0254-6124/2012/32(3)-405–07 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

Guo Rui, Liu Li, Li Xiaojie, Cheng Yue, Chang Zhiqiao. Precise orbit determination for GEO satellites based on both satellite clock offsets and station clock offsets. *Chin. J. Space Sci.*, 2012, **32**(3): 405-411

卫星与测站钟差支持条件下的 GEO 卫星精密定轨*

郭 睿[1] 刘 利[1] 李晓杰[2] 程 越[3] 常志巧[1]

1(北京环球信息应用开发中心 北京 100094)

2(解放军测绘学院 郑州 450052)

3(解放军 96656 部队 北京 100096)

摘 要 在基于伪距的 GEO 卫星精密定轨中, GEO 卫星的静地特性导致定轨解算无法对星地组合钟差进行有效估计, 需要独立的时间同步支持. 本文讨论了卫星和测站钟差支持条件下的 GEO 卫星定轨原理, 利用仿真数据系统地分析了中国区域网跟踪条件下 GEO 卫星的定轨精度, 从定性和定量角度分析了钟差二次项、星地时间同步精度、站间时间同步精度及系统差等因素对定轨精度的影响.

关键词 卫星导航, 精密定轨, 钟差, 时间同步, 伪距

中图法分类号 P3

Precise Orbit Determination for GEO Satellites Based on Both Satellite Clock Offsets and Station Clock Offsets

GUO Rui[1] LIU Li[1] LI Xiaojie[2] CHENG Yue[3] CHANG Zhiqiao[1]

1(*Beijing Global Information Application and Development Center, Beijing* 100094)

2(*Institute of Mapping and Surveying, PLA, Zhengzhou* 450052)

3(*96656 unit of PLA, Beijing* 100096)

Abstract Because of its dynamical features, orbit parameters of the Geostationary satellite (GEO) are strongly correlated with clock offset parameters in Precise Orbit Determination (POD) when using the L-band pseudorange data. In order to solve this problem, clock offsets of the satellite clock as well as the receiver clock are introduced, which are obtained by unattached observation technology. Therefore, the pseudorange data could be converted to ranging data. This paper discussed the GEO POD principle based on pseudorange data with the support of clock offsets, and analyzed the POD accuracy using simulation data from China regional tracking network. Influences from the clock

* 武汉大学地球空间环境与大地测量教育部重点实验室测绘基础研究基金 (10-01-11), 2011 年第二届中国卫星导航学术年会和第 49 批中国博士后科学基金共同资助

2011-01-16 收到原稿, 2011-08-27 收到修定稿

E-mail: guorui@shao.ac.cn

offsets a_2 item and errors of the satellite clock offset, stations' clock offsets and systematic errors were analyzed both theoretically and quantitatively.

Key words Satellite navigation, Precise orbit determination, Time offset, Time transfer, Pseudorange

0 引言

GEO 卫星定轨是精密定轨领域的热点及难点问题, 影响 GEO 卫星定轨精度的主要因素有两方面. 一是高轨卫星的几何跟踪条件受到局部跟踪网的限制, GEO 卫星的静地特性使得跟踪几何几乎不变, 地面站对卫星的动力学约束强度非常弱; 二是目前广泛采用的 GEO 测轨技术具有较显著的系统误差.

目前 GEO 卫星常用的精密测轨技术主要有两种, 即转发式测距和伪距测量. 对于基于伪距测量的 GEO 卫星定轨, 在定轨解算中无法对星地组合钟差进行有效估计, 需要星地时间同步和站间时间同步的支持, 因此, 卫星钟差和测站钟差直接制约着 GEO 卫星定轨精度. 虽然, 误差分析表明, 在混合星座组网运行时通过差分策略可消除 GEO 卫星钟差参数与轨道半长轴的统计相关性, 但是, 对于只有 GEO 在轨运行的单星模式, 基于伪距的 GEO 卫星定轨必须依赖时间同步技术 [1−6].

文献 [3] 针对 GEO 卫星定轨, 提出联合 SLR 与 C 波段转发式测距的定轨方案, 解决了 C 波段数据设备时延等关键技术问题, 其轨道视向精度约为 0.133 m, 位置精度优于 5 m, 实现了高精度的 GEO 卫星轨道测定. 但是, 受设备成本等因素限制, C 波段转发式测距技术无法在导航卫星领域广泛应用, 监测接收机伪距相位测量仍然是 GEO 卫星测定轨的首选技术.

本文从基于伪距测量的 GEO 卫星定轨出发, 分析和讨论了 GEO 卫星定轨策略, 论证了钟差二次项、星地时间同步精度、站间时间同步精度和系统差等因素对定轨精度的影响, 并提出了不同条件下 GEO 卫星的定轨方案.

1 基本原理

1.1 伪距测量模型

L 波段伪随机码测距测量是通过对接收机的本地码与卫星信号的伪随机码进行相关处理, 来测定信号从卫星至接收机的传播时间 τ' 的, 其测量模型如下:

$$\begin{aligned}\rho'_{\rm pr} =& R + c(\tau_{\rm sta} - \tau^{\rm sat}) + \\ & c\tau_{\rm delay} + \Delta D_{\rm trop} + \Delta D_{\rm ion} + \Delta D_{\rm rel} + \\ & \Delta D_{\rm ant} + \Delta D_{\rm tide} + \varepsilon. \end{aligned} \tag{1}$$

式中, R 为星地几何距离; $\tau_{\rm sta}$ 和 $\tau^{\rm sat}$ 分别为测站钟差和卫星钟差; $\tau_{\rm delay}$ 为设备时延, 包括卫星发射时延和测站接收时延; $\Delta D_{\rm trop}$ 和 $\Delta D_{\rm ion}$ 分别为对流层和电离层延迟; $\Delta D_{\rm rel}$ 为广义相对论改正; $\Delta D_{\rm ant}$ 为卫星和测站天线相位中心偏差; $\Delta D_{\rm tide}$ 为地球潮汐改正; ε 为偶然误差.

在上述误差项中, 设备时延是利用仪器测量所得到的, 通常在几百至数千纳秒量级; 对流层延迟误差的大小与气象条件和卫星高度角有关, 可通过模型进行修正, 其量级约为米级, 对于伪距测量, 通常采用 Sasstamoinen 模型; 电离层延迟误差可以采用模型参数或双频伪距数据无电离层组合进行消除; 卫星和测站天线相位中心偏差可以根据卫星平台参数进行模型修正, 广义相对论改正和地球潮汐改正等误差项均可利用公式进行修正.

1.2 动力学模型

对于动力学定轨问题, 力学模型的选取与参数解算是关键. 在 J2000 惯性系中, 作用于卫星的力 A 依照其性质可分解为三部分, 即地球对卫星的中心引力 $A_{\text{two-body}}$、保守力摄动 $A_{\rm grav}$ 和非保守力摄动 $A_{\text{non-grav}}$, 有

$$A = A_{\text{two-body}} + A_{\rm grav} + A_{\text{non-grav}}, \tag{2}$$

$$A_{\text{two-body}} = -\frac{G_{\rm me}}{r^3}\boldsymbol{r}, \tag{3}$$

$$A_{\rm grav} = A_{\rm n} + A_{\rm ns} + A_{\rm tide} + A_{\rm ro} + A_{\rm rel}, \tag{4}$$

$$A_{\text{non-grav}} = A_{\rm drag} + A_{\rm s} + A_{\rm e} + A_{\rm rad}. \tag{5}$$

式中, $G_{\rm me}$ 为地球引力常数; $\boldsymbol{r}$ 为卫星位置矢量; $A_{\rm n}$ 为 N 体摄动; $A_{\rm ns}$ 为地球形状摄动; $A_{\rm tide}$ 为潮汐摄

动, 包含固体潮、海潮摄动; A_{drag} 为大气阻力摄动, 对于 GEO 卫星, 该摄动项可以忽略; A_{s} 为太阳直射辐射压摄动; A_{e} 为地球反照辐射压摄动; A_{rad} 为卫星本体辐射摄动. 其中, 地球引力场采用 10×10 阶 JGM-3 模型, 行星历表采用 JPL DE403 参数, 章动模型采用 IAU80 模型, 太阳光压和地球反照辐射压模型采用了简单的 Box-Wing 模型, 固体潮则采用了 IERS96 模型.

影响卫星动力学定轨精度的误差源有, 跟踪观测的精度以及观测台站的分布、测站坐标的精度、力学模型误差和测量模型误差等. 对于基于伪距的 GEO 卫星定轨模式, 星地组合钟差难以有效估计, 需要星地时间同步和站间时间同步的支持, 因此, 卫星钟差和测站钟差也是制约 GEO 卫星定轨精度的关键.

2 定轨试验及分析

2.1 仿真条件

为深入分析卫星钟差和测站钟差支持条件下的 GEO 卫星定轨问题, 对 84°E GEO 卫星的伪距和时间同步数据进行仿真计算, 所利用的跟踪站包括北京、海南、喀什、昆明、齐齐哈尔、库尔勒和宁波共 7 个地面跟踪站. 其中, 前 4 个站为时间同步站, 其测站钟差已知, 后 3 个站为非时间同步站. 跟踪站仿真得到的详细信息列于表 1, 其中, a_0, a_1 和 a_2 分别为钟差、钟速和钟漂参数.

在仿真中, 同时对卫星钟差进行计算, 其参数 $a_0=-1000\,\mathrm{m}$, $a_1=-1.0\times10^{-10}\,\mathrm{s\cdot s^{-1}}$, $a_2=-1.0\times10^{-17}\,\mathrm{s\cdot s^{-2}}$, 当卫星与地面实现时间同步后, 卫星钟差可以准确获知.

表 1 伪距跟踪站信息

Table 1 Information of pseudorange tracking stations

站号	地点	a_0/m	$a_1/(\mathrm{s\cdot s^{-1}})$	$a_2/(\mathrm{s\cdot s^{-2}})$	测距噪声/m
1021	北京	0	0	0	0.2
1041	海南	200	1.3×10^{-11}	1.3×10^{-18}	0.2
1061	喀什	300	1.4×10^{-11}	1.4×10^{-18}	0.2
1071	昆明	400	1.5×10^{-11}	1.5×10^{-18}	0.2
1091	齐齐哈尔	500	1.2×10^{-10}	1.2×10^{-17}	0.2
1101	库尔勒	600	1.3×10^{-10}	1.3×10^{-17}	0.2
1111	宁波	700	1.4×10^{-10}	1.4×10^{-17}	0.2

2.2 卫星与测站钟差支持条件下伪距数据的 GEO 定轨

在基于伪距的 GEO 定轨解算中, 4 个站间时间同步站的伪距在扣除卫星钟差和测站钟差影响后, 既可对卫星轨道进行约束, 又可作为其他伪距站钟差解算的参考标准, 因此, 卫星钟差和测站钟差的精度直接影响 GEO 卫星定轨精度.

卫星钟差可通过外部时间同步手段精确获知. 对于北京、海南、喀什和昆明测站, 其测站钟差也可以通过外部时间同步手段精确获知. 因此, 在基于伪距的定轨解算中, 首先可对所有站的伪距扣除公共的卫星钟差影响, 然后对时间同步站的伪距扣除站钟差的影响, 这样时间同步站就等效于距离观测量.

2.2.1 钟差精度对定轨精度的影响分析

卫星钟差和测站钟差的精度直接影响 GEO 卫星定轨精度. 考虑钟参数误差和设备时延误差等因素的影响, 在卫星钟差和测站钟差上分别加入不同量级的误差, 然后进行定轨试验, 定轨弧长为 3 d, 解算参数包括卫星初轨及太阳光压参数 (常数项和线性项), 以时间同步站作为参考标准与约束条件, 全弧段估计一组非时间同步站钟差参数 (a_0,a_1,a_2). 表 2 列出了 4 种方案, 其中方案 A-1∼A-3 分别给出了不同钟差误差情况下的定轨精度, 方案 A-4 给出了增加估计卫星钟差后的定轨精度.

从表 2 中的定轨精度可以看出, 基于中国境内的地面跟踪网, 3 ns 钟差误差引起的 GEO 卫星轨道径向误差和位置误差分别为 1.113 m 和 11.744 m, 当增加对卫星钟差的估计后, 轨道的径向精度得到明显改善, 但位置精度反而变差. 因此, 考虑到实测数据中其他不可预测的因素, 钟差精度要求优于 2 ns.

2.2.2 钟差二次项对定轨精度的影响分析

在基于伪距的 GEO 定轨解算中, 必须对非时间同步站的测站钟差进行估计, 因此, 钟差建模和解算策略直接影响定轨精度.

基于上述相同的仿真条件, 定轨弧长仍然为 3 d, 解算参数包括卫星初轨、太阳光压参数 (常数项和线性项), 两种钟差解算策略列于表 3.

为了分析不同钟差解算策略对定轨精度的影响, 不考虑设备时延误差带来的影响, 将其视为 0, 表 3 给出了两种解算方案的定轨精度比较, 图 1 给出了北京站定轨残差.

从图 1 和表 3 的结果可以看出, 方案 B-1 与

方案 B-2 的解算策略差异在于对钟差二次项的估计, 方案 B-2 的径向精度和位置精度分别为 8.280 m 和 28.812 m, 定轨残差为 21.016 m, 且呈现出抛物线状的变化趋势. 结果表明, 钟差二次项对 GEO 卫星定轨精度不容忽视, 当 $a_2 = 1.2 \times 10^{-17}\,\mathrm{s{\cdot}s^{-2}}$, 一天的影响达到 26.86 m, 二天的影响达到 107.42 m, 三天的影响达到 241.70 m, 因此, 必须予以考虑.

2.2.3 非时间同步站对定轨精度的影响分析

在基于伪距的 GEO 定轨中, 时间同步站首先对卫星轨道进行了强约束, 当加入非时间同步站的伪距数据后需要增加对各站钟差的估计, 那么非时间同步站对定轨精度的影响程度需要进一步评估.

为能够更好地说明影响程度, 分别从有无钟差误差两种情况进行分析, 定轨弧长为 3 d, 估计参数包括

表 2 钟差误差对定轨精度的影响

Table 2 Influences of the clock offset errors on the POD precision

方案	待估参数	定轨精度/m	钟差误差/ns
方案 A-1	卫星初轨、太阳光压参数、全弧段估计一组非时间同步站钟差参数 (a_0, a_1, a_2)	$R = 0.005$, $T = 0.027$ $N = 0.052$, $P_{\mathrm{os}} = 0.059$	0
方案 A-2		$R = 0.673$, $T = 7.100$ $N = 1.043$, $P_{\mathrm{os}} = 7.208$	2
方案 A-3		$R = 1.113$, $T = 11.561$ $N = 1.740$, $P_{\mathrm{os}} = 11.744$	3
方案 A-4	卫星初轨、太阳光压参数、全弧段估计一组非时间同步站钟差参数 (a_0, a_1, a_2), 卫星钟差常数 a_0	$R = 0.041$, $T = 13.695$ $N = 0.462$, $P_{\mathrm{os}} = 13.703$	3

表 3 不同钟差解算策略对定轨精度的影响

Table 3 Influences of the clock offset estimating strategy on the POD precision

方案	解算策略	定轨精度/m	定轨残差/m
方案 B-1	全弧段解算一组星地组合钟差参数 a_0, a_1, a_2	$R = 0.005$, $T = 0.027$ $N = 0.052$, $P_{\mathrm{os}} = 0.059$	0.196
方案 B-2	全弧段解算一组星地组合钟差参数 a_0, a_1	$R = 8.280$, $T = 22.077$ $N = 16.557$, $P_{\mathrm{os}} = 28.812$	21.016

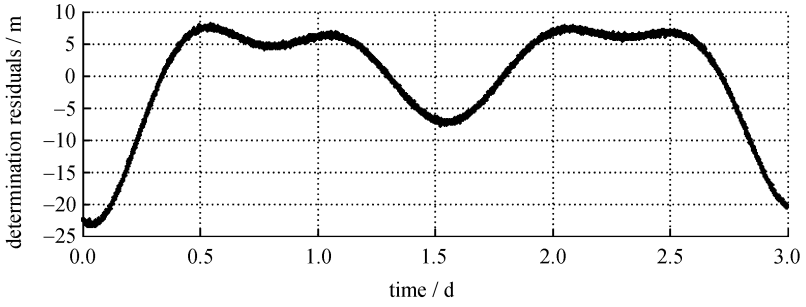

图 1 方案 B-2 北京站的定轨残差

Fig. 1 Precise Orbit Determination residuals of strategy B-2

卫星初轨、光压参数和非时间同步站全弧段一组星地组合钟参数 (a_0, a_1, a_2), 表 4 给出了方案 B 两种情况的定轨精度.

从表 4 可以看出, 与基于 4 个时间同步站的 GEO 卫星定轨精度相比, 增加伪距数据进行联合定轨对轨道精度没有改善, 其原因在于需要增加对钟差参数的估计, 从某种意义上说, 非时间同步站在 4 个时间同步站同时存在的情况下, 对于卫星轨道没有意义.

但是, 定轨解算的钟差结果为星地和站间时间同步提供了一个新的实现途径, 即基于伪距精密定轨的时间同步, 表 5 给出了非时间同步站的钟差解算精度.

从表 5 可以看出, 对于方案 B-1B, 钟差解算精度在厘米量级, a_1 和 a_2 的解算相对精度在 0.000 01 量级; 对于方案 B-2B, 钟差解算精度在 1 m 左右, 其精度与轨道的径向精度相当, a_1 和 a_2 解算的相对精度在 0.0001 量级.

综上所述, 对于卫星与测站钟差支持条件下的 GEO 卫星定轨, 当时间同步站很多时, 伪距跟踪站对定轨精度没有贡献, 但能够通过定轨解算非时间同步站钟差, 实现站间时间同步.

但是, 当站间时间同步站数量有限时, 完全基于时间同步站可能无法完成 GEO 卫星精密定轨任务, 此时非时间同步站可以作为其他站的约束和参考标准, 实现对非时间同步站钟差的有效估计, 解决单个时间同步站无法完成精密定轨任务的难题.

2.3　卫星钟差支持条件下伪距数据的 GEO 定轨

在只有卫星钟差支持的条件下, 各跟踪站的站钟差是未知的, 因此必须对所有站钟差进行估计. GEO 卫星的静地特性使得钟差与轨道信息难以分离, 估计所有站钟差将增大参数之间的相关性, 各种测量误差将被急剧放大.

如果以北京站监测接收机作为系统的参考时间, 其钟差可以认为是零, 因此定轨解算中可以不进行估计. 在北京伪距跟踪站的约束下, 可以对卫星轨道和

表 4　方案 B 两种情况的定轨精度比较结果

Table 4　Precise Orbit Determination(POD) precision results of different strategies

方案	定轨精度/m	钟差误差/ns	定轨用站
方案 B-1A	$R = 0.005$, $T = 0.028$ $N = 0.039$, $P_{\rm os} = 0.048$	0	4 个时间同步站
方案 B-1B	$R = 0.005$, $T = 0.027$ $N = 0.052$, $P_{\rm os} = 0.059$	0	4 个时间同步站和 3 个非时间同步站
方案 B-2A	$R = 0.673$, $T = 6.670$ $N = 1.334$, $P_{\rm os} = 6.835$	2	4 个时间同步站
方案 B-2B	$R = 0.673$, $T = 7.100$ $N = 1.043$, $P_{\rm os} = 7.208$	2	4 个时间同步站和 3 个非时间同步站

表 5　非时间同步站钟差解算精度 (单位 m, $\rm s{\cdot}s^{-1}$, $\rm s{\cdot}s^{-2}$)

Table 5　Clock offsets precision (Unit m, $\rm s{\cdot}s^{-1}$, $\rm s{\cdot}s^{-2}$)

方案	齐齐哈尔站钟参数	库尔勒站钟参数	宁波站钟参数
方案 B-1B	$a_0 = -0.077$ $a_1 = 4.04 \times 10^{-16}$ $a_2 = -9.76 \times 10^{-22}$	$a_0 = -0.064$ $a_1 = 1.41 \times 10^{-16}$ $a_2 = -1.07 \times 10^{-21}$	$a_0 = -0.075$ $a_1 = 5.13 \times 10^{-16}$ $a_2 = -2.17 \times 10^{-21}$
方案 B-2B	$a_0 = 0.315$ $a_1 = -1.60 \times 10^{-14}$ $a_2 = -8.07 \times 10^{-21}$	$a_0 = -0.664$ $a_1 = 8.05 \times 10^{-16}$ $a_2 = -9.58 \times 10^{-21}$	$a_0 = 0.393$ $a_1 = -1.70 \times 10^{-14}$ $a_2 = -9.66 \times 10^{-21}$

其他站钟差进行有效估计, 因此, 基于星地时间同步条件下伪距数据的 GEO 定轨是可行的. 但是, 在具体工程实践中, 由于传输设备时延标定等因素的影响, 北京监测接收机伪距中不可避免存在一定的系统差, 该系统差将直接影响 GEO 卫星定轨精度.

为了分析卫星钟差支持条件下伪距数据的 GEO 定轨精度, 利用上述 7 个定轨跟踪站的伪距仿真数据进行定轨试验, 其中卫星钟差已知, 定轨弧长为 3 d, 解算参数包括卫星初轨、太阳光压参数 (常数项和线性项), 以北京站为参考, 估计其他各站钟差项式 a_0, a_1, a_2, 采用的力学模型与前面完全一致.

需要指出的是, 星地时间同步存在一定的误差, 对于北京站, 该误差与设备时延一起表现为系统性偏差; 对于其他各站, 该误差将被测站钟差吸收, 因此, 为了分析系统差对定轨精度的影响, 在仿真中对北京站加入了不同量级的误差, 表 6 给出了各种情况下的 GEO 卫星定轨精度.

根据表 6 中的结果, 可以得到如下结论.

(1) 在卫星钟差支持条件下, 利用伪距数据可以实现 GEO 卫星的精密定轨, 同时实现测站钟差参数有效估计.

(2) 卫星钟差精度和北京站时延等误差是制约定轨精度的关键因素, 其表现为系统性偏差, 在中国区域网跟踪条件下, 对轨道沿迹方向的精度影响将最为明显.

(3) 当系统差为 2 ns 时, 定轨精度约为 9 m, 系统差为 3 ns 时, 定轨精度达到约 15 m, 因此, 为了达到优于 10 m 的 GEO 单星定轨精度, 系统性偏差应该优于 2 ns.

表 6 北京站不同系统差条件下的定轨精度

Table 6 Precise Orbit Determination (POD) precision of different system errors in Beijing station

方案	系统差/ns	定轨精度/m	定轨残差/m
方案 C-1	0	$R = 0.005$, $T = 0.022$ $N = 0.049$, $P_{\rm os} = 0.054$	0.196
方案 C-2	2	$R = 0.006$, $T = 8.924$ $N = 0.092$, $P_{\rm os} = 8.925$	0.196
方案 C-3	3	$R = 0.007$, $T = 14.868$ $N = 0.147$, $P_{\rm os} = 14.868$	0.196

(4) 在卫星钟差支持条件下, 由于只有一个站可以对轨道和钟差进行约束, 该方案并不一定是最优的 GEO 卫星定轨方案. 同时, 由于轨道视向与位置误差的比例达到 1:2000 左右, 因此, 系统差被极大地放大到轨道沿迹方向.

(5) 对于导航用户而言, 轨道视向精度是制约导航服务的关键因素, 仅仅在卫星钟差支持条件下, 随着系统差的变大, 虽然轨道精度衰减非常明显, 但视向精度仍然比较稳定, 对导航服务的影响有限.

2.4 测站钟差支持条件下伪距数据的 GEO 定轨

在只有测站钟差支持条件下, 4 个时间同步站钟差已知, 各非时间同步站钟差是未知的, 因此, 必须对所有非时间同步站钟差进行估计. GEO 卫星的静地特性使得钟差与轨道信息难以分离, 估计所有测站星地组合钟差后, 参数之间是强相关的, 协方差阵达到 $10^3 \sim 10^4$ 量级, 那么各种测量误差将被急剧放大, 定轨精度衰减十分明显.

卫星钟差是所有测站共有的参数, 可作为公共参数进行估计. 表 7 给出了站间时间同步条件下的定轨结果.

从表 7 可以看出, 在测站钟差支持条件下, 通过对卫星钟差和非时间同步站钟差的估计, 可以实现 GEO 卫星精密定轨, 理想情况下, 其精度可以达到厘米量级. 但是, 站间时间同步的精度是制约定轨精度的关键因素, 要获得优于 10 m 的定轨精度, 测站钟差的精度要求优于 2 ns.

比较表 7 方案 C 中 A 和 B 之间的定轨精度差异, 可以清楚发现, 非时间同步站对定轨精度的贡献十分有限. 但当站间时间同步站个数有限时, 非时间同步站的作用就非常明显. 但是, 由于既要对非时间同步站的钟差进行估计, 又要估计公共的卫星钟差, 站间时间同步站的个数至少需要两个, 才能实现对卫星轨道和待估钟差的有效估计. 当站间时间同步站的个数为 1 时, 各参数之间是强相关的, 协方差阵达到 $10^3 \sim 10^4$ 量级, 测量噪声和各种模型误差将被急剧放大, 无法实现高精度的定轨任务.

总之, 在站间时间同步支持的条件下, 通过对卫星钟差和非时间同步站钟差的估计, 可以实现 GEO 卫星精密定轨, 但至少需要两个站间时间同步站的支持. 要实现 10 m 的定轨精度, 站间钟差精度要求优于 2 ns.

表 7 站间时间同步支持条件下的定轨结果

Table 7 Precise Orbit Determination (POD) precision results with the support of station clock offsets

方案	定轨精度/m	解算参数	站钟误差/ns	定轨用站
方案 C-1A	$R=0.004$, $T=0.031$ $N=0.036$, $P_{\rm os}=0.047$	卫星钟参数 a_0,a_1,a_2	0	4 个时间同步站
方案 C-1B	$R=0.005$, $T=0.032$ $N=0.050$, $P_{\rm os}=0.059$	卫星钟参数 a_0,a_1,a_2, 非时间同步站 a_0,a_1,a_2	0	4 个时间同步站和 3 个非时间同步站
方案 C-2A	$R=0.028$, $T=8.205$ $N=0.286$, $P_{\rm os}=8.210$	卫星钟参数 a_0,a_1,a_2	2	4 个时间同步站
方案 C-2B	$R=0.018$, $T=8.205$ $N=0.211$, $P_{\rm os}=8.208$	卫星钟参数 a_0,a_1,a_2, 非时间同步站 a_0,a_1,a_2	2	4 个时间同步站和 3 个非时间同步站
方案 C-3A	$R=0.044$, $T=13.695$ $N=0.471$, $P_{\rm os}=13.704$	卫星钟参数 a_0,a_1,a_2	3	4 个时间同步站
方案 C-3B	$R=0.028$, $T=13.695$ $N=0.318$, $P_{\rm os}=13.699$	卫星钟参数 a_0,a_1,a_2, 非时间同步站 a_0,a_1,a_2	3	4 个时间同步站和 3 个非时间同步站

3 结论

通过对卫星与测站钟差支持条件下 GEO 卫星定轨相关问题的系统研究, 对定轨解算策略、钟差二次项、钟差精度和非时间同步站等因素对 GEO 卫星轨道的影响进行了详细分析, 提出了不同模型下的 GEO 卫星定轨解算策略, 得到如下结论.

(1) 钟差二次项对轨道精度的影响大约为 28.812 m.

(2) 在钟差精度为 2 ns 的条件下, 轨道精度大约为 7.208 m.

(3) 通常情况下, 非时间同步站的作用有限, 但当时间同步站个数有限时, 非时间同步站对于提高 GEO 卫星定轨精度至关重要.

(4) 在实现星地时间同步后, 可以实现站钟差参数的有效估计, 但并不是最优方案, 要达到 10 m 的定轨精度, 钟差精度要求优于 2 ns.

(5) 在站间时间同步条件下, 至少需要两个站间时间同步站的支持, 测站钟差的精度是制约定轨精度的关键, 当测站钟差优于 2 ns 时, GEO 定轨精度优于 10 m.

参考文献

[1] Li Zhigang, Yang Xuhai, Shi Huli, *et al*. A new method for determination of satellite orbits by transfer [J]. *Sci. China: G*, 2008, **38**(12):1711-1722. In Chinese (李志刚, 杨旭海, 施浒立, 等. 转发器式卫星轨道测定新方法 [J]. 中国科学: G, 2008, **38**(12):1711-1722)

[2] Huang Yong, Hu Xiaogong, Huang Cheng, *et al*. Precise orbit determination of a maneuvered GEO satellite using CAPS ranging data [J]. *Sci. China: G*, 2008, **38**(12):1750-1758. In Chinese (黄勇, 胡小工, 黄珹, 等. 利用 CAPS 测距数据确定 GEO 卫星变轨期间的轨道 [J]. 中国科学: G, 2008, **38**(12):1750-1758)

[3] Guo Rui, Hu Xiaogong, Tang Bo, *et al*. Precise orbit determination for the geostationary satellite with multiple tracking techniques [J]. *Chin. Sci. Bull.*, 2010, **55**(6):428-434. In Chinese (郭睿, 胡小工, 唐波, 等. 多种测量技术条件下的 GEO 卫星定轨研究 [J]. 科学通报, 2010, **55**(1):1-7)

[4] Qin Xianping, Yang Yuanxi, Jiao Wenhai, *et al*. Combined determination of satellite orbit using SLR and pseudorange data [J]. *Geomat. Inf. Sci. Wuhan Univ.*, 2003, **28**:745-748. In Chinese (秦显平, 杨元喜, 焦文海, 等. 利用 SLR 与伪距资料综合定轨 [J]. 武汉大学学报信息科学版, 2003, **28**(6):745-748)

[5] Peng Dongju, Wu Bin. Zero-difference and single-difference precise orbit determination for LEO using GPS [J]. *Chin. Sci. Bull.*, 2007, **52**:2024-2030. In Chinese (彭冬菊, 吴斌. 非差和单差 LEO 星载 GPS 精密定轨探讨 [J]. 科学通报, 2007, **52**(6):715-719)

[6] Zhang Qiang, Liao Xinhao, Huang Chen. An investigation of the precise orbit determination by combination of two kinds of measurements [J]. *Acta Astron. Sin.*, 2000, **41**:347-354. In Chinese (张强, 廖新浩, 黄珹. 两种观测技术综合精密定轨的探讨 [J]. 天文学报, 2000, **41**(4):347-354)