

区域导航系统实时广域差分 修正模型与方法

陈刘成¹, 胡小工², 封欣¹, 常志巧¹

(1. 北京环球信息应用开发中心, 北京 100094; 2. 中国科学院上海天文台, 上海 200030)

摘要: 针对区域导航系统卫星轨道预报精度差、在轨卫星故障或者 GEO 卫星轨道机动后轨道快速恢复等问题, 对独立时间同步体制下区域卫星导航系统的广域差分技术进行了深入研究, 从非传统力学的角度提出了通过单历元广域差分进行星历误差改正的技术, 完善了广域差分星历误差改正体制; 并通过协方差矩阵分析了广域差分星历改正数误差传播规律, 设计了控制误差传播放大的算法。模拟实验结果证明, 在时间同步条件下可以通过发播等效钟差改正数、星历误差改正数实时地为服务区内用户提供高精度的卫星星历和卫星钟差改正参数。星历误差改正参数精度基本不受先验轨道、卫星钟差精度和观测数据累计时间长度的影响; 在综合观测误差改正精度为 2 ns 的情况下, 可为系统实时提供平均精度优于 5 m 的星历误差改正参数。

关键词: 卫星导航; 广域差分; 时间同步; 星历误差; 协方差分析

中图分类号: P197.5, P122

1 引言

卫星导航系统的工作原理是在卫星位置精确已知的基础上, 用户通过测量星地距离解算接收机天线位置来实现导航。卫星位置是此类系统的基本参量。区域导航系统采用混合卫星星座, 测轨网目前只能在我国本土布设。在此条件下, MEO 卫星可跟踪弧段约占 35%, 采用非差方法对单颗 MEO 卫星进行精密定轨, 径向精度仅约为 3 m^[1]; GEO 卫星的观测角跨度只有几度, 加上其特殊的、不利于系统误差分离的轨道特性^[2], 都对精密定轨提出了挑战^[3]。通过分析定轨协方差矩阵可知, 区域系统精密定轨的精度显著低于全球网定轨, 且解算的动力学参数之间有较强的相关性, 不利于轨道预报^[1, 3-5]。另外, 在轨卫星可能出现的各种故障以及轨道机动等问题都需要卫星轨道的快速恢复技术。

为了提高最终系统的可靠性和服务性, 区域导航系统设计有广域差分体制。现代广域差分技术研究始于 20 世纪 80 年代末^[6-8], 其原理是通过一个主控站和若干监测站组成地面跟踪网实现对 GPS 卫星的连续观测, 实时解算卫星星历、卫星钟差和电离层延迟的改正参数并发播给用户。“快照 (Snapshot)”法是最简单的卫星星历和卫星钟差处理方法, 该算法采用平滑伪距技术, 简单快速, 但对观测数据质量非常敏感, 引起误差估值的不精确性; 而且卫星位置误差和卫星钟差很难完全分离^[9]。Stanford 大学 WAAS 研究组于 1995 年提出对轨道

收稿日期: 2010-9-17; 修回日期: 2010-09-29

资助项目: 国家高技术研究发展计划 (2007AA12Z345, 2009AA12Z328)、中国博士后科学基金 (20080440092, 200902259)、地球空间环境与大地测量教育部重点实验室开放基金 (08-01-07)

用简单的动态模型处理,能够平滑星历改正,使星历和钟差较好分离^[10],这也是一种几何处理方法。较精确的卫星星历和钟差确定方法还是涉及卫星动力学模型的精密轨道确定方法,如Stanford电讯公司开发的STel软件^[11]和美国JPL开发的GPISY定轨软件^[12],基于全球监测网能够提供厘米精度的GPS卫星轨道,基于区域网能够提供精度优于2m的GPS卫星轨道和优于3m的GEO卫星轨道。

传统的GPS广域差分改正数包括卫星星历、卫星钟差和格网电离层改正数。由于2000年美国宣布取消对GPS系统实施的SA政策,GPS广域差分系统的内在需求发生了变化。例如,钟差快变改正数由于SA的取消,变得没有必要。这降低了广域差分数据处理模型的复杂程度,而且也降低了对改正信息的发播频度的要求。

对于区域导航系统,鉴于其测控网的局限性和星座构成及运行情况的复杂性,上述方案并不适用。为此,国内部分学者和工程技术人员设计了等效钟差改正算法来统一改正卫星星历误差和卫星钟差误差,但是等效钟差对卫星星历误差改正能力有限,尚不能满足卫星轨道机动、卫星故障后轨道快速恢复的需要。本文基于区域导航系统设计的技术特点,在动力学定轨的基础上,考虑卫星星历误差改正的需要,提出快速处理星历改正数和钟差的模型和方法。

2 等效钟差改正数处理模型及性能分析

2.1 等效钟差计算

设测站*i*接收机在*k*历元时刻观测*j*卫星的信号获得的伪距观测值为 ρ_{ij}^k ,且

$$\rho_{ij}^k = P_{ij}^k + C \cdot (\Delta t_i^k - \Delta T_j^k) + \Delta D_{ij,\text{Trop}}^k + \Delta D_{ij,\text{Iono}}^k + \varepsilon_{ij}^k \quad (1)$$

式(1)包括了星站真实几何距离 P_{ij}^k ,卫星钟差 ΔT_j^k ,接收机钟差 Δt_i^k ,对流层延迟 $\Delta D_{ij,\text{Trop}}^k$,电离层延迟 $\Delta D_{ij,\text{Iono}}^k$,以及其它误差 ε_{ij}^k 。

在计算等效钟差时,广播星历中的卫星钟差已知,并且假设对流层、电离层延迟通过改正后可以忽略,其他误差项忽略。利用公式(1)可得:

$$\rho_{ij}^k = P_{ij}^k + C \cdot \Delta t_i^k + C \cdot \tau_j^k + \varepsilon_{ij}^k \quad (2)$$

式(2)中 ρ_{ij}^k 为经过对流层延迟、电离层延迟、卫星钟差、其他误差项改正的伪距观测值, P_{ij}^k 为根据卫星广播星历计算的空间距离, Δt_i^k 为待估的*k*历元*i*接收机钟差, τ_j^k 为待估的*k*历元*j*卫星等效钟差。

假设用于广域差分处理的测站为*n*个,每秒每站可观测卫星*m*颗,则每秒可有大约*n*×*m*个观测资料,需要估计的参数包括:*n*−1个测站钟差、*m*个等效卫星钟差。固定基准站的测站钟差为0,则用方程(2)联立,就可以解算出每个历元各可视卫星的等效钟差。

2.2 等效钟差对星历误差的修正性能

分析卫星星历在*x, y, z*方向或者*R, T, N*方向上的误差在不同测站测距方向上投影的平均值,可以得到等效钟差对卫星星历误差进行改正的效果。将各星星历误差在不同测站测距方向上的投影扣除等效钟差改正值,就可以反映等效钟差修正卫星星历误差的性能。

通过表1、表2分析可以看出,等效钟差对星历误差径向分量(*R*方向)改正效果较好,

表 1 卫星星历误差经等效钟差改正后的最大用户距离误差

单位/m

卫星	xyz 方向误差修正残差	RTN 方向误差修正残差	备注
GEO1	0.0489dx+0.067dy+0.0583dz	0.007dR+0.077dT+0.048dN	截至角5°
GEO2	0.083dx+0.02dy+0.0587dz	0.007dR+0.0873dT+0.048dN	
GEO3	0.0952dx+0.036dy+0.0581dz	0.006dR+0.00997dT+0.047dN	
GEO4	0.0247dx+0.067dy+0.0567dz	0.008dR+0.054dT+0.051dN	
GEO5	0.048dx+0.038dy+0.0571dz	0.007dR+0.0719dT+0.05dN	
IGSO	0.1068dx+0.079dy+0.036dz	0.004dR+0.0946dT+0.079dN	在55°N时
	0.0911dx+0.043dy+0.0305dz	0.003dR+0.0589dT+0.052dN	在35°S时, 59.4%监测站可视
MEO	0.1501dx+0.1105dy+0.089dz	0.015dR+0.072dT+0.1464dN	在55°N时
	0.1277dx+0.073dy+0.0289dz	0.003dR+0.1381dT+0.067dN	在30°S时, 38.1%监测站可视

表 2 卫星星历误差经等效钟差改正后的平均用户距离误差

单位/m

卫星	xyz 方向误差修正残差	RTN 方向误差修正残差	备注
GEO1	0.0271dx+0.035dy+0.0326dz	0.003dR+0.0444dT+0.033dN	截至角5°
GEO2	0.046dx+0.01dy+0.0328dz	0.003dR+0.0471dT+0.033dN	
GEO3	0.0501dx+0.019dy+0.0329dz	0.003dR+0.0536dT+0.033dN	
GEO4	0.0101dx+0.032dy+0.0322dz	0.003dR+0.033dT+0.032dN	
GEO5	0.03dx+0.02dy+0.0324dz	0.003dR+0.0356dT+0.032dN	
IGSO	0.0519dx+0.035dy+0.021dz	0.003dR+0.0534dT+0.039dN	在55°N时
	0.0525dx+0.016dy+0.0108dz	0.001dR+0.0419dT+0.037dN	在35°S时, 59.4%监测站可视
MEO	0.0662dx+0.0433dy+0.045dz	0.007dR+0.048dT+0.077dN	在55°N时
	0.0768dx+0.031dy+0.0118dz	0.002dR+0.0638dT+0.054dN	在30°S时, 38.1%监测站可视

法向 (N 方向) 次之, 切向 (T 方向) 最差。而 GEO 卫星精密定轨约束效果最差的就是切线方向, 这给区域导航系统实现最终性能带来了一定的挑战。

3 等效钟差加星历误差改正数处理模型

根据区域导航系统在服务区内相对密集布站、对过境卫星有多重观测, 同时有部分站间及星地时间同步的情况, 从非力学、非传统动力学定轨的角度, 利用卫星星历误差相对不同监测站测距方向投影的差异, 建立单历元广域差分星历误差改正体制, 可以保证区域导航系统服务区可视卫星的星历精度。

假设星历存在误差 (dx_j^k, dy_j^k, dz_j^k) , 式 (2) 中 P_{ij}^k 是根据星历计算的星、站距离, 则

$$\rho_{ij}^k = P_{ij}^k + a_{x,ij}^k \cdot dx_j^k + a_{y,ij}^k \cdot dy_j^k + a_{z,ij}^k \cdot dz_j^k + C \cdot \Delta t_i^k + C \cdot \tau_j^k + \varepsilon_{ij}^k, \quad (3)$$

其中 $(a_{x,ij}^k, a_{y,ij}^k, a_{z,ij}^k)$ 为 k 历元时刻, j 卫星星历在 x 、 y 、 z 方向上的误差在测站 i 视线方向上的投影系数, 可以根据卫星星历和测站坐标计算得到。

假设用于广域差分处理的测站为 n 个, 平均每秒每站观测卫星 m 颗, 则每秒可有约 $n \times m$ 个观测资料, 需要估计的参数包括: $n - 1$ 个测站钟差、 m 个等效卫星钟差、 $3m$ 个星历改正参数。固定基准站钟差为 0, 用方程 (3) 联立, 当 $(n \times m)$ 大于 $(4m + n - 1)$ 时, 每个

历元都可以解算出各可见卫星的等效钟差和星历改正数。

4 原理验证

4.1 数据模拟

本算例仅为了验证第 3 节处理模型的正确性,暂不考虑加入测距资料的系统误差和随机误差。模拟的地面站数目为 27,分布在中国本土全境;模拟的星座包括 5 颗 GEO 卫星、3 颗 IGSO 卫星、4 颗 MEO 卫星。

4.1.1 模拟的卫星星历误差

(1) GEO: R, T, N 方向初始位置误差为 (0.3 m, 130.0 m, 35.0 m), R, T, N 方向初始速度误差为 (0.001 m/s, 0.02 m/s, 0.01 m/s)。

(2) IGSO: R, T, N 方向初始位置误差为 (0.2 m, 40.0 m, 15.0 m), R, T, N 方向初始速度误差为 (0.001 m/s, 0.015 m/s, 0.005 m/s)。

(3) MEO: R, T, N 方向初始位置误差为 (0.2 m, 10.0 m, 8.0 m), R, T, N 方向初始速度误差为 (0.001 m/s, 0.01 m/s, 0.003 m/s)。

4.1.2 模拟的测站钟差

基准站钟差为 0;其他站存在 0.4 m 的初始系统差,钟差变化速度为 0.01 m/s,变化加速度为 0.001 m/s²。

4.1.3 模拟的卫星钟差误差

所有卫星钟存在初始系统误差 0.6 m,卫星钟差变化速度 0.01 m/s,变化加速度为 0.001 m/s²。

4.2 改正数性能

利用 4.1 节模拟数据分别进行等效钟差及等效钟差加星历改正数的数据处理,分析等效钟差、等效钟差加星历改正数对卫星钟差和星历误差的改正性能。

从表 3 可以看出,等效钟差加星历改正数的处理模型基本可以消除卫星钟差和卫星星历误差的影响,相对于仅用等效钟差的修正方法,修正效果有了明显的提高。表 4 针对星历改正误差作专门分析。

从表 3、4 可以看出,从原理上讲等效钟差加星历改正数处理模型能有效地分离卫星钟差误差和卫星星历误差的影响,并且能够获得较高的修正精度。

4.3 误差分析

等效钟差改正数只能消除卫星星历误差在各站视线方向上的平均贡献,各测站观测数据在扣除等效钟差修正的平均贡献及其他误差(如大气延迟、多路径效应)后,剩余的残差和卫星星历误差在不同测站测距方向上的不同投影关系,可用来反解卫星星历误差。

等效钟差加星历误差改正处理技术的关键在于精确分离观测数据各项误差,力求对同一卫星的观测数据在改正相关误差后不同测站接收机的残项相近,关键是所有接收机观测值中的电离层延迟改正、对流层延迟改正、多路径效应修正、设备时延标定误差修正。

表 3 广域差分改正数性能统计表

单位/m

站号	1 号 GEO 卫星用户距离误差			11 号 MEO 卫星用户距离误差		
	不修正	等效钟差修正	等效钟差+ 星历改正数修正	不修正	等效钟差修正	等效钟差+ 星历改正数修正
1	-9.767 2	1.050 3	0.000 0	-1.024 3	-0.593 1	-0.000 1
2	-11.429 6	-1.299 6	0.000 0	-0.321 5	-0.577 8	0.000 0
3	-16.876 1	0.094 4	0.000 1	-1.759 1	4.825 1	0.000 0
4	-12.892 5	-0.966 8	0.000 0	-0.852 8	0.686 6	0.000 0
5	-6.503 5	2.317 0	0.000 0	-0.389 9	-1.955 7	0.000 0
6	-14.843 7	0.412 8	0.000 0	-1.547 8	3.322 5	0.000 1
7	-9.302 4	-0.214 1	0.000 0	-0.161 6	-1.459 6	-0.000 1
8	-8.137 2	1.882 9	0.000 0	-0.709 6	-1.075 8	0.000 0
9	-5.411 3	2.711 4	0.000 0	-0.208 0	-2.471 6	0.000 0
10	-15.365 7	0.064 3	0.000 0	-1.560 9	3.482 8	0.000 0
11	-8.249 8	1.164 6	0.000 0	-0.361 0	-1.332 9	0.000 0
12	-10.983 1	0.505 6	-0.000 1	-0.865 6	0.236 8	0.000 0
13	-12.646 2	-0.448 6	0.000 0	-0.968 0	0.843 3	-0.000 1
14	-14.544 3	-0.835 5	0.000 0	-1.261 5	2.061 0	0.000 0
15	-8.367 4	0.822 5	0.000 0	-0.278 8	-1.475 2	0.000 1
16	-10.232 4	0.240 4	0.000 1	-0.591 1	-0.504 6	0.000 0
17	-10.080 0	-0.032 7	0.000 0	-0.455 3	-0.794 3	0.000 0
18	-7.849 6	0.844 4	0.000 0	-0.137 5	-1.829 8	0.000 0
19	-15.981 5	-1.648 9	-0.000 1	-1.283 2	2.663 1	-0.000 1
20	-10.539 7	-0.448 9	0.000 0	-0.428 1	-0.723 6	0.000 0
21	-12.307 3	-1.109 6	0.000 0	-0.652 5	0.158 9	0.000 0
22	-8.536 1	0.286 9	0.000 0	-0.132 1	-1.695 4	0.000 0
23	-14.437 3	-1.824 8	0.000 0	-0.897 7	1.328 5	0.000 1
24	-11.218 1	-1.073 8	0.000 0	-0.364 2	-0.606 2	0.000 0
25	-11.496 8	-0.380 0	0.000 0	-0.709 3	0.021 2	0.000 0
26	-10.541 2	-1.046 5	0.000 0	-0.168 0	-1.059 6	0.000 0
27	-9.906 1	-1.067 6	0.000 0	0.073 1	-1.474 7	0.000 0

5 误差传播规律分析与控制

通过分析协方差矩阵可知，在 4.1 节数据仿真下，对最终星历改正数，观测误差和其它误差修正残差的综合放大效应平均约为 7.4×10^4 。第 3 节描述的方案显然不是一个稳定的计算方案，必须设计相应的误差控制算法。

5.1 误差传播控制方法

通过 C 波段双向时间频率传递和 L 波段星地无线电上下行时间同步技术，区域导航系统独立实现部分站间和星地间的时间精确同步。这样，等效钟差加星历改正数处理模型就可以利用系统的时间同步机制解决部分站及所有可视卫星的钟差。

本文将通过以下 3 种方法控制上述等效钟差加星历改正数处理模型的误差传播，降低最

表 4 等效钟差加星历改正数修正星历误差的性能统计

单位/m

历元		1号星			7号星			11号星		
		dx	dy	dz	dx	dy	dz	dx	dy	dz
0	改正值	86.685	96.928	34.887	34.558	-3.845	24.823	9.277	5.925	6.553
	改正精度	-0.007	-0.001	-0.001	-0.009	0.002	0.008	0.005	0.003	0.010
30	改正值	87.318	97.157	35.182	34.939	-3.958	25.082	9.478	6.138	6.636
	改正精度	-0.006	0.008	0.004	0.005	0.004	0.002	0.004	0.001	0.002
60	改正值	87.988	97.358	35.481	35.325	-4.076	25.334	9.677	6.351	6.724
	改正精度	0.041	0.042	0.004	0.012	0.007	0.005	0.005	0.001	0.002
90	改正值	88.601	97.616	35.786	35.723	-4.200	25.587	9.893	6.568	6.803
	改正精度	-0.017	0.016	-0.002	0.007	0.006	0.009	-0.010	-0.002	0.013
120	改正值	89.206	97.874	36.082	36.129	-4.336	25.817	10.085	6.780	6.909
	改正精度	0.015	0.013	0.001	0.007	0.006	0.009	0.000	0.001	0.002
150	改正值	89.823	98.115	36.381	36.513	-4.456	26.079	10.289	6.990	6.997
	改正精度	0.036	0.028	0.001	0.002	0.001	0.005	-0.001	0.001	0.001
180	改正值	90.490	98.318	36.676	36.894	-4.570	26.337	10.479	7.203	7.103
	改正精度	0.008	0.008	0.004	0.011	0.014	0.015	0.012	0.000	0.014
210	改正值	91.152	98.525	36.983	37.299	-4.713	26.572	10.703	7.417	7.174
	改正精度	0.014	0.006	0.004	0.003	0.001	0.001	-0.007	-0.004	0.005
240	改正值	91.798	98.728	37.277	37.658	-4.822	26.855	10.890	7.617	7.278
	改正精度	0.019	0.021	0.000	0.028	0.024	0.036	0.011	0.005	-0.009
270	改正值	92.389	98.994	37.574	38.066	-4.966	27.085	11.104	7.830	7.367
	改正精度	0.032	0.030	0.001	0.010	0.012	0.019	0.003	0.003	0.000

终结果对误差源的敏感程度。

(1) 多种观测资料联合处理

利用时间同步结果固定时间同步站的钟差及可视卫星钟差,在 4.1 节数据模拟下利用式 (3) 求解卫星等效钟差和星历改正数。通过协方差矩阵分析,最终星历改正数对观测误差和其它误差修正残差的综合的放大效应降到 68。

(2) 优化参数估计形式

通过分析卫星精密定轨的先验信息可知,定轨结果径向约束最强,一般径向定轨精度比较高。因此在卫星星历误差改正计算中,可以加入相应的参数权矩阵对参数估计进行约束。将参数估计形式改为 $\Delta R, \Delta T, \Delta N$ 的形式。

(3) 多历元联合处理

考虑到先验的长弧段(数天)动力学定轨结果中速度精度较高,一般优于 1 mm/s,因此可以忽略百秒时间跨度内卫星星历误差的变化。

等效钟差加星历改正数的处理方法,可以实现单历元解算。根据误差传播规律可知,如果采用多历元(n 个)平均值来计算星历改正数,则误差放大效应将缩小 \sqrt{n} 倍。假设用 100 个历元的结果作平均,则解算结果中误差综合放大效应将降到 7 左右。

5.2 算例分析

5.2.1 数据模拟

在 4.1 节数据仿真的基础上，加入时间同步数据。仿真的时间同步数据包括：4 个站间时间同步站 C 波段双向时间频率传递观测数据；对所有可视卫星的 L 波段星地无线电上下行观测数据；所有监测接收机观测数据、时间同步观测数据都加入了 1 ns 的随机噪声；各站观测数据中同时加入了 1 ns 的系统误差，符号随机。

5.2.2 数据处理

参与处理的卫星必须有 7 个以上的监测站共视。通过单历元的站间时间同步和星地时间同步观测数据，实时求解时间同步站站间钟差和所有可视卫星钟差^[12]，并作为固定值带入公式 (3) 进行处理。

5.2.3 处理结果

对等效钟差加星历改正数进行处理，可得统计结果见表 5、表 6。

表 5 带时间同步约束的等效钟差加星历误差改正数修正卫星星历误差性能统计
单位/m

星号	dx	dy	dz	位置误差
1	0.483	-0.338	-2.649	2.713
3	0.463	-0.338	-2.648	2.709
4	-1.922	-0.193	-1.303	2.330
6	-1.816	0.321	-1.097	2.145
7	0.172	1.921	-1.616	2.516
10	9.040	2.524	-3.259	9.935
11	0.169	1.559	-0.770	1.747
12	-1.370	-1.138	-1.038	2.061

注：各站观测数据加入系统误差 1 ns (符号随机)，1 ns 的随机噪声。

从表 5、表 6 可以看出，在时间同步体制下，等效钟差加星历误差改正数的处理结果稳定，能较好地分离星历误差和卫星钟差误差，且能够获得比较高的精度。

在实际的导航卫星动力学精密定轨中，短期(分钟级)预报的轨道误差不会显著变化，因此，用多历元处理结果的均值或者线性拟合结果预报数分钟的轨道改正数精度与上述结果基本一致。实际算例也证明了此观点，限于篇幅所限，本文不再赘述。

6 总 结

(1) 等效钟差加星历改正数处理方法关键在于：a) 观测数据的测距精度、通道一致性；b) 观测资料各项误差的精确扣除。主要误差为不同站对同一卫星的 C 值计算误差；次要误差为轨道初始状态误差引入的相对论效应、地球自转效应、投影关系计算误差等。

(2) 通过改变参数的估计形式并加入先验权重信息，加入时间同步观测数据等多种观测资料联合处理，采用冗余观测量等方式来增强法方程的强度，可有效降低处理结果对 (1) 中误差的敏感程度。

(3) 上述方案从理论上讲，只要 1 个历元的正常的、完整的观测数据即可完成卫星等效

表 6 带时间同步约束的等效钟差加星历误差改正数修正星历和卫星钟差后的用户距离误差
单位/m

站号	综合改正用户距离误差残差						
	1号星	3号星	4号星	7号星	10号星	11号星	12号星
1	-0.119	-0.130	-0.045	-0.141	*	0.125	0.012
2	0.014	0.003	0.014	0.019	0.170	-0.044	0.033
3	-0.080	-0.094	-0.216	-0.106	*	0.065	-0.193
4	-0.062	-0.074	-0.065	-0.053	*	0.021	-0.048
5	-0.146	-0.156	-0.030	-0.203	*	0.204	0.064
6	-0.116	-0.129	-0.177	-0.137	*	0.102	-0.149
7	-0.025	-0.036	0.029	-0.030	-0.165	0.011	0.072
8	-0.158	-0.168	-0.069	-0.211	*	0.206	0.011
9	-0.142	-0.151	-0.010	-0.205	*	0.211	0.095
10	-0.104	-0.117	-0.178	-0.120	*	0.082	-0.156
11	-0.102	-0.112	-0.010	-0.124	*	0.111	0.054
12	-0.119	-0.130	-0.075	-0.132	*	0.110	-0.032
13	-0.091	-0.103	-0.084	-0.090	*	0.059	-0.060
14	-0.085	-0.098	-0.128	-0.083	*	0.046	-0.113
15	-0.083	-0.093	0.004	-0.099	*	0.084	0.064
16	-0.091	-0.102	-0.034	-0.098	*	0.076	0.008
17	-0.068	-0.079	-0.013	-0.071	-0.146	0.049	0.027
18	-0.068	-0.078	0.024	-0.085	-0.063	0.072	0.086
19	-0.040	-0.053	-0.132	-0.030	*	-0.009	-0.129
20	-0.047	-0.059	-0.007	-0.045	*	0.022	0.027
21	-0.038	-0.050	-0.035	-0.028	0.167	-0.002	-0.017
22	-0.045	-0.056	0.029	-0.054	-0.283	0.038	0.082
23	-0.016	-0.028	-0.070	-0.001	0.493	-0.034	-0.068
24	-0.006	-0.018	0.006	-0.001	0.096	-0.024	0.029
25	-0.077	-0.088	-0.047	-0.075	*	0.048	-0.017
26	0.022	0.011	0.035	0.022	0.083	-0.043	0.061
27	0.075	0.063	0.070	0.061	0.154	-0.076	0.098

注：“*”表示当前站对此卫星不可见。

钟差和星历误差改正数的计算，可以用于卫星轨道机动或者卫星故障后的轨道快速恢复，也可用于区域导航系统广域差分的精密服务。

(4) 在观测资料随机噪声为 1 ns、 C 值计算误差为 1 ns 的条件下，星历误差平均修正精度为 3.27 m，最大修正误差 9.9 m；综合修正各测站用户距离误差的平均精度为 0.098 m，最大修正误差 0.177 m。

参考文献:

- [1] 雷辉, 胡小工, 黄城. 天文学进展, 2008, 26(2): 192
- [2] 陈刘成, 李建文, 唐波. 武汉大学学报(信息科学版), 2007, 32(7): 609
- [3] 陈刘成. 博士学位论文, 郑州: 解放军信息工程大学, 2006: 62

- [4] 周建华. 博士学位论文, 南京: 南京大学, 1992: 63
- [5] 赵齐乐. 博士学位论文, 武汉: 武汉大学, 2004: 42
- [6] Brown R G, Navigation, Journal of the Institute of Navigation, 1997, 44(4): 425
- [7] Brown A, Navigation, Journal of The Institute of Navigation, 1989, 36(3): 125
- [8] Loomis P V M, Denaro R P, Saunders P. IEEE PLANS'90 - Position Location and Navigation Symposium. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 1990: 593
- [9] Breivik K, FORSELL B, Kee C *et al.* Navigation, Journal of the Institute of Navigation, 1997, 44(1): 43
- [10] Kee C, Parkinson B W, Axelrad P, Navigation, Journal of The Institute of navigation, 1991, 38(2)
- [11] Pogorelc S, Lorenz M, Murdock K *et al.* Stanford Telecommunications, 1995: 247
- [12] 刘利. 博士学位论文, 郑州: 解放军信息工程大学, 2004: 36

The Models and Arithmetic for WADS Real-time Corrections of Regional Satellite Navigation System

CHEN Liu-cheng¹, HU Xiao-gong², FENG Xin¹, CHANG Zhi-qiao¹

(1. Beijing Global Center of Information Application and Development, Beijing 100094;

2. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030)

Abstract: To solve the problems, such as the poor predicted orbit results of navigation satellite, or the quickly orbit determination recovery after satellite failure or maneuver, on board of regional satellite navigation system, some WADS technology based on time synchronization are studied, and a new ephemeris correction arithmetic based on single epoch observation is excogitated other than traditional dynamics methods, which improves the WADS system of local area satellite navigation system. The raw of error transform is analyzed through the covariance matrix information, as well as the improved method to minimize error impactation. The simulated data processing results show that the added ephemeris and the equivalent clock correction data based on observations from monitor and time synchronization equipments can lead to high precise ephemeris and satellite clock parameters for user in real time. What impact the performance of the corrections are the observation's quality and other error correction precisions instead the initial orbits, the satellite clock or the time span of the new observations. The ephemeris correction more precise than 5 m can be achieved, even 1 ns system error and 1 ns noise left behind.

Key words: satellite navigation; wide area difference; time synchronization; ephemeris error; covariance analyze