

一种基于 GEO 星间链路的导航系统时间同步新体制

郑 坤¹ 董绪荣¹ 杨 洋¹ 李晓宇¹

¹ 装备学院,北京,101416

摘 要:设计提出了一种时间同步新体制,即在 GEO 卫星上放置高精度氢钟,并在 GEO 卫星间建立高精度星间链路以进行高精度时间维持,利用两种方案进行了仿真比较研究。仿真结果表明,本文提出的方案切实可行,可以显著提升时间同步精度,尤其是自主时间同步精度,并得出了时间同步精度与星间链路精度和星载钟的精度关系。仿真结果表明,星载钟精度对新体制时间同步精度的影响相对于星间链路精度的影响较小。

关键词:GEO;星间链路;UKF;时间同步

中图法分类号:P228.41 文献标志码:A

现阶段的卫星导航系统时间的高精度的维持主要采用地面站测控模式,未来各国将利用星间测距提高系统的服务能力(轨道维持和时间维持),GPS/GLONASS/GALILEO 都有实施星间链路的计划,星间链路的成功实施将极大地提高轨道和钟差的确定精度。2008 年,欧空局的 Svehla 基于星间链路和光钟及超稳晶振提出了一种时间同步新体制方案^[1],即在 GEO 上装载高精度光钟,非 GEO 卫星上装载超稳晶振,利用双向时间同步由 GEO 星载钟向非 GEO 卫星钟授时。仿真结果表明,该体制可以大幅提高导航系统的时间同步精度,并将大幅降低导航系统成本。

在新体制方案中,超稳晶振将取代传统的原子钟,超稳晶振具有短稳好、长稳差的特点,其短稳精度超氢钟,因此需要一个高精度的基准较为频繁地进行授时。光钟是新一代的原子钟,其钟差精度可达 10^{-17} 量级,光钟的引入可以改变现有的时间同步体制,此时天上的光钟可以和地面站的钟一样作为时间基准,但光钟的应用难度较大,无法进行星地时间同步(星地链路精度低,在 ns 级到亚 ns 级(长时间的观测)),并且光钟小型化还需要进一步研究。现阶段已研制并运用于导航系统高精度的星载原子钟为氢钟,其钟差精度为 10^{-13} 量级,在没有外部时间基准的情况下,仅用氢钟做基准,其精度无法满足新体制的要求。

本文借鉴 Svehla 的构想,提出了一种新的时间同步体制方案。其基本思想是利用高精度星间

链路维持的 GEO 星载钟代替 Svehla 方案中的光钟以提供基准,降低技术实现难度,提高时间同步体制精度。本文提出的新体制可以工作在有地面站支持的模式(经常性模式)和无地面站支持的模式(自主导航模式)下。在经常性模式中,可以与地面站的钟进行时间同步,建立统一的时间基准一起授时(增加了卫星可见时间),以提高时间同步精度。在没有地面站支持模式下,将继续作为高精度的时间基准,保证整个系统的授时精度。本文主要讨论了新时间同步体制下在自主导航模式下的应用。

1 新体制下自主时间同步的方案设计

导航系统自主时间同步新体制设计如下。

1) 基于新体制导航卫星星座设计。①基准星,具有星间测距功能和星间通信载荷,基准星的钟差参数精确已知,作为卫星网绝对状态的基准出现。一般选用混合导航星座中的地球静止轨道卫星(GEO 卫星)。当星座中存在 N 颗 GEO 卫星时,将 N 颗 GEO 卫星的钟差进行时间同步,作为时间基准,产生系统时间。②自主时间同步卫星,具有星间测距功能和星间通信载荷,一般指混合导航星座中的非 GEO 卫星。其中每颗卫星都能够独立实现星间观测、数据处理、数据传输等功能,可以完成星间相互测距和收发信号,进行自身

收稿日期:2013-09-04

项目来源:国家自然科学基金资助项目(41274043)。

第一作者:郑坤,博士生。主要从事精密定轨及时间同步、导航数据处理研究。E-mail: kunsword@gmail.com

的时间预报。

2) 星座卫星钟配置设计。新体制中的 GEO 卫星采用更高精度的星载原子钟作为时间基准。目前,已研制并运用于导航系统高精度的星载原子钟为氢钟,本文将研究被动氢钟作为时间基准。非 GEO 卫星采用普通星载原子钟或超稳定晶体振荡器。

3) 基于自主时间同步新体制的链路设计。新体制下,导航自主时间同步的链路设计为星间链路。星间链路包含了 GEO 卫星与非 GEO 卫星间的授时链路,及非 GEO 卫星之间的时间同步链路。非 GEO 卫星星间链路采用 UHF/Ka 频段进行通信,GEO 卫星星间采用激光星间链路。

4) 基于新体制的自主时间同步方法设计。基于对新体制星间链路的设计,新体制自主时间同步方案为:GEO 与非 GEO 卫星间以及非 GEO 卫星之间的星间链路采用星间双向时间频率传递法,GEO 卫星间采用基于激光链路的双向时间频率传递法。

5) 时间同步数据处理算法。方案中需要 GEO 间进行时间同步,以维持高精度的时间基准,由于 GEO 卫星总数较少,星间拓补结构较差,会带来滤波发散以及滤波精度低的问题,因此,算法也是需要考虑的一个问题。在本文中,GEO 间的时间同步使用 UKF,仿真结果表明,UKF 切实可行。由于 GEO 高精度基准的存在,EKF 算法就能很好地适用于 GEO 卫星与非 GEO 卫星间的时间同步。

基于以上方案设计,新体制下的自主时间同步运行模式及链路关系如图 1 所示。

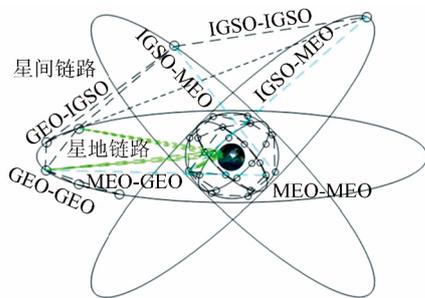


图 1 新体制下的运行模式及链路关系示意图

Fig. 1 Diagram of New System

在 GEO-GEO 星间链路中,由于两颗同步卫星间的相对运动较小,使得激光星间链路拓补结构比较固定,链路的瞄准、跟踪、捕获难度降低,几乎没有大气衰减。GLONASS-K 系列卫星上就增加了激光固定拓扑星间链路,利用激光脉冲实现高精度星间时间同步和中等速率的星间交换

(50 kb/s),目前,其激光星间测量设备已完成在轨技术试验。

借鉴星间链路高精度时间维持的思想,将星间链路进行时间同步的方法应用到 GEO 星载钟的高精度维持中,即在 GEO 之间建立星间链路进行测距,借助滤波算法实现 GEO 卫星的高精度维持。采用两类算法进行仿真分析,即星间分布式 UKF 算法下的高精度 GEO 星载钟的精度维持和星间整网 UKF 算法的高精度 GEO 星载钟的精度维持。

在分布式 GEO 星载钟的高精度维持方法中,GEO 卫星间建立高精度星间链路,每颗 GEO 卫星只需准确估计自己的状态。但由于星间测距观测值在星座卫星状态之间产生关联,因此每颗 GEO 卫星又需要其他卫星的状态作为观测方程的线性化展开点,在分布式 GEO 高精度维持中,相关的卫星钟差和协方差信息通过星间链路传递到正在滤波计算的卫星。

在集中式 GEO 星载钟高精度维持方法中,将特定的时间 $[t_0 \ t]$ 上得到的 GEO 之间的观测值 $Z = [Z_1 \ Z_1 \ \dots \ Z_m]^T$ 统一通过星间链路发送到 GEO 中心星,中心星通过状态转移矩阵将测量信息归算到某一历元(如初始历元 t_0)进行整体平差。

2 时间同步算法模型

2.1 时间同步测量模型

设星座中建立链路的两颗卫星分别为 S_i 和 S_j ,针对某一参考历元 t_k ,可以写出星间双向测量方程分别为^[4]:

$$\rho_{ij} = D + c \cdot \delta t_i - c \cdot t_j + n_{ij} \quad (1)$$

$$\rho_{ji} = D + c \cdot \delta t_j - c \cdot t_i + n_{ji} \quad (2)$$

式中, ρ_{ij} 、 n_{ij} 分别表示从卫星 S_i 到 S_j 的激光测距和测量噪声; ρ_{ji} 、 n_{ji} 分别表示从卫星 S_j 到 S_i 的激光测距和测量噪声; δt_i 、 δt_j 分别表示卫星 S_i 和 S_j 的钟差,亦可用 a_{0i} 和 a_{0j} 表示; c 表示光速; D 表示卫星 S_i 和 S_j 之间的几何距离,

$$D = \sqrt{[(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2]}$$

式(1)减去式(2),得:

$$\rho_{ij} - \rho_{ji} = 2c(\delta t_i - \delta t_j) + n_p$$

式中, n_p 表示双向激光测量噪声,视为零均值的高斯白噪声。

依据测量误差传播律,则卫星 S_i 的时钟测量噪声方差为:

$$\sigma_{\delta t_i}^2 = \frac{1}{2c^2} \sigma_p^2 + \sigma_{\delta t_j}^2$$

式中, σ_p^2 表示星间等效激光方差; $\sigma_{\theta_j}^2$ 表示卫星 S_j 的时钟相位方差。

2.2 时钟误差测量方程

导航卫星系统中使用的高精度原子时钟频标的振荡周期变化由系统变化和随机变化组成。在同一瞬时, 时钟给出的时刻和标准时刻之间的差值称为钟差 $x(t)$ 。一般采用二次多项式对时钟钟差进行建模^[4]:

$$x(t) = a_0 + a_1(t - t_0) + \frac{1}{2}a_2(t - t_0)^2 + \epsilon_x(t)$$

式中, 等号右边前三项表示时间系统误差参数; a_0 表示时钟的初始相位(时间)偏差; a_1 表示原子钟的初始频率偏差; a_2 表示原子钟的线性频率漂移率; $\epsilon_x(t)$ 表示时钟受噪声影响引起的时间偏差的随机变化分量; t_0 表示参考时刻。

2.3 时钟状态测量方程

若考虑频率漂移变化的影响, 星载原子时钟系统模型可以采用 3 个状态分量的线性离散系统来表示, 即

$$x_k = \varphi_{k-1}x_{k-1} + W_{k-1}$$

式中, $x_k = \begin{bmatrix} a_{0,k} \\ a_{1,k} \\ a_{2,k} \end{bmatrix}$; $\varphi_{k-1} = \begin{bmatrix} 1 & \tau & \tau^2/2 \\ 0 & 1 & \tau \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$, $W_{k-1} =$

$[\omega_{\varphi,k-1} \quad \omega_{f,k-1} \quad \omega_{a,k-1}]^T$; $a_{0,k}$ 、 $a_{1,k}$ 、 $a_{2,k}$ 分别表示 t_k 历元的卫星时钟偏差(相位误差)、频率偏差和频率漂移率; τ 表示滤波周期; $\omega_{\varphi,k-1}$ 、 $\omega_{f,k-1}$ 、 $\omega_{a,k-1}$ 分别表示 t_{k-1} 历元的时钟相位噪声、频率噪声和频率漂移率噪声。

3 仿真试验及结果分析

3.1 星载原子钟及超稳晶振的仿真

星载原子钟的噪声的详细分析见文献^[4], 仿真过程中 Allan 方差的典型取值及仿真方法见文献^[2]。对于超稳晶振, 没有直接的实验室结果数据, 也没有很好的人工合成晶振频率噪声的数学模型。本文采用 ACES 提供的 Allan 方差值(见表 1)反演 Allan 方差晶振各主要噪声成分的频率误差序列, 然后叠加。

在已知 5 个以上 Allan 方差值时, 可采用最小二乘法进行求解, 解算出 Allan 方差各项噪声系数如下: $h_{-2} = 1.00 \times 10^{-13}$, $h_{-1} = 8.82 \times 10^{-14}$, $h_0 = 8.88 \times 10^{-14}$, $h_1 = 9.67 \times 10^{-14}$, $h_2 = 1.23 \times 10^{-13}$ 。由此可以进一步计算任意 τ 所对应的 Allan 方差值^[5]。

表 1 ACES 超稳晶振(USO)Allan 方差及其间隔

Tab. 1 ACES Ultra-stable Crystal Oscillator (USO) Allan Variance with Interval

间隔/s	1	2	4	10	20	40	100	200	400	1 000
Sigma/ 10^{-13}	1.49	1.26	1.00	0.882	0.888	0.967	1.23	1.30	1.20	2.25

3.2 仿真条件设置

仿真所采用的导航星座参数见表 2。

GEO 星间链路采用激光测量, 测量误差总计考虑 3 cm(1σ), 测量频度 60 min/次。星间链路(GEO-MEO/IGSO/, 非 GEO 卫星间)采用 Ka 链路, 测量误差总计考虑 0.1 m(1σ)。最小观测仰角设为 5° , 链路数目为 6 条。

初始星载钟误差 σ_{X_0} 及协方差矩阵 P_{X_0} 按照氢钟、铷钟和铯钟、光钟、超稳晶振分别设为如下:

$$\sigma_{X_0,H} = [2 \times 10^{-10} \quad 0 \quad 0]$$

$$P_{X_0,H} = \text{diag}[4 \times 10^{-20} \quad 0 \quad 0]$$

$$\sigma_{X_0,Rb,Cs} = [2 \times 10^{-9} \quad 0 \quad 0]$$

$$P_{X_0,Rb,Cs} = \text{diag}[4 \times 10^{-20} \quad 0 \quad 0]$$

$$\sigma_{X_0,O} = [1 \times 10^{-10} \quad 0 \quad 0]$$

$$P_{X_0,O} = \text{diag}[1 \times 10^{-20} \quad 0 \quad 0]$$

$$\sigma_{X_0,uso} = [1 \times 10^{-9} \quad 0 \quad 0]$$

$$P_{X_0,uso} = \text{diag}[1 \times 10^{-18} \quad 0 \quad 0]$$

为了更好地反映新体制的特点, 仿真中选取了自主导航模式下的 4 个方案: ① 传统的时间同步模式; ② 无 GEO 星间链路的新体制模式; ③ 星间分布式新体制模式; ④ 星间集中式新体制模式, 仿真天数为 60 d。方案设计详见表 3。

表 2 仿真星座各卫星轨道参数

Tab. 2 Parameters of Constellation

轨道参数	MEO 卫星		IGSO 卫星			GEO 卫星		平经度
	星座构型	轨道高度/km	轨道倾角	交点地理经度	轨道倾角	卫星数目	卫星数目	
数值	Walker 27/3/2	27720	55°	120°	55°	3	5	$60^\circ, 80^\circ, 110^\circ, 140^\circ, 160^\circ$

表3 仿真方案设计
Tab.3 Simulation Scheme

方案	GEO卫星	非GEO卫星	测量方式
①	铷钟/铯钟	铷钟/铯钟	传统Ka ISLs
②	氢钟	铷钟/铯钟	新体制(无GEO ISLs)
③	氢钟+激光 ISLs	超稳晶振	新体制(分布式)
④	氢钟+激光 ISLs	超稳晶荡	新体制(集中式)

3.3 仿真结果及分析

图2为方案①到方案④的星座整体漂移和卫星同步误差分布图。图2中,星座整体时间漂移

是指在滤波后,导航星座中所有星载钟钟差的平均值,即星座时间相对于主控站时钟的漂移。公式为:

$$Clk_{ave} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Clk_i$$

式中, Clk_{ave} 为星座平均时间; n 为星座中的卫星数; Clk_i 为每颗卫星钟的时间。星座整体时间漂移反映了滤波后星座整体时间相对于主控站时钟的漂移量。

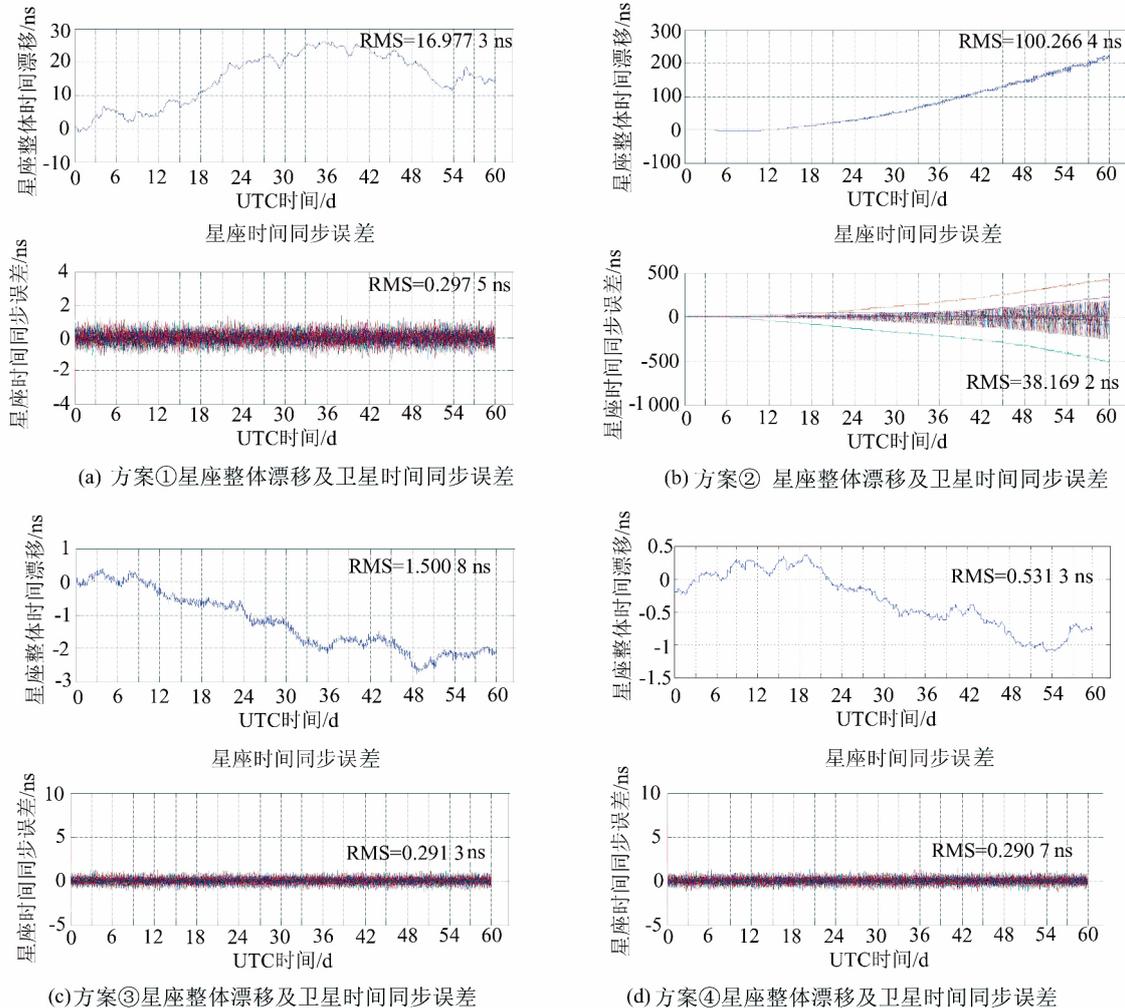


图2 4种方案星座整体漂移及卫星时间同步误差

Fig.2 Constellation's Time Drift and Satellite Synchronization Error of Four Schemes

星间时间同步误差是指各星载卫星钟相对于导航星座平均时刻的钟差,其公式为:

$$\delta t_i = Clk_i - Clk_{ave}$$

其中, δt_i 为每颗星载钟与星座平均钟面时刻的差值; Clk_i 为各星载钟的钟面时刻。

方案①是传统星间链路时间同步模式,星座钟设置为铷钟/铯钟,其星座平均漂移时间RMS为16.98 ns,漂移最大值约为25 ns(图2(a))。方案②为无GEO星间链路的新体制方案,GEO

卫星作为导航星座的时间基准,它的误差决定着星座的整体时间漂移,由于被动式氢钟的性能所限,每天漂移约1 ns,在60 d的仿真中,星座整体时间漂移最大值约为210 ns,RMS为100.27 ns(图2(b))。方案③是采用分布式基于GEO星间链路的新体制方案,从图2(c)可以看出,滤波后,星座整体时间漂移的最大值小于3 ns,星座整体时间漂移RMS为1.50 ns,精度远高于传统的星间链路时间同步模式。图2(d)是方案④的结果,

星座整体时间漂移的最大量约为 1 ns,星座整体时间漂移 RMS 为 0.53 ns,方案精度远高于方案①传统星间链路时间同步模式,并高于方案③分布式新体制模式。同时,仿真结果表明,在新体制下,超稳晶振可以完全替代现有的星载原子钟。

4 GEO 星间链路精度与原子钟对 GEO 时间维持的影响研究

为了研究新体制下星间链路和原子钟对新体制中 GEO 时间维持的影响,本文将被动氢钟和铷钟分别装载在 GEO 卫星上,按照前面的仿真条件进行了集中式和分布式的仿真,仿真时间为 200 d。限于篇幅,这里只给出了分布式的结果。

表 4 是分布式时间同步下星间链路精度与钟性能的关系分析。无论是星座漂移时间精度,还是时间同步误差精度,随着星间链路精度的不断提高,GEO 漂移时间精度和时间同步误差精度都相应提高。在同种算法和同种 GEO 星间链路精度上,氢钟的误差要略好于铷钟的误差,其中当星间链路测距精度为 1 cm 时,氢钟星座时间漂移精度随着链路精度的提高而继续提高,而铷钟的性能提高得并不显著,这时星载钟性能的优势才能显现,集中式的精度略高于分布式,规律一致。

仿真结果表明,GEO 星载钟的高精度时间同步精度与星间链路的精度和钟性能有关,测距精度在一定精度以内,钟的性能对 GEO 星载钟时间同步的影响较小,在测距精度足够高时,钟的性能对时间同步的影响越重要。在现有的星间链路测距精度条件下,被动式氢钟就能满足导航星座的要求。

表 4 分布式下时间同步与星间链路精度和钟性能的关系分析(仿真时间 200 d)

Tab.4 Time Synchronization with ISLs Accuracy and Clock Under Distributed

测距误差/m	钟类型			
	H-masers		Rb-masers	
	时钟漂移 RMS/ns	同步误差 RMS/ns	时钟漂移 RMS/ns	同步误差 RMS/ns
0.3	32.42	0.32	33.29	0.40
0.1	10.79	0.12	12.45	0.13
0.05	5.40	0.064	7.91	0.07
0.01	1.08	0.02	5.54	0.025
0.005	0.55	0.006	5.42	0.021
0.001	0.15	0.0014	5.36	0.019

5 结 语

本文设计的基于高精度 GEO 星间链路维持的导航系统时间同步新体制相对于传统的星间链路时间同步模式具有巨大的优越性,在新体制下,超稳晶振可以完全取代现有的星载原子钟,降低了导航系统的建设成本,并且新体制可以解决传统星间链路模式下星座时间漂移的问题。星座整体漂移精度提高约 28 倍(集中式)和 11 倍(分布式)。本文还研究了星间链路精度和钟的类型对 GEO 高精度时钟维持的影响。

参 考 文 献

- [1] Svehla D. A Novel Design for the Navigation System and Proposal to Unify the Timing and the Positioning System Using GIOVE Follow-on[C]. ACES and Future GNSS-Based Earth Observation and Navigation, Munich, Germany, 2008
- [2] Diez J, D'Angelo P, Fernández A. Clock Errors Simulation and Characterisation[C]. ION GNSS 19th International Technical Meeting of the Satellite Division, Fort Worth, Texa, 2006
- [3] Wang Jianqi, Cao Xibin. Research on Spacecraft Autonomous Navigation Based on UKF Algorithm[J]. *Flight Dynamics*, 2004, 22(2): 41-44(王建琦, 曹喜滨, 孙兆伟. 基于 UKF 算法的航天器自主导航研究[J]. *飞行力学*, 2004, 22(2): 41-44)
- [4] Shuai Ping, Qu Guangji. Time Synchronization Techniques of the Autonomous Navigation of Navigation Constellation[J]. *Journal of Astronautics*, 2005, 26(6): 768-772(帅平, 曲广吉. 导航星座自主导航的时间同步技术[J]. *宇航学报*, 2005, 26(6): 768-772)
- [5] Kou Yanhong, Zhang Qishan. A Method for Simulating the Crystal Oscillator Errors in GPS Receiver[J]. *Journal of Electronics and Information Technology*, 2004, 26(8): 1 319-1 323(寇艳红, 张其善. GPS 接收机晶振误差的模拟方法[J]. *电子与信息学报*, 2004, 26(8): 1 319-1 323)
- [6] Zhang Yulin, Fan Li, Zhang Yan, et al. Theory and Design of Satellite Constellations[M]. Beijing: Press of Science, 2008: 212-233(张育林, 范丽, 张艳, 等. *卫星星座理论与设计*[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 212-233)

(下转第 1247 页)

Extraction of the Floor Area Ratio in the Central District of Fuzhou City Based on an Improved Shadow Index Model

LIU Hui^{1,2}

1 College of Environment and Resources, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China

2 Institute of Remote Sensing Information Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China

Abstract: This paper presents a new method that combines PCA with HSI to differentiate and extract construction shadows from high resolution remote sensing images and then calculates each block floor area ratio by using regression analysis. The proposed method reduces the complexity and instability when extracting floor area ratios using the traditional method. Taking downtown Fuzhou as an example, we extracted the construction shadow and floor area ratio by the new method, to compare and validate it against the traditional method. The results show that the shadow index from the new method is more reliable and precise than results obtained from the traditional approach.

Key words: floor ratio area; shadow index; shadow detection; remote sensing image

First author: LIU Hui, PhD, lecturer, specializes in land use planning and land information technology. E-mail: liuhui_fzu@163.com

Foundation support: The Natural Science Foundation of Fujian Province, China, No. 2011J05109.

.....
(上接第 1167 页)

A New Time Synchronization System Based on the GEO ISLs

ZHENG Kun¹ DONG Xurong¹ YANG Yang¹ LI Xiaoyu¹

1 The Academy of Equipment, Beijing 101416, China

Abstract: A new GNSS time synchronization system is designed and presented in this paper, the new system place hydrogen maser on the GEO satellite, establishing a high-precision inter-satellite link between the GEO satellites to maintain a high-precision time. The proposed two scenarios were simulated and compared, simulation results show that the proposed new system is feasible and can significantly enhance the accuracy of time synchronization, especially the accuracy of independent time synchronization. And the relationship of time synchronization accuracy with the clock and ISLs is analyzed. The simulation results show that the accuracy of ISLs is more important.

Key words: GEO; ISLs; UKF; time synchronization

First author: ZHENG Kun, PhD candidate. His major research interests are precise orbit determination, time synchronization and navigation data processing. E-mail: kunsword@gmail.com

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, No. 41274043.