Sk}}(t_0)\right]+\Delta\tau'_{\mathrm{Sk}}-\frac{1}{c}\left[\rho^{geo}_{\mathrm{kS}}(t_1)-\rho'_{\mathrm{kS}}(t_1)\right]-\Delta\tau'_{\mathrm{kS}}\,, \tag{17}$$

由于导航卫星星载原子钟的频率准确度一般均好于 1×10^{-10}, $\Delta T_{\rm S}$ 也会控制在 1ms 之内，因此，通常情况下可以近似认为 $\Delta T_{\rm S}\left(t_1\right)\approx\Delta T_{\rm S}\left(t_0\right)$. 在此近似下，即使钟差接近 1s, 产生的误差一般也不会超过 0.1ns.

综上分析，在 0.1ns 精度范围内，(17) 式可以表示为

$$\Delta T_{\rm S}\left(t_0\right)\approx\frac{1}{2c}\left[\rho_{\rm Sk}^{geo}\left(t_0\right)-\rho'_{\rm Sk}\left(t_0\right)\right]-\frac{1}{2c}\left[\rho_{\rm kS}^{geo}\left(t_1\right)-\rho'_{\rm kS}\left(t_1\right)\right]+\frac{1}{2}\left(\Delta\tau'_{\rm Sk}-\Delta\tau'_{\rm kS}\right), \quad (18)$$

在地固系中，考虑到地球自转、引力时延、大气延迟及设备时延等改正项有

$$\begin{aligned}\Delta T_{\rm S}\left(t_0\right) &= \frac{1}{2c}\left[P_{\rm Sk}+\frac{\vec{P}_{\rm Sk}\cdot\dot{\vec{X}}_{\rm S}\left(t_0\right)}{c}+\frac{\omega}{c}(X_{\rm S}Y_{\rm k}-X_{\rm k}Y_{\rm S})-\rho'_{\rm SK}(t_0)\right]\\ &-\frac{1}{2c}\left[P_{\rm kS}+\frac{\omega}{c}\left(X_{\rm k}Y_{\rm S}-X_{\rm S}Y_{\rm k}\right)-\rho'_{\rm kS}\left(t_1\right)\right]+\frac{1}{2}\left(\tau_{\rm Sk}^{G}-\tau_{\rm kS}^{G}\right)\\ &+\frac{1}{2}\left(\tau_{\rm Sk}^{\omega}-\tau_{\rm kS}^{\omega}\right)+\frac{1}{2}\left(\tau_{\rm Sk}^{ion}-\tau_{\rm kS}^{ion}\right)+\frac{1}{2}\left(\tau_{\rm Sk}^{tro}-\tau_{\rm kS}^{tro}\right)+\frac{1}{2}\left(\tau_{\rm S}^{e}+\tau_{\rm k}^{r}-\tau_{\rm k}^{e}-\tau_{\rm S}^{r}\right). \quad (19)\end{aligned}$$

其中各符号含义同前.

由于上下行信号的传播路径基本相同，因此，经过双向求差，一些公共误差源 (如：对流层延迟、卫星星历误差和地面站站址坐标误差等) 的影响可以得到基本消除，与信号频率有关的电离层延迟也被很大程度地削弱，从而使时间比对精度得到很大提高.

5 试验分析

2007 年 10 月 25 日 —11 月 8 日共 15 天，我们利用北京站观测 MEO 卫星的 15 个弧段，在北京站和卫星同时进行星地无线电时间比对观测，并将卫星观测数据下传给北京站，在认为北京站钟差为 0 的情况下，利用这些星地双向时间比对数据进行了卫星钟钟差解算，得到的计算结果如下图所示.

根据上面 15 个观测弧段观测数据计算的星地钟差，在假设每个时刻计算的星地钟差独立等精度前提下，每个观测弧段采用最小二乘法求解钟差和钟速两个参数，并统计每个弧段计算的中误差，结果如下表.

可见, 上面 15 个观测弧段的中误差最大为 0.586ns, 最小为 0.133ns, 平均值为 0.344ns, 说明星地无线电双向时间比对具有很高的比对精度.

6 结束语

根据以上讨论，可以得出以下几点结论：

(1) 星地时间比对技术是导航卫星与地面站之间实现时间同步的基础，可以说，没有高精度的时间比对，就不可能实现高精度的导航定位.

(2) 理论分析表明，星地无线电双向时间比对消除了对流层延迟、卫星星历误差和地面站站址坐标误差等一些共有误差源的影响，与信号频率有关的电离层延迟也被很大程度地削弱，从而大大提高了时间比对精度.

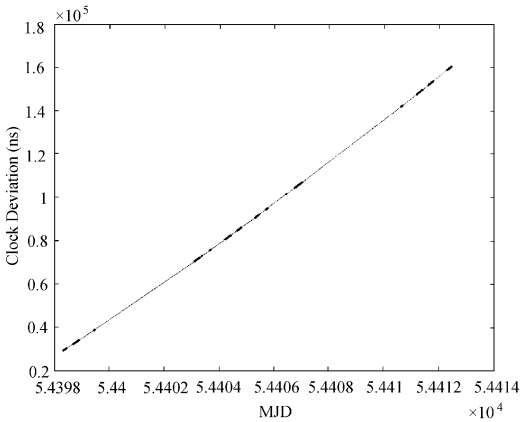

图 2　北京站与 MEO 卫星无线电双向时间比对结果

Fig. 2　Results of Two-way Radio Time Transfer between the Beijing station and MEO Satellites

表 1　每个观测弧段统计的中误差

Table 1　Mean square error in each observing pass

serial number	pass time	$a0$(ns)	$a1$(ns/s)	mean square error(ns)
1.	10 月 25 日弧段 1	30461.26	0.0960	0.2957
2.	10 月 25 日弧段 2	34155.99	0.0971	0.3515
3.	10 月 26 日弧段 1	38823.96	0.0974	0.2130
4.	10 月 30 日弧段 1	72824.67	0.1042	0.5175
5.	10 月 30 日弧段 2	75788.96	0.1052	0.1331
6.	10 月 31 日弧段 1	82510.19	0.1056	0.3885
7.	10 月 31 日弧段 2	85982.16	0.1067	0.5540
8.	11 月 1 日弧段 1	91996.61	0.1072	0.4218
9.	11 月 1 日弧段 2	94876.13	0.1084	0.3290
10.	11 月 2 日弧段 1	101407.58	0.1089	0.1481
11.	11 月 2 日弧段 2	106812.73	0.1099	0.5859
12.	11 月 6 日弧段 2	142406.67	0.1160	0.1421
13.	11 月 7 日弧段 1	149795.44	0.11641	0.3278
14.	11 月 7 日弧段 2	153625.37	0.1174	0.3282
15.	11 月 8 日弧段 1	160354.88	0.1181	0.4285
16.	平均值			0.3443

(3) 利用 2007 年 10 月 25 日 —11 月 8 日 15 个观测弧段, 北京站与 MEO 卫星无线电双向时间比对数据进行了计算分析，结果表明： 15 个观测弧段的中误差最大为 0.586ns, 最小为 0.133ns, 平均值为 0.344ns. 从而验证了理论模型的正确性.

参 考 文 献

1　许其凤. GPS 卫星导航与精密定位. 北京：解放军出版社， 1994

2　刘利. 相对论时间比对与高精度时间同步技术. 郑州：解放军信息工程大学， 2004

3 Allan D W, Weiss M A. Accurate Time and Frequency Transfer During Common-View of a GPS Satellite. In: Proceedings of Frequency Control Symposium, 1980. 334
4 Decher R, Allan D W, Alley C O, et al. A Space System for High-Accuracy Global Time and Frequency Comparison of Clocks. In: Proceedings of Precise Time and Time Interval Systems and Applications Meeting, 1980. 99
5 Weiss M A. Weighting and Smoothing of Data in GPS Common View Time Transfer. In: Proceedings of Precise Time and Time Interval Systems and Applications Meeting, 1985. 261
6 Plumb J. Carrier Phase Time Transfer Using Global Positioning System. Colorado: University of Colorado, 2003
7 王正明，高俊法．高精度国际时间比对的进展．天文学进展， 2000, 18: 181
8 王正明，董绍武． CSAO 多通道 GPS/GLONASS 接收机试运行结果．陕西天文台台刊， 2001, 24: 106
9 Defraigne P, Petit G, Bruyninx C. Use of geodetic receivers for TAI. In: Proceedings of Precise Time and Time Interval Systems and Applications Meeting, 2001. 341
10 李鑫．高精度激光时间传递技术的研究．上海：中科院上海天文台， 2003
11 Klioner S A. the problem of clock synchronization: A relativistic approach. Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy, 1992, 53: 81
12 Petit G, Wolf P. Relativistic theory for picosecond time transfer in the vicinity of the Earth. A&A, 1994, 286: 971

The Model of Two-way Radio Time Transfer between the Earth and Satellites and Analysis of its Experiment

LIU Li[1,2] ZHU Ling-feng[1] HAN Chun-hao[1,2] LIU Xiao-ping[1] LI Chao[1]
(1 *P.O.Box 5136, Beijing 100094*)
(2 *Shanghai Astronomical Observatory Chinese Academy of Science, Shanghai 200030*)

Abstract Time synchronization between the earth and satellites is the key technology in a satellite navigation system, and is the foundation of satellite navigation and positioning. Aiming at solving the problems in time synchronization, a method of time transfer between the earth and satellites was discussed, the reduction model of satellite-earth two way pseudorange was deduced, and a practical calculation model of clock offset between the earth and satellites was presented. In this method, by calculation of differences between up-link pseudo range and down-link pseudo range, influences of common errors, such as troposphere delay, ephemeris errors and station coordinates bias, were removed, and also ionosphere delay which was correlative with signal frequency, was weakened significantly, which improved time transfer precision greatly. Finally, trial analysis was conducted by using actual observation data, the results indicated that the time transfer accuracy of two-way radio between the earth and satellites could achieve about 0.34ns, which validated correctness of method and model.

Key words Time, Techniques: Miscellaneous