第20卷 第2期 空 间 科 学 学 报 Vol.20, No.2
2000 年 4月 CHINESE JOURNAL OF SPACE SCIENCE Apr., 2000

# 一种同步卫星授时方法的再探讨

徐 劲*
(中国科学院紫金山天文台 南京 210008)

**摘 要**

通过对原有测轨和预报方案的改善，对共视时差法时刻比对的进一步研究．实验结果表明：采用现在的测轨和预报方案，时刻比对的事后处理精度与以前相当，优于 1 $\mu$s，但预报精度比以前有了较大提高，对卫星轨道预报 1 星期，相应的时刻比对精度也基本可保持在 1 $\mu$s 以内．

**关键词** 同步卫星—轨道确定—时刻比对

## 1 引 言

时刻比对由于具有广泛的实用价值历来受到人们的重视，以卫星作为信号传播中介的空间时刻比对方法因具有精度高、覆盖范围广以及不易受自然环境影响等优点正在国际国内得到普遍采用和关注．在各种空间比对方法中，一种简单易行的时刻比对方法就是借助地球同步卫星作为信号传播中介的方法，国际上已于 70 、 80 年代普遍展开了对这种时刻比对方法和技术的研究．例如，美国利用 GOES 卫星、印度利用 Insat-1B 卫星先后建成了其国内授时系统，授时精度分别优于 10 $\mu$s 和 20 $\mu$s; 在欧洲，为了建立实现各国之间高精度时间同步且投资较低的系统，意大利国家电子研究所提出用同步卫星电视行脉冲授时同步的计划，并联合波兰、德国、瑞典、捷克、奥地利以及荷兰等国在 1990 年利用 ECS-5 进行授时与时刻比对试验，预计该系统的授时精度可达 0.1 $\mu$s．南太平洋地区，目前已拟就了一个更加宏伟的计划，该计划准备利用澳大利亚通信卫星 Aussat B1/B2 进行卫星 TV 时刻发播，该卫星上配备了激光反射板，由至少 3 个地面站对其实施激光测距观测，由于利用激光测距对卫星的定轨精度高，预计建成的系统将使得南太平洋地区的卫星授时精度达到 10 ns．国内对这种时刻比对方法和技术的研究始于 80 年代， 1985—1988 年，中国科学院陕西天文台与国内其它台站联合，利用苏联荧光屏电视广播卫星进行共视时差法时刻比对的初步实验 [1,2]; 1993 年，中国科学院同步卫星观测网 5 台 3 站 2 所联合起来利用亚星 1 号对这种时刻比对方法的进一步试验研究 [3]．结果表明，在考虑同步卫星轨道变化的条件下可使共视时差法时刻比对的事后处理精度优于 1 $\mu$s，加之这种方法的实现非常经济，在当前国内时间同步工作中是一种值得考虑的方法．

在本文研究中，我们将展开对共视时差法时刻比对的再探讨．对于已有的工作，我们发现在考虑同步卫星轨道变化的情况下，共视时差法虽能获得较高的事后比对精度，但若

* 属中国科学院国家天文观测中心
1998-10-13 收到原稿， 2000-02-03 收到修定稿

对卫星轨道进行预报，相应的预报比对精度随时间衰减非常迅速，究其原因我们对已有的测轨和预报方案进行了重新考查，发现原方案中存在的以下问题是影响比对精度的主要因素：首先原测轨和预报计算中采用的卫星轨道一阶摄动分析解不能满足问题的精度要求，其次测轨和预报计算本身还存在一些疏漏. 例如，在计算信号从卫星至地面 2 观测站的传播时延差时，没有考虑由于电波传播时延和地球自转的存在而引起测站空间位置的相应变化，这将会对测轨和预报精度产生一定影响. 针对以上问题和不足，我们对原测轨和预报方案进行了修改，在测轨和预报计算中用轨道精密数值积分取代了一阶摄动分析解，以提高卫星力学模型精度，对计算中存在的一些疏漏也进行了弥补，以下我们将在方案修改的基础上展开对共视时差法时刻比对的进一步实验研究.

## 2 系统组成原理

如图 1 所示，地面站 e 发出的信号经卫星 s 向各地转发，地面 2 测站 $i$ 和 $j$ 接收卫星 s 于某基准时刻 $t$ 转发的信号，即对该信号进行共视观测，2 测站接收信号的基准时刻分别为 $t_i$ 和 $t_j$，当地原子钟记录时刻分别为 $\hat{t}_i$ 和 $\hat{t}_j$，设 $\Delta t$ 为卫星信号至地面 2 测站 $i$ 和 $j$ 的理论传播时延差，即有

$$\Delta t = \frac{1}{c}(|\boldsymbol{r}(t) - \boldsymbol{R}_i(t_i)| - |\boldsymbol{r}(t) - \boldsymbol{R}_j(t_j)|), \tag{1}$$

$\boldsymbol{r}, \boldsymbol{R}_i$ 和 $\boldsymbol{R}_j$ 分别表示卫星、地面 2 测站 $i$ 和 $j$ 在历元地心惯性系中的坐标，$c$ 为光速，则 2 测站 $i$ 和 $j$ 的钟差 $\Delta T$ 可表为

$$\Delta T = \hat{t}_j - \hat{t}_i + \Delta t, \tag{2}$$

由 (1) 和 (2) 式还可得到

$$|\boldsymbol{r}(t) - \boldsymbol{R}_i(t_i)| - |\boldsymbol{r}(t) - \boldsymbol{R}_j(t_j)| = c(\Delta T + \hat{t}_i - \hat{t}_j). \tag{3}$$

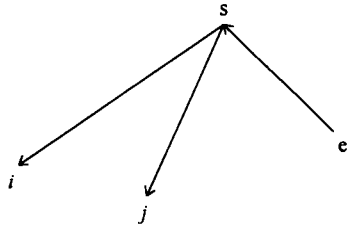


图 1 共视时差法时刻比对示意图

Fig.1 The diagram of time comparison using common view method

上式右端括号中的项即为卫星信号至 $i$ 站和 $j$ 站的观测传播时延差. 如果已知转发时刻 $t$ 及对应的卫星位置 $\boldsymbol{r}$，由 (1) 和 (2) 式计算便可得到 2 测站 $i$ 和 $j$ 的钟差 $\Delta T$，从而实现 $i$ 站和 $j$ 站的钟同步；反之，如果已知 2 测站 $i$ 和 $j$ 的钟差 $\Delta T$ 以及与共视观测相联系的一个基准时刻，则可利用 (3) 式对卫星进行定轨，基于以上思路，我们可以利用地面上若干已进行钟同步的测站对卫星信号进行共视观测，利用观测资料对卫星进行精密

定轨，通过精密定轨可事后提供或预报卫星位置，从而实现卫星信号覆盖区域内地面上任意两站之间的钟同步，这就是共视时差法时刻比对系统组成的基本原理.

1993 年利用亚星 1 号进行的共视时差法时刻比对实验中，以中国科学院同步卫星观测网 5 台 3 站 2 所作为钟同步站展开对亚星 1 号的共视观测，以陕西天文台为中心站，其它各测站的原子钟分别与陕西天文台主钟实施同步，其中北京天文台、上海天文台与陕西天文台的钟差由共视 GPS 获得，紫金山天文台、长春人造卫星站、武汉测量与地球物理研究所与陕西天文台的钟差由 Loran-C 确定，云南天文台与陕西天文台的钟差由 BPL 确定，亚星 1 号转发的信号为中央电视台经由北京沙河地面站向卫星发送的秒信号.

## 3　动力学和测量模型

为了建立描述卫星运动的动力学方程，对卫星进行测轨和轨道预报，时刻比对实验中采用了以下动力学和测量模型.

### 3.1　时空参考系

卫星动力学方程是相对于 J2000.0 地心惯性系而建立的，相应的轨道数值积分也是在该坐标系中进行的，积分自变量为地球时 TT，在地固坐标系与 J2000.0 地心惯性系的相互转换过程中，岁差和章动计算分别采用 Lieske 等人 1977 岁差模型以及 IAU 1980 章动模型，考虑到在实际工作中很难得到极移量及 UT1 的准实时值和预报值，故没有考虑极移的影响，而 UT1 值就用同一时刻的 UTC 值替代.

### 3.2　力学模型

测轨和预报计算中考虑了地球中心引力、地球形状摄动及日、月引力摄动. 由于未获得亚星 1 号形状、空间姿态、表面材料构成及反射性能的任何信息，故暂未考虑光压摄动影响. 根据问题的精度要求，地球中心引力及形状摄动计算中，对地球引力场球谐项只截取到 $4 \times 4$，日、月引力摄动计算中，对日、月位置的计算则采用一种简单的分析公式 [4].

### 3.3　测量模型

关于参加共视观测的各站坐标，分别由 GPS 接收机和子午仪 MX1502 接收机定位得到，其精度是不同的，并且这些站坐标是在不同的地心参考系中给出的，这就造成了观测网各站坐标之间的不相容. 但相对于目前的观测精度，估计这种不相容性不会对实验结果产生影响. 关于观测资料，各站与陕西天文台之间的共视观测结果都被归算为它们与陕西天文台之间的观测传播时延差，与其相联系的基准记录时刻目前则采用中央电视台秒信号发播时刻. 由于不知道中央电视台和北京沙河地面站的精确坐标，因此难以用这种形式的记录时刻通过信号传播时延修正精确计算卫星转发时刻，实验中就将这种形式的记录时刻当作卫星转发时刻来处理. 显然，这将会对实验精度产生一定的影响，建议今后采用陕西天文台主钟记录的信号接收时刻作为与观测相联系的基准记录时刻. 对观测传播时延差资料，目前还没有作任何时延修正. 例如大气对流层和电离层时延、设备时延以及广义相对论时延等，就时延差资料而言，虽然各项时延的影响都是较差影响，但对实验精度还是会有一定的影响，尤其是大气对流层和电离层时延的影响，建议今后增加适当的空间监测手段，对这 2 项时延进行修正.

## 4 测轨和预报

根据采用的动力学模型，可建立描述地球同步卫星空间运动的动力学方程：

$$\ddot{\boldsymbol{r}} = \boldsymbol{F}(\boldsymbol{r}). \tag{4}$$

$\boldsymbol{r}$ 为卫星位置矢量，$\boldsymbol{F}$ 表示力函数. 如果已知某历元 $t_0$ 时刻卫星的位置和速度矢量 $\boldsymbol{r}_0$ 和 $\dot{\boldsymbol{r}}_0$，通过对 (4) 式数值积分就可计算和预报卫星轨道，一般情况下，精确的历元状态量 $\boldsymbol{r}_0$ 和 $\dot{\boldsymbol{r}}_0$ 是未知的，必须由观测资料经测轨计算确定. 用 $d$ 表示某转发时刻 $t$ 卫星信号至陕西天文台和某测站 $i$ 的实测光程差，其值可由相应的观测传播时延差确定，$d_{\mathrm{c}}$ 表示同一时刻对应的理论光程差，可由下式计算

$$d_{\mathrm{c}} = |\boldsymbol{r}(t) - \boldsymbol{R}_i(t_i)| - |\boldsymbol{r}(t) - \boldsymbol{R}_{\mathrm{s}}(t_{\mathrm{s}})|. \tag{5}$$

$\boldsymbol{R}_i$ 和 $\boldsymbol{R}_{\mathrm{s}}$ 分别表示测站 $i$ 和陕西天文台在历元地心惯性系中的坐标，$t_i$ 和 $t_{\mathrm{s}}$ 分别为测站 $i$ 和陕西天文台接受卫星信号的时刻，它们的值可分别由 $t$ 值进行相应的传播时延修正得出，则转发时刻 $t$ 对应的实测光光程差与理论光程差之差即残差为

$$\Delta d = d - d_{\mathrm{c}}. \tag{6}$$

它与历元状态量改正量之间的线性关系由下式确定

$$\Delta d = \Big(\frac{\boldsymbol{r}(t) - \boldsymbol{R}_i(t_i)}{|\boldsymbol{r}(t) - \boldsymbol{R}_i(t_i)|} - \frac{\boldsymbol{r}(t) - \boldsymbol{R}_{\mathrm{s}}(t_{\mathrm{s}})}{|\boldsymbol{R}(T) - \boldsymbol{R}_{\mathrm{s}}(t_{\mathrm{s}})|}\Big)\Delta\boldsymbol{r}, \tag{7}$$

$$\Delta\boldsymbol{r} = \Big(\frac{\partial\boldsymbol{r}}{\partial\boldsymbol{r}_0}\Big)_t \Delta\boldsymbol{r}_0 + \Big(\frac{\partial\boldsymbol{r}}{\partial\dot{\boldsymbol{r}}_0}\Big)_t \Delta\dot{\boldsymbol{r}}_0. \tag{8}$$

将 (8) 式代入 (7) 式就得到了测轨的 1 个条件方程，由于采用多站多点观测，观测资料数远远大于测轨中未知量个数，因此实际得到的是一个由许多条件方程构成的矛盾方程组，测轨计算正是基于这个矛盾方程组的多变元迭代过程，它从已知的历元状态初值出发，在每步迭代计算中对矛盾方程组进行最小二乘求解，得出历元状态量的改进值，直到迭代过程收敛，在每步迭代计算中，为确定各个条件方程的系数，需同时积分动力学方程 (4) 和下列变分方程

$$\frac{\mathrm{d}^2}{\mathrm{d}t^2}\Big(\frac{\partial\boldsymbol{r}}{\partial\boldsymbol{r}_0}\Big) = \frac{\partial\boldsymbol{F}}{\partial\boldsymbol{r}}\frac{\partial\boldsymbol{r}}{\partial\boldsymbol{r}_0}, \tag{9}$$

$$\frac{\mathrm{d}^2}{\mathrm{d}t^2}\Big(\frac{\partial\boldsymbol{r}}{\partial\dot{\boldsymbol{r}}_0}\Big) = \frac{\partial\boldsymbol{F}}{\partial\boldsymbol{r}}\frac{\partial\boldsymbol{r}}{\partial\dot{\boldsymbol{r}}_0}. \tag{10}$$

其积分初值分别为

$$\frac{\partial\boldsymbol{r}}{\partial\boldsymbol{r}_0}\Big|_{t=t_0} = I, \quad \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\Big(\frac{\partial\boldsymbol{r}}{\partial\boldsymbol{r}_0}\Big)\Big|_{t=t_0} = \boldsymbol{0},$$

$$\frac{\partial\boldsymbol{r}}{\partial\dot{\boldsymbol{r}}_0}\Big|_{t=t_0} = \boldsymbol{0}, \quad \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\Big(\frac{\partial\boldsymbol{r}}{\partial\dot{\boldsymbol{r}}_0}\Big)\Big|_{t=t_0} = \boldsymbol{I}.$$

其中 $\boldsymbol{I}$ 为 $3\times3$ 单位矩阵. 由于测轨计算的迭代过程是一个熟知的计算处理过程，有关细节这里就不再赘述.

## 5　实验结果和讨论

我们采用 1993 年 9 月 24 日 —10 月 6 日中国科学院同步卫星观测　　站对亚星 1 号的共视观测结果展开对共视时差法时刻比对的实验研究，这 5 个观测站分别为陕西天文台、北京天文台、上海天文台、云南天文台和武汉测量与地球物理研究所. 采用这段观测的原因是由于各站在上述时间段内观测的连续性都较好，适合于实验研究，由于所有的共视观测结果都被事后归算为卫星信号至陕西天文台和其它各站的观测传播时延差，因此简称各站与陕西天文台形成的时延差资料为各站的观测. 在实验中我们以 1993 年 9 月 24 日 —9 月 30 日北京天文台、上海天文台、云南天文台和武汉测量与地球物理研究所 4 站的观测对亚星 1 号进行测轨计算，确定卫星的历元状态量 $\boldsymbol{r}_0$ 和 $\dot{\boldsymbol{r}}_0$, 利用已确定的历元状态量数值积分动力学方程 (4), 给出 1993 年 9 月 24 日 —10 月 6 日所有观测时刻的卫星位置，然后按 (5) 式分别计算上述 4 站观测时刻的理论传播时延差，并与对应的观测值进行比较，给出观测值与理论值之差即残差，以此检验共视时差法时刻比对的事后处理精度和预报精度.

**表 1　测轨计算结果**

| 历元 $t_0$ (MJD)=49257.5 | 标准差 $\sigma = 0.49\mu$s |
|---|---|
| $x_0 = 15535405.44 \pm 659.56$ m | $\mathrm{d}x_0/\mathrm{d}t = 2858.19 \pm 1.77$ m/s |
| $y_0 = -39201389.56 \pm 371.02$ m | $\mathrm{d}y_0/\mathrm{d}t = 1132.61 \pm 2.59$ m/s |
| $z_0 = 43320.24 \pm 796.57$ m | $\mathrm{d}z_0/\mathrm{d}t = 1.01 \pm 4.25$ m/s |

表 1 给出了测轨计算结果，表明采用现在的测轨方案测轨可使同步卫星空间定位精度达到 1 km 左右，共视时差法时刻比对的事后处理精度优于 1 $\mu$s, 这与现有观测的精度是一致的. 现有观测的精度主要取决于共视观测各站之间的钟同步精度，这些测站之间的钟同步分别由 Loran-C 、 BPL 以及共视 GPS 获得，这些方法所能达到的同步精度分别为 1 $\mu$s 或略优于 1 $\mu$s, 因此整个观测序列的综合精度也大约保持在 1 $\mu$s 左右.

图 2 分别展示了 1993 年 9 月 24 日—10 月 6 日北京天文台、上海天文台、云南天文台和武汉测量与地球物理研究所 4 站残差随时间的分布情况. 图中的虚线已将测轨段和预报段隔开，所示结果表明在原测轨和预报方案修改基础上，共视时差法时刻比对的事后处理精度不仅仍保持在优于 1 $\mu$s 的水平，而且其预报精度不随时间作快速衰减，预报精度衰减速度较慢，在 1 星期内基本可保持在 1 $\mu$s 以内，比以前有了较大提高.

以上实验结果进一步证实了共视时差法时刻比对系统的实用价值，该系统授时比对精度虽不及 GPS, 但也能实现较高的精度，与 GPS 系统相比，该系统的形成远为简单，而且价格低廉. 该系统可搭载在已有的卫星电视系统之上，对卫星信号及信道没有特别要求，使用方便，适用于大范围精密时间同步服务.

由于受实验条件的限制以及测轨预报方法的不尽完善，目前的实验精度还不能完全反映系统有可能达到的实际精度，共视时差法尚有很大的精度潜力可挖，为了使系统实现更高的比对精度，应主要从以下几方面开展工作：

(1) 提高钟同步观测站之间的时钟同步精度，例如可建立各测站之间的钟差模型，将

模型参数作为未知量在测轨计算中与卫星状态量一起进行估值，或统一借助于 GPS 实现各测站之间的高精度时钟同步，当然前一种方法是我们所期望的，能实现最好，它使得系统本身成为一个独立系统，不依赖于其它外部系统.

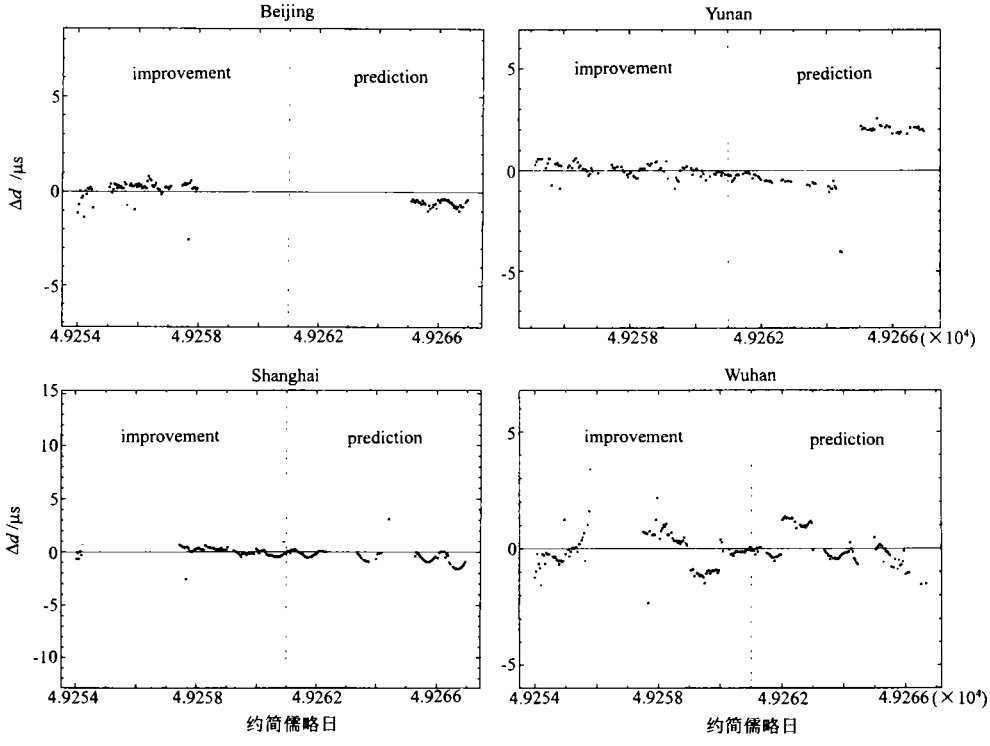


图 2 各站观测值与理论值之差随时间的变化

Fig.2 The differences between observational values and theoretical values of each station change with time

(2) 对主要的信号传播时延应给予适当修正，这些时延包括电离层和对流层引起的传播时延以及地面设备接收时延等.

(3) 进一步提高轨道力学模型的精度，主要应考虑光压摄动对卫星轨道运动的影响，在获得有关卫星形状、空间姿态、表面材料构成及反射性能等信息情况下，应根据这些信息精确构造卫星光压摄动的力学模型.

**致谢** 本研究基于中国科学院同步卫星观测网提供的实测资料；宋金安研究员提供了有益的帮助，在此表示感谢.

## 参　考　文　献

[1] 宋金安,罗定昌,施正范,黄斌.荧光屏电视广播卫星的初步定位及卫星时刻同步.陕西天文台台刊, 1985,8(1):61—65

[2] 张挥，徐劲．苏联荧光屏广播卫星的定轨和定时．人造卫星观测与研究， 1990,(2): 24—30

[3] 徐劲，宋金安，张挥，吴建民，刘世茂．一种同步卫星授时方法．天文学报， 1996, **37**(2):147—153

[4] Meeus J. Astronomical Formulae for Calculators. London: Tweede Druk, 1979. 137—143

[5] Balmino G, Barriot J P, Vales N. Non-singular formulation of the gravity vector and gravity gradient tensor in spherical harmonics. *Manuscripta Geodaetica*, 1990, 15:11—16

[6] 黄天衣，周庆林．用一次和的 Adams-Cowell 方法．天文学报， 1992,**33**(4):413—419

[7] Dennis D, McCarthy. IERS Technical Note 13. Paris: Central Bureau of IERS, 1992. 28—35

# SOME FURTHER DISCUSSIONS FOR A METHOD OF TIME SERVICE WITH SYNCHRONOUS SATELLITE

XU Jin

(*Purple Mountain Observatory, The Chinese Academy of Sciences, Nanjing* 210008)

## Abstract

The time comparison with by means of synchronous satellite is a common method, which has the advantages of low cost, simple operation and wide scope of service. The key technique for raising the precision of time comparison with the method is to determine and predict the orbit of synchronous satellite more accurately. Based on the improvement of the previous program for orbit determination and prediction, further in vestigations concerning time comparison using this method is conducted in this paper. The experimental results show that the post-processing precision of time comparison obtained with the new program is about the same as that obtained with the previous program, which is better than 1 $\mu$s, but the pre-processing precision has been raised greatly as compared to that obtained previously. With the new program of orbit determination and prediction, the pre-processing precision of time comparison can keep better than 1 $\mu$s in one week.

**Key words**　Synchronous satellite, Orbit determination, Time comparison