

转发式站间差分卫星定轨

杨颖^{①②③}, 李志刚^{①②}, 杨旭海^{①②}, 冯初刚^④, 曹芬^{①②③}

① 中国科学院国家授时中心, 西安 710600;

② 中国科学院精密导航定位与定时技术重点实验室, 西安 710600;

③ 中国科学院研究生院, 北京 100049;

④ 中国科学院上海天文台, 上海 200030

E-mail: xiyinghe6@163.com

2012-06-01 收稿, 2012-08-09 接受

国家自然科学基金(11033004, 11173026)资助

摘要 中国科学院国家授时中心提出的“转发式卫星轨道测定方法”已成功应用于 GEO 卫星精密定轨, 显著地提高了 GEO 卫星的定轨精度。基于“转发式卫星轨道测定方法”, 本文提出一种新的转发式观测模式——“转发式站间差分”观测模式, 该模式是对已有转发式观测模式的拓展, 原则上, 本观测模式是一种类 VLBI 测角观测, 主要是对卫星轨道的横向约束。介绍了“转发式站间差分”观测模式的工作原理, 用转发式测距数据和转发式差分数据进行联合定轨, 并对不同观测弧段的测距数据单独定轨预报和测距与差分数据联合定轨预报结果进行了比较。结果表明, 联合定轨的预报轨道精度优于单独使用测距数据的预报轨道精度, 显然, 由于“转发式站间差分”模式对卫星轨道横向约束的特性, 有效地改善了转发式测距与差分数据联合定轨的轨道预报精度。

关键词

转发式
站间差分
精密轨道确定(POD)
轨道预报

中国卫星导航系统空间段的主体是地球同步轨道(geostationary Earth orbit, GEO)卫星和倾斜同步轨道(inclined geostationary Earth orbit, IGSO)卫星^[1,2], 因此, 高精度测定 GEO 卫星和 IGSO 卫星轨道成为我国建设卫星导航系统的关键技术之一。

目前用于常规定轨和测控任务的 S 波段统一卫星测控技术(united S-band ranging, USB)测距精度约为 3~5 m, 卫星定轨精度为百米量级水平, 显然这样的定轨精度不能满足卫星导航系统对卫星轨道的要求。GEO 卫星和 IGSO 卫星离地面高, GEO 卫星绕地球运行的周期和地球自转周期相同, 卫星和地面的相对运动速度小, 所以, 难以得到地球同步轨道卫星的精密轨道。激光测距技术虽然有很高的测距精度, 测距精度可达厘米级水平, 但激光观测受气象条件限制, 如果限于国内布局, 观测到的卫星轨道弧段短, 很难作为常规卫星定轨观测使用^[3,4]。

卫星双向时间比对技术是目前最高精度的时间

比对技术。中国科学院国家授时中心基于高精度卫星双向时间传递技术提出了转发式卫星测轨观测方法^[3], 其测轨原理是: 各卫星地面站的原子钟产生高精度的时间信号, 用不同伪码同时向同一颗卫星发射相同载频的扩频信号, 各地面站接收经卫星转发器转发的各台站的时间信号, 测定信号路径的时延, 从而确定地面站到卫星间的距离。本方法中测距信号的生成和相关信号测量均在地面进行, 地面站有自校正系统, 消除了仪器误差的影响; 测距和时间同步独立进行, 时间同步误差不影响测轨, 因此本观测系统具有很高的观测精度。不同站的发射信号和不同站的接收信号的不同组合, 形成不同模式的转发式卫星测轨观测模式: 测站接收卫星转发的自己站发射的信号, 这种模式称作“自发自收”模式; 所有测站接收卫星转发的某一个站发射的信号, 这种模式称作“一发多收”模式。自发自收模式和一发多收模式已有近十年观测经验, 测距精度优于 1 cm, 定轨

观测残差优于 9 cm, 轨道精度优于 2 m, 使 GEO 卫星的定轨精度有了突破性的进展^[3]。但是, 上述观测模式主要实施了对卫星轨道的径向约束, 对卫星轨道的横向约束比较小, 结果是卫星横向定轨比卫星径向定轨有较大的误差。

本文提出了一种新的转发式测轨观测模式——“转发式站间差分”观测模式, 它除了具有转发式测轨的优点外, 还兼有甚长基线干涉测量(very long baseline interferometry, VLBI)在卫星轨道观测中有测角观测的优点, 从而可对卫星轨道加以横向约束, 这样可对原有的转发式测轨模式加以约束补充。本文详细介绍了转发式站间差分原理, 并对转发式站间差分模式用于卫星定轨和轨道预报的优势进行了探讨。

1 转发式站间差分观测原理

转发式站间差分观测是转发式观测的一种新模式, 仅主站发射时间信号, 经卫星转发器转发后主站的时间信号被各站(主站和副站)接收, 在主站形成了自发自收观测模式, 在副站形成了主站发副站收的观测模式。将主站自发自收信号的伪距与主站发副站收信号的伪距相减, 消去主站上行信号, 形成了各站(主站和副站)同时接收主站信号的同源差分信号, 由于主站和副站接收来自同一卫星转发器同一时刻转发的主站信号, 因此, 这种观测模式与 VLBI 观测同时接收同一目标信号的观测原理相似^[5~7], 是一种卫星轨道的测角观测, 是不同于转发式自发自收观测和成对观测的独立观测量。转发式站间差分观测原理如图 1 所示, 其中, 根据转发式测轨站分布, 差

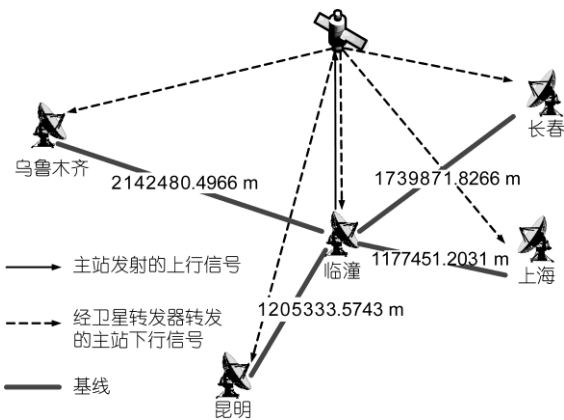


图 1 转发式站间差分观测原理示意图

分基线有 4 条, 基线和基线长分别为临潼-上海 1177451.2031 m、临潼-长春 1739871.8266 m、临潼-昆明 1205333.5743 m、临潼-乌鲁木齐 2142480.4966 m。基线精度取决于站坐标精度, 测站坐标精度为 5 mm, 相应的基线精度应优于 1 cm。

在卫星定轨时对电离层时延和对流层时延进行了修正, 电离层时延修正采用李志刚等人^[8]提出的时间序列电离层修正模型, 对流层时延修正采用 Marini-Murray 修正模型。修正时延影响后, 主站和副站信号传递关系为

$$\begin{cases} R_{i0}(t_0) = R_0(t_0) + I_0^e + \tau_s + R_i(t_0) + I_{i0}^r \\ \quad + \Delta T_i + \Delta \tau_{\text{sag}}^{0-u} + \Delta \tau_{\text{sag}}^{i-d}, \quad (1) \\ R_{00}(t_0) = R_0(t_0) + I_0^e + \tau_s + R_0(t_0) + I_{00}^r, \quad (2) \end{cases}$$

其中, 0 表示主站临潼, i 依次表示副站上海、长春、昆明、乌鲁木齐; $R_{i0}(t_0)$: 主站发副站(i 站)收的信号时延测量值(0 表示主站编号, i 表示副站编号); $R_{00}(t_0)$: 主站自发自收信号时延测量值; t_0 : 主站信号到达卫星的时刻; $R_0(t_0)$: 在主站信号到达卫星时刻, 主站天线相位中心与卫星天线相位中心间的几何距离; $R_i(t_0)$: 在主站信号到达卫星时刻, i 站天线相位中心与卫星天线相位中心间的几何距离; I_0^e : 主站发射信号通道的仪器时延; I_{i0}^r : i 站接收主站信号通道的仪器时延; I_{00}^r : 主站自发自收接收通道的仪器时延; ΔT_i : i 站主钟相对于主站主钟的钟差; τ_s : 卫星转发器时延; $\Delta \tau_{\text{sag}}^{0-u}$: 主站上行的 Sagnac 效应引起的时延; $\Delta \tau_{\text{sag}}^{i-d}$: i 站下行的 Sagnac 效应引起的时延。

(1)和(2)式相减, 得到转发式站间差分观测表达式:

$$R_{i0}(t_0) - R_{00}(t_0) = [R_i(t_0) - R_0(t_0)] + (I_{i0}^r - I_{00}^r) + \Delta T_i + \Delta \tau_{\text{sag}}^{0-u} + \Delta \tau_{\text{sag}}^{i-d}. \quad (3)$$

(3)式左边 $R_{i0}(t_0) - R_{00}(t_0)$ 是站间差分观测量, 即在 t_0 时刻卫星转发的主站信号到达主站和副站的时间差; 等号右边第一项 $R_i(t_0) - R_0(t_0)$ 是在卫星转发主站信号时刻卫星与副站和主站间几何路径时延差, 两个测站的坐标矢量差是基线矢量; $(I_{i0}^r - I_{00}^r)$ 为副站和主站接收主站信号的仪器误差; $\Delta \tau_{\text{sag}}^{0-u}$ 和 $\Delta \tau_{\text{sag}}^{i-d}$ 是主站上行为和 i 站下行 Sagnac 效应引起的时延, 它的影响根据理论可以直接计算^[9~11]。 ΔT_i 为副站 i 相对于主站主钟的钟差, 通过双向时间比对独立观测获得。经大

气时延修正后,双向时间比对的计算公式为^[12]

$$\begin{cases} R_{i0}(t_0) = R_0(t_0) + I_0^e + \tau_s + R_i(t_0) + I_{0i}^r \\ \quad + \Delta T_i + \Delta \tau_{\text{sag}}^{0-u} + \Delta \tau_{\text{sag}}^{i-d}, \\ R_{0i}(t_i) = R_i(t_i) + I_i^e + \tau_s + R_0(t_i) + I_{0i}^r \\ \quad - \Delta T_i + \Delta \tau_{\text{sag}}^{i-u} + \Delta \tau_{\text{sag}}^{0-d}. \end{cases} \quad (4)$$

两式相减得

$$R_{i0}(t_0) - R_{0i}(t_i) = [R_0(t_0) - R_0(t_i) + R_i(t_0) - R_i(t_i)] + 2\Delta T_i + I_0^e - I_i^e + I_{0i}^r - I_{0i}^r + 2\Delta \tau_{\text{sag}}^{0-u} - 2\Delta \tau_{\text{sag}}^{i-u}. \quad (6)$$

对于 GEO 卫星, $(t_0 - t_i)$ 最大值约为 1 ms 左右, $R_0(t_i)$ 与 $R_0(t_0)$, $R_i(t_i)$ 与 $R_i(t_0)$ 的差值为卫星运动引起的影 响, 改正了这些影响后有^[13]

$$\Delta T_i = \frac{1}{2}[R_{i0}(t_0) - R_{0i}(t_0)] - \frac{1}{2}(I_0^e - I_{0i}^r) + \frac{1}{2}(I_i^e - I_{0i}^r). \quad (7)$$

其中 $(I_0^e - I_{0i}^r)$ 是主站仪器发射时延与主站接收 i 站信 号仪器时延的差, $(I_i^e - I_{0i}^r)$ 是 i 站发射时延与 i 站接 收主站信号仪器时延的差, 以上时延的差值可以实 时测定.

2 数据分析和讨论

本实验的测距站包括临潼、长春、上海、昆明、 乌鲁木齐共 5 个站, 其中临潼站为主站, 各站接收和 发射的系统时延实时测定, 选择 2005 年 6 月 6 日和 17 日对鑫诺 1 号的观测数据进行分析处理, 每小时 前 10 分钟用于测量观测设备的系统误差, 对自发自 收测距数据(简称测距数据)单独定轨和测距数据与 站间差分数据联合定轨^[14-17]两种定轨结果进行了 比较.

分析过程采用的天文常数、参考系、力学模型和 测量模型参照(1996)IERS 规范. 根据伪码扩频技术 观测资料的精度, 卫星是同步卫星的情况及定轨精 度要求, 摄动选取标准为 2.2×10^{-10} , 力学模型包括 (1) JGM-3 引力场模型取 10 阶; (2) 日月引力摄动; (3) 相对论摄动; (4) 潮汐摄动: 固体潮摄动; 海潮摄动;

(5) 太阳辐射压摄动; (6) 地球反照辐射压摄动; (7) 地球自转变形摄动; (8) 经验的 RTN 摄动(为了消除 轨道沿迹方向上非模型化的误差影响, 定轨时估计 了周期为轨道周期的经验加速度横向参数 T).

测量模型包括(1) Marini-Murray 大气折射; (2) 卫星的归心改正; (3) 固体潮引起的台站位移; (4) 永 久潮汐项对台站的影响; (5) 海潮负荷潮对台站的影 响; (6) 地球自转变形对台站的影响.

定轨过程中涉及到的参考系包括(1) J2000.0 平 赤道(x - y 平面)和平春分点(x 轴方向); (2) 地球参考架 ITRF2000; (3) IAU76 岁差; (4) IAU1980 章动模型, IERS 章动改正; (5) DE403/LE403 行星历表.

1 天弧段测距数据精密定轨方案: 解轨道参数 6 个, 太阳光压参数 6 个, 经验加速度选具有正弦和余弦特性 的 T 向加速度参数 6×2 个, 卫星转发器时延参数 12 个, 共 36 个待解参数, 并约束各站系统偏差总和为零^[3]. 计 算轨道用了 12 个卫星转发器时延参数, 电离层修改量 大部分被 12 个卫星转发器时延参数所吸收.

测距数据和差分数据等权联合确定 1 天精密轨 道方案: 解轨道参数 6 个, 太阳光压参数 6 个, 经验 加速度选 T 向加速度参数 6×2 个, 卫星转发器时延参 数 12 个, 同时求解各差分系统差 4 个, 共 40 个待 解参数.

1 天测距数据单独定轨确定的精密轨道残差, 以 及 1 天测距数据和差分数据联合定轨确定的精密轨 道残差如表 1 所示.

表 2 所示为 6 月 6 日 2 时至 6 月 7 日 2 时和 6 月 6 日 14 时至 6 月 7 日 14 时轨道重叠弧段精度比较. 从 表 2 可以看出, 测距数据和差分数据联合定轨在法向 上相比测距数据单独定轨有很大改善, 在横向上也略 有改善, 联合定轨的精密轨道位置误差为 1.443m, 比 测距数据单独定轨的 1.578 m 精度有明显改善.

为了说明站间差分数据对定轨的作用, 用 6 日和 17 日两天的观测数据, 每天选择 3 个时间段, 对每个 时间段分别以不同的观测弧段(5 min, 30 min)和不同

表 1 1 天弧长精密定轨残差

时间	测距数据单独定轨		测距与差分联合定轨				
			测距部分		差分部分		联合定轨
	观测数量	RMS(m)	观测数量	RMS(m)	观测数量	RMS(m)	
6 月 6 日 2 时至 6 月 7 日 2 时	358982	0.062	358982	0.060	69355	0.054	0.059
6 月 6 日 14 时至 6 月 7 日 14 时	359240	0.062	359240	0.062	69614	0.067	0.063
6 月 17 日 0 时至 6 月 18 日 0 时	354835	0.065	354835	0.061	280764	0.094	0.077

表 2 轨道重叠弧段精度统计(单位: m)

定轨方案	R 方向	T 方向	N 方向	位置误差
测距数据单独定轨	0.623	0.770	1.228	1.578
联合定轨	0.815	0.721	0.948	1.443

的定轨观测方案(测距数据单独定轨、测距和差分数据联合定轨)进行轨道预报,分析不同弧段和不同方案对定轨和轨道预报的影响,研究站间差分观测对轨道约束的作用。

考虑到系统误差的影响,在短弧定轨时,将测距数据和站间差分数据联合精密定轨解算出的转发式测距各站系统差及差分系统差作为先验值。短弧 5 min 定轨只解算 6 个轨道根数,30 min 定轨时除了解算 6 个轨道根数外,还要解算光压参数。为了更清晰地分析联合定轨预报对轨道精度的改善作用,对 5

min 测距数据单独定轨预报 4 h 的轨道残差与 5 min 测距数据和站间差分数据联合定轨预报 4 h 的轨道残差进行对比,比较结果如图 2 所示,30 min 观测弧段定轨预报 12 h 结果如图 3 所示,其中,红色为测距数据单独定轨的轨道预报残差(O-C),绿色为测距数据和差分数据联合定轨的轨道预报残差(O-C),接近 0 线的绿色表示参与联合定轨的差分数据。

图 2 为预报 4 h 轨道残差,图 3 为预报 12 h 轨道残差。显然,在 5 min 定轨预报 4 h 和 30 min 定轨预报 12 小时情况下,测距数据单独定轨的预报轨道在

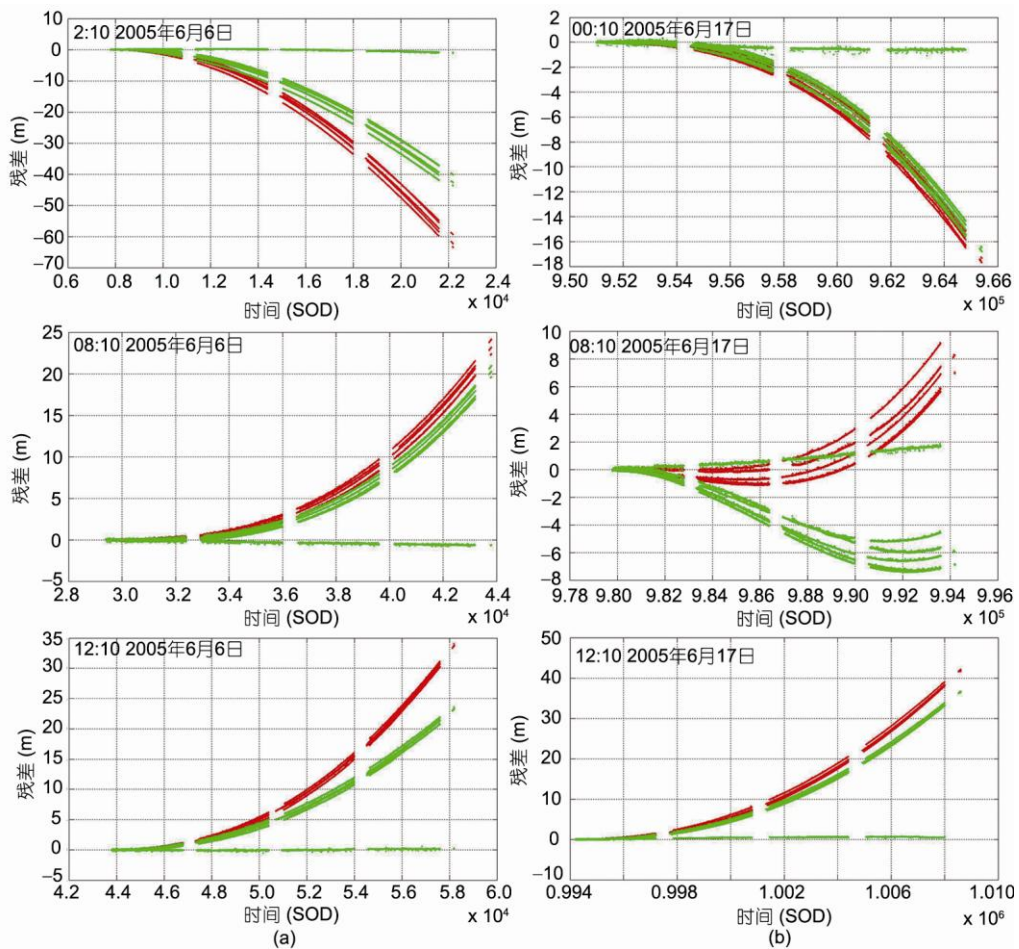


图 2 5 min 定轨预报 4 h 轨道残差(O-C)(second of day, SOD)

(a) 6 月 6 日预报轨道残差; (b) 6 月 17 日预报轨道残差

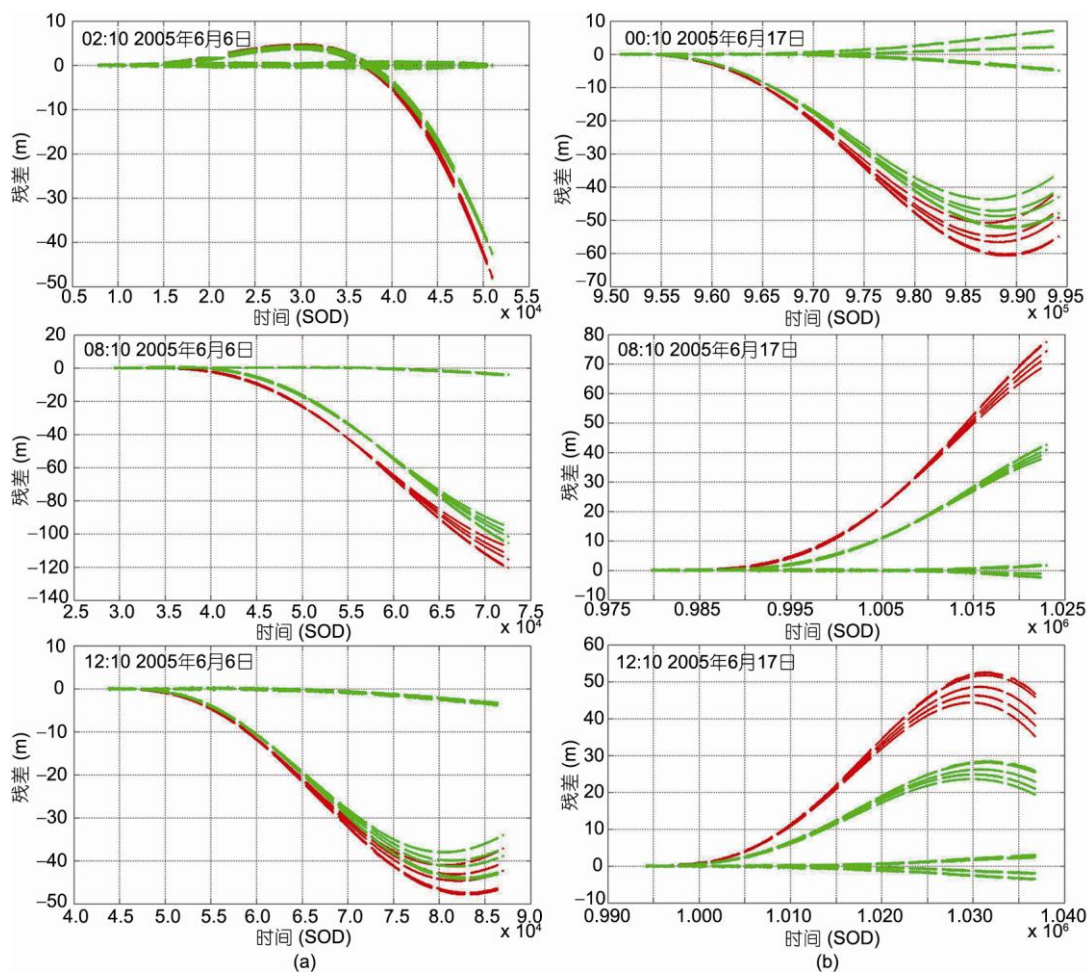


图 3 30 min 定轨预报 12 h 轨道残差(O-C)(second of day, SOD)
(a) 6 月 6 日预报轨道残差; (b) 6 月 17 日预报轨道残差

结束时发散大, 测距和差分联合定轨的预报轨道在结束时发散明显变小, 通过比较可以看出, 测距数据和差分数据联合定轨对预报轨道有很好的改善. 测距数据单独定轨预报轨道和测距数据联合差分数据定轨预报轨道的结果比较如表 3~6.

从表 3~6 可以看出, 在不同观测时间段, 测距数据和差分数据等权联合定轨预报的轨道位置均优于

测距数据单独定轨预报的轨道位置, 表明差分数据参与联合定轨可以提高预报轨道精度.

3 结论

本文提出转发式站间差分数据与测距数据联合定轨的方法, 并对测距数据单独定轨预报的轨道和测距与差分两种数据联合定轨预报的轨道进行了比

表 3 6 日 5 min 短弧定轨预报 4 h 测距数据单独定轨预报和两种数据联合定轨预报结果比较(单位: m)

起始观测时刻	观测模式	R 方向	T 方向	N 方向	位置误差
2 时 10 分	测距数据单独定轨预报	34.250	8.859	65.221	74.198
	联合定轨预报	25.623	8.167	66.713	71.930
8 时 10 分	测距数据单独定轨预报	9.121	14.184	1.181	16.904
	联合定轨预报	8.302	12.330	5.857	15.977
12 时 10 分	测距数据单独定轨预报	15.753	3.799	14.393	21.674
	联合定轨预报	11.853	3.605	17.029	21.059

表4 17日5 min短弧定轨预报4 h测距数据单独定轨预报和两种数据联合定轨预报结果比较(单位: m)

起始观测时刻	观测模式	R 方向	T 方向	N 方向	位置误差
0 时 10 分	测距数据单独定轨预报	5.234	1.941	23.127	23.792
	联合定轨预报	4.957	1.460	21.736	22.342
8 时 10 分	测距数据单独定轨预报	2.862	11.850	41.828	43.568
	联合定轨预报	7.587	6.292	32.870	34.316
12 时 10 分	测距数据单独定轨预报	17.068	9.813	12.515	23.329
	联合定轨预报	14.899	7.199	9.299	18.981

表5 6日30 min短弧定轨预报12 h测距数据单独定轨预报和两种数据联合定轨预报结果比较(单位: m)

起始观测时刻	观测模式	R 方向	T 方向	N 方向	位置误差
2 时 10 分	测距数据单独定轨预报	13.487	9.552	14.685	22.109
	联合定轨预报	11.978	7.791	14.452	20.323
8 时 10 分	测距数据单独定轨预报	55.345	54.188	6.894	77.762
	联合定轨预报	53.011	50.121	8.502	73.447
12 时 10 分	测距数据单独定轨预报	28.066	46.488	7.016	54.754
	联合定轨预报	27.313	45.541	6.237	53.468

表6 17日30 min短弧定轨预报12 h测距数据单独定轨预报和两种数据联合定轨预报结果比较(单位: m)

起始观测时刻	观测模式	R 方向	T 方向	N 方向	位置误差
0 时 10 分	测距数据单独定轨预报	36.596	71.044	13.085	80.980
	联合定轨预报	31.615	61.328	11.810	70.001
8 时 10 分	测距数据单独定轨预报	33.381	33.027	7.243	47.513
	联合定轨预报	18.037	17.523	5.823	25.813
12 时 10 分	测距数据单独定轨预报	30.048	60.875	9.856	68.599
	联合定轨预报	16.942	35.642	6.341	39.970

较. 通过数据处理分析可以看出, 站间差分与测距数据联合定轨明显改善了卫星轨道预报精度, 结果表明转发式站间差分数据对轨道是有帮助的, 由于差分数据系统差较大, 观测数据质量不高, 影响了定轨精度, 但在参与联合定轨和轨道预报时还是起到了

很好的改善作用. 通过改进观测设备的手段可以进一步提高差分数据质量, 进而更好地在定轨和预报中发挥作用. 转发式站间差分数据和测距数据联合定轨预报的方法对高精度定轨特别是轨道预报有重要的应用价值和应用前景.

参考文献

- 1 艾国祥, 施浒立, 吴海涛, 等. 转发式卫星通信导航定位系统. 中国发明专利, 200410046064, 2004
- 2 Ai G X, Shi H L, Wu H T, et al. A positioning system based on communication satellites and the Chinese area positioning system (CAPS). Chin J Astron Astrophys, 2008, 8: 611-630
- 3 李志刚, 杨旭海, 施浒立, 等. 转发器式卫星轨道测定新方法. 中国科学 G 辑: 物理学 力学 天文学, 2008, 38: 1711-1722
- 4 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. 科学通报, 2010, 55: 428-434
- 5 Yan J G, Ping J S, Li F, et al. Chang'E-1 precision orbit determination and lunar gravity field solution. Adv Space Res, 2010, 46: 50-57
- 6 王宏, 董光亮, 胡小工, 等. USB-VLBI 综合确定 SMART-1 环月探测器轨道. 测绘科学, 2008, 30: 40-41
- 7 黄勇, 胡小工, 张秀忠, 等. VLBI 应用于 GEO 导航卫星的测定轨. 科学通报, 2011, 56: 1974-1981
- 8 李志刚, 程宗颐, 冯初刚, 等. 电离层预报模型研究. 地球物理学报, 2007, 50: 327-337
- 9 李志刚, 李焕信, 张虹. 双通道终端进行卫星双向法时间比对的归算. 陕西天文台台刊, 2002, 25: 81-89
- 10 Imae M, Hosokawa M, Imamura K. Two-way satellite time and frequency transfer networks in Pacific rim region. IEEE Trans Instrum Meas, 2001, 50: 559-562
- 11 Li Z G, Li H X, Zhang H. The reduction of two-way satellite time comparison. Chin Astron Astrophys, 2003, 27: 226-235

- 12 Merck J P, Achkar J. Typical combined uncertainty evaluation on the Ku band TWSTFT link. In: Proceedings of the 19th European Frequency and Time forum (EFTF), 2005
- 13 李志刚, 乔荣川, 冯初刚. 卫星双向法与卫星测距. 飞行器测控学报, 2006, 25: 1–6
- 14 李济生. 人造卫星精密轨道确定. 北京: 解放军出版社, 1995. 3–13
- 15 Escobal P R. Methods of Orbit Determination. USA: Krieger Publishing Company, 1976
- 16 Montenbruck O, Gill E. Satellite Orbits. New York: Springer, 2000
- 17 France B, Cunningham J P, Swift E R, et al. Improvement of the NIMA precise orbit and clock estimates. In: Proceedings of ION GPS-98, Nashville, Tennessee, 1998. 1587–1596