

文章编号: 1001- 2486(2010) 04- 0019- 06

基于脉冲星观测的导航星座自主导航数据融合方法*

朱俊¹, 陈忠贵^{1,2}, 廖瑛¹, 文援兰¹

(1. 国防科技大学 航天与材料工程学院, 湖南 长沙 410073; 2. 中国空间技术研究院, 北京 100094)

摘要:为解决完全依赖基于星间观测的导航星座长期自主导航的基准秩亏问题, 提出基于脉冲星和星间链路的组合导航方法。给出了该方法的基本原理。为合理分散计算, 采用简化和改进后的广义联邦滤波算法来对两种观测数据进行融合。仿真试验对该方法的合理性和可行性进行了验证。

关键词:自主导航; 导航星座; 星间链路; X 射线脉冲星; 数据融合

中图分类号: V443.5 文献标识码: A

A Data Fusion Method for Navigation Constellation Autonomous Navigation Based on X-Ray Pulsar

ZHU Jun¹, CHEN Zhong-gui^{1,2}, LIAO Ying¹, WEN Yuan-lan¹

(1. College of Aerospace and Material Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China)

Abstract: To solve the problem of deficiency of rank existing in navigation constellation long-time auto-navigation based on inter-satellite measurement, a method of integrated navigation based on the Inter-Satellite Links (ISL) and X-ray Pulsar was proposed. The fundamentals of this method were described. To rationalize the computational burden, the generalized federated filters were simplified and improved to fuse the measurements based on ISL and X-ray Pulsar. Finally, the simulation was carried out, and the results proved the rationality and feasibility of this method.

Key words: autonomous navigation; navigation constellation; Inter-Satellite Links; X-ray pulsar; data fusion

卫星导航系统自主导航具有重大意义, 是新一代卫星导航系统的发展趋势。实现卫星导航系统自主导航的重要基础和核心技术是基于星间链路的星间通信和测量技术。美国 GPS 系统自 BLOCK IIR 开始增加星间链路功能, 目前已成功发射 BLOCK IIF 卫星, 其自主导航能力已得到初步验证^[1]。

国内对导航系统自主导航还处在理论研究和方案论证阶段, 研究主要集中在解决导航星座完全依赖星间链路进行自主导航时缺少绝对时空基准的问题。文献[2]对星-星跟踪自主定轨中的亏秩问题给出了证明; 文献[3]提出在星间测距的基础上根据轨道先验信息对星座定向参数进行约束, 该方法受限于轨道面定向参数的长期预报精度; 文献[4-5]提出增加星敏感器测量信息来提供绝对的空间基准, 对星敏感器的测量精度提出了较高要求; 文献[6]提出增加若干地面发射源, 但该方法并没有完全脱离地面支持。在导航算法方面, 国内学者^[7]则主要从定轨精度出发, 基于大地测量学中整网平差的思想提出整网定轨算法, 该方法理论上能得到全局最优解, 但计算量大, 难以满足星载计算的实时性要求。

X 射线脉冲星能以非常稳定的周期向宇宙间发射 X 射线脉冲信号, 成为宇宙中稳定的信标站, 为航天器提供时空基准^[8]。因此, 基于 X 射线脉冲星的单星自主导航技术近年来受到广泛关注, 文献[9]对脉冲星应用于导航星座卫星的自主导航进行了初步尝试, 得到一些有益的结论。

联邦滤波在导航数据融合领域应用广泛^[11-12]。本文充分利用两种导航方法的特点, 提出基于脉冲星和星间测距组合的星座自主导航方式, 并提出一种改进并简化的广义联邦滤波器来进行数据融合, 对计算进行适当分散。该方法能有效融合两种测量数据, 利用脉冲星为导航星座提供绝对的时空基准, 再

* 收稿日期: 2010- 04- 16

基金项目: 国家 863 计划项目 (2007AA12Z308); 国家部委基金项目 (9140A21060107KG0173)

作者简介: 朱俊(1981-), 男, 博士生。

利用星间相对观测, 约束星座的几何结构, 提高星座的整体导航精度。

1 基于脉冲星和星间测距的自主导航原理

基于脉冲星和星间链路的导航星座自主导航的基本原理是: 利用基于脉冲星的单星导航原理, 在星座全部或部分卫星上利用脉冲星观测信息进行自主导航, 得到绝对时空基准; 通过星间链路建立整网约束, 利用数据融合算法融合星间相对测距信息对单星定位结果进一步改进, 提高星座的整体导航精度。

1.1 脉冲星到达时间测量模型

脉冲到达时间是导航中的基本测量量, 脉冲星的第 N 个脉冲到达卫星的预报时间为^[13]

$$T_{obsN} = t_{0N} - \frac{\hat{\mathbf{n}} \cdot \mathbf{r}_N}{c} - \frac{1}{2cD_0} [(\hat{\mathbf{n}} \cdot \mathbf{r}_N)^2 - r_N^2 + 2(\hat{\mathbf{n}} \cdot \mathbf{b}_N)(\hat{\mathbf{n}} \cdot \mathbf{r}_N) - 2(\mathbf{b}_N \cdot \mathbf{r}_N)] - \frac{2\mu_s}{c^3} \ln \left| \frac{\hat{\mathbf{n}} \cdot \mathbf{r}_N + r_N}{\hat{\mathbf{n}} \cdot \mathbf{b}_N + b_N} + 1 \right| - \frac{C}{f_0^2} - \Delta_{E\odot} \quad (1)$$

式中, t_{0N} 表示第 N 个脉冲到达太阳系质心 (Solar System Barycenter, SSB) 惯性系原点处的时间, 由脉冲星的相位时间模型给出; $\hat{\mathbf{n}} = [\cos \lambda \cos \alpha \quad \cos \lambda \sin \alpha \quad \sin \lambda]^T$ 为脉冲星的单位方向矢量, α 、 λ 为脉冲星在 SSB 中的赤经和赤纬, D_0 为脉冲星距 SSB 原点的距离, 由脉冲星数据库给出; \mathbf{b}_N 为 SSB 原点相对于太阳中心的位置, 由太阳系星历信息计算; μ_s 为太阳系引力常数, c 为光速; 式(1)等号右边的第二项是一阶的多普勒延迟, 第三项是由周年视差效应引起的, 这两项合称为 Roemer 延迟; 第四项是 Shapiro 延迟效应; 第五项是星际等离子体的色散延迟, 其中 C 为色散常数, f_0 为观测频率; $\Delta_{E\odot}$ 为相对论效应延迟; \mathbf{r}_N 是由动力学方程预报的卫星在 SSB 中的位置。

式(1)需要提供精确的太阳系星历信息来确定 SSB 的位置和太阳的引力场参数。若令 \mathcal{E} 为卫星实际测量到的脉冲到达时间与预报时间之差, \mathcal{E}_N 为真实位置和预估位置的偏差, 则

$$c\mathcal{E} = \hat{\mathbf{n}} \cdot \mathcal{E}_N + c \cdot \delta\tau_{\varphi} + v_T \quad (2)$$

式中, $\delta\tau_{\varphi}$ 为卫星钟差, v_T 表示测量噪声。利用多个不同脉冲星的测量结果可解得卫星的三维位置偏差和钟差, 解得的结果需进一步转换到地心惯性系。

1.2 星间相对测距模型

考虑到影响星间测距的主要误差源, 卫星 i 、 j 之间的双向伪距测量值可以表示为

$$\begin{cases} \rho^j = R^j + c\delta\tau_{\varphi}^- - c\delta\tau_{\varphi}^+ + Tx^i + pd^j + Rc^j + \mathcal{P}^j \\ \rho^i = R^i + c\delta\tau_{\varphi}^- - c\delta\tau_{\varphi}^+ + Tx^j + pd^i + Rc^i + \mathcal{P}^i \end{cases} \quad (3)$$

其中, ρ^j 表示卫星 i 发射信号, 卫星 j 接收信号; R^j 、 R^i 表示两卫星之间的真实几何距离; $\delta\tau_{\varphi}^+$ 、 $\delta\tau_{\varphi}^-$ 表示两卫星的钟差; Tx^i 、 Tx^j 表示两卫星发射设备硬件延迟; pd^j 、 pd^i 表示两卫星之间的等离子层对信号的延迟误差; Rc^i 、 Rc^j 表示两卫星接收设备硬件延迟; \mathcal{P}^i 、 \mathcal{P}^j 表示两卫星接收机噪声。

除了电离层延迟改正外, 星间双向测量伪距还需要进行信号发射机延迟改正、信号接收机延迟改正等。同时还需要将式(3)归算到同一时刻, 从而得到用于时间同步计算的观测值

$$Z_c = \frac{\rho^j - \rho^i}{2c} = \delta\tau_{\varphi}^- - \delta\tau_{\varphi}^+ - \frac{v_i^j}{c} \quad (4)$$

以及用于定轨计算的测量值

$$Z_\rho = \frac{\rho^j + \rho^i}{2} = |\mathbf{r}^i - \mathbf{r}^j| + v_\rho^j \quad (5)$$

式中, v_i^j 、 v_ρ^j 分别为钟差和伪距各种测量噪声之和。式(4)、(5)包含了两颗共视卫星的相对位置和相对钟差, 因此, 距离观测值可以实现导航卫星的相对导航。

2 导航星座自主导航的数据融合算法

2.1 状态方程

导航星座自主导航的状态方程中包括卫星轨道状态参数和星载时钟状态参数,是一个非线性连续时变系统,通常在参考点进行线性化离散,在地心惯性坐标系中,直接给出卫星 i 的离散系统状态方程为

$$\delta X_i(t_{k+1}) = \phi_i(t_{k+1}, t_k) \delta X_i(t_k) + W_i(t_k) \quad (6)$$

式中, $\delta X_i = [\delta x_i \ \delta y_i \ \delta z_i \ \delta v_{x,i} \ \delta v_{y,i} \ \delta v_{z,i} \ \delta \tau_{e,i} \ \delta \tau_{r,i}]^T$; W_i 为系统过程噪声向量, $i = 1, \dots, N$, N 表示星座卫星数目。 $\phi_i(t_{k+1}, t_k)$ 表示从 t_k 到 t_{k+1} 的状态转移矩阵,满足

$$\dot{\phi}_i(t_{k+1}, t_k) = A_i(t_{k+1}) \phi_i(t_{k+1}, t_k) \quad \phi_i(t_k, t_k) = I \quad (7)$$

$A_i = \text{diag}(F_{(6 \times 6)} \ A_{c(2 \times 2)})_i$; F 为考虑主要摄动(包括地球非中心引力摄动、日月引力摄动和太阳光压摄动)的轨道动力学系统状态矩阵; $A_c = [0 \ 1; 0 \ 0]$; 其中,星载时钟系统噪声由其 Allan 方差^[1]确定。

2.2 观测方程

观测方程同样在参考状态线性化展开,离散形式为

$$\delta Z(t_{k+1}) \cong H(t_{k+1}) \delta X(t_{k+1}) + V(t_{k+1}) \quad (8)$$

式中, δZ 为理论观测值与实际观测值之差, $H = [H_c^T \ H_\rho^T \ H_{TOA}^T]^T$ 。 H_c 为 Z_c 对应的观测矩阵:

$$H_c = \frac{\partial Z_c}{\partial X^T} = \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 & E & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & E & 0 \dots 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

式(9)中的 0 表示的是 1×8 阶的零矩阵, $E = \text{diag}\left(0_{1 \times 6} \ 1 \ 0\right)$ 。 H_ρ 为 Z_ρ 对应的观测矩阵:

$$H_\rho = \frac{\partial \rho}{\partial X^T} \Big|_{X^*(i)} = \frac{\partial \rho}{\partial \rho} \frac{\partial \rho}{\partial X^T} \Big|_{X^*(i)} \quad (10)$$

其中, ρ 为相对位置矢量, $\rho = [\rho_x \ \rho_y \ \rho_z]^T = r_j - r_i$, r_i 和 r_j 为第 i 颗和第 j 颗 ($i < j$) 卫星的位置矢量, 瞬时测距理论值 $\rho = \sqrt{\rho_x^2 + \rho_y^2 + \rho_z^2}$, 则

$$\frac{\partial \rho}{\partial \rho} = \frac{1}{\rho} [\rho_x \ \rho_y \ \rho_z] = \frac{\rho^T}{\rho} \quad \frac{\partial \rho}{\partial X^T} = \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 & E & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & E & 0 \dots 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

式(11)中的 0 表示的是 3×8 阶的零矩阵, $E = [I_{3 \times 3} \ 0_{3 \times 5}]$ 。 H_{TOA} 为基于脉冲星到达时间测量的观测矩阵,对相应的卫星 i ,由式(2):

$$H_{TOA,i} = [\cos \lambda \cos \alpha \ \cos \lambda \sin \alpha \ \sin \lambda \ c \ 0] \quad (12)$$

2.3 简化的广义联邦滤波器

由以上系统描述可见,该星座导航系统是一个高阶估计系统,为了将计算适当分散到各成员卫星,在此借鉴在组合导航数据融合中广泛应用的联邦滤波思想。将整个星座系统作为整体,对它的整体处理作为主滤波器(MF),星间观测作为主滤波器的观测输入,而将其中各成员卫星的利用脉冲星观测数据进行自主导航的局部处理作为子滤波器(LF_{1-n})。考虑到各子系统间的观测值和待估状态都相互独立,并且各子系统的状态方程仅为主系统状态方程的一部分,对广义联邦滤波器^[14]进行适当简化和改进。

(1) 滤波器设计

滤波器的结构如图 1 所示,每个局部滤波器都可以进行时间递推。该方法可以使各成员卫星并行工作,处理各自的测量信息以及系统的共享信息。成员卫星的

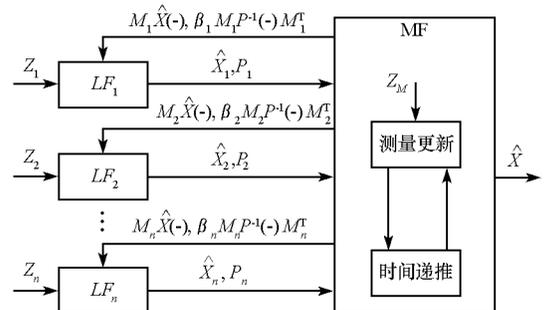


图 1 组合滤波器结构图

Fig. 1 Structure of generalized federated filters

绝对位置信息,包括滤波的定位结果 X_i 和协方差阵 P_i ,将其作为初值进入整网定轨模块,充分利用星间观测构成的约束条件,提高整个星座的定轨精度。

(2) 局部滤波器的 M-LS 估计

由于局部滤波器计算量相对较小,考虑到脉冲星的观测精度,对局部滤波器的观测值进行抗差估计,即 M-LS 估计。则

$$P_i^{-1}(k-1) = \beta_i M_i P^{-1}(k-1) M_i^T, X_i(k-1) = M_i X(k-1) \quad (13)$$

时间更新

$$\begin{cases} X_i(k, k-1) = X_i(k-1) + T \cdot f(X_i(k-1), t_{k-1}) \\ P_i(k, k-1) = \phi_i(k, k-1) P_i(k-1) \phi_i^T(k, k-1) + Q_i(k, k-1) \end{cases} \quad (14)$$

测量更新

$$\begin{cases} X_i(k) = X_i(k, k-1) + K_{MLS}(k) [Z_i(k) - h_i(X_i(k, k-1), t_k)] \\ K_{MLS}(k) = P_i(k, k-1) H_i^T(k) [H_i(k) P_i(k, k-1) H_i^T(k) + R_i^{-1}(k)]^{-1} \\ P_i(k) = [I - K_{MLS}(k) H_i(k)] P_i(k, k-1) \end{cases} \quad (15)$$

式中, M_i 为状态向量重置矩阵, $M_i = [0 \dots 0 \underset{i-1}{Q_{8 \times 8}} 0 \dots 0]$; β_i 为信息分配因子,满足 $\sum_{i=1}^n \beta_i M_i = I$; T 为采样步长; R_i 为观测值的 Z_i 抗差等价权,权函数采用 IGGII 方案^[15],则

$$R_i = \begin{cases} R_i, & |V_i| \leq c_0 \\ R_i \frac{c_0}{|V_i|} \left(\frac{c_1 - |V_i|}{c_1 - c_0} \right)^2, & c_0 \leq |V_i| \leq c_1 \\ 0, & |V_i| \geq c_1 \end{cases} \quad (16)$$

式中, $|V_i|$ 为 V_i 的标准化残差的绝对值; c_0 取 1.0~1.5; c_1 取 3.0~8.0。

(3) 主滤波器的更新及融合

$$\begin{cases} P^{-1}(k) = \text{diag}(P_1^{-1}(k), P_2^{-1}(k), \dots, P_n^{-1}(k)) \\ X(k) = [X_1^T(k), X_2^T(k), \dots, X_n^T(k)]^T \\ X(k) = X(k) + K_M(k) [Z_M(k) - h_M(X(k), t_k)] \\ K_M(k) = P(k) H_M^T(k) (H_M(k) P(k) H_M^T(k) + R_M^{-1}(k))^{-1} \\ P(k) = [I - K_M(k) H_M(k)] P(k) \end{cases} \quad (17)$$

3 算例及分析

导航卫星星座为 24/3/2 55° 的 Walker 星座,卫星轨道周期为 14.7h。卫星轨道动力学模型考虑:地球形状摄动(30×30 阶);日、月引力摄动;太阳光压摄动;广义相对论效应。星间伪距测量等效误差考虑随机误差 0.5m,系统误差 0.5m;星间链路有效距离 $\leq 50\,000\text{km}$;观测频度 30min/次。仿真场景建立如下(仿真中选用的 X 射线脉冲星参见表 1):

表 1 脉冲星位置参数

Tab. 1 Coordinates of Pulsars used in simulation

脉冲星号	地球惯性坐标系(J2000)		银道坐标系	
	经度(°)	纬度(°)	经度(°)	纬度(°)
PSR B1937+ 21	294.911	21.583	57.51	- 0.29
PSR J0218+ 4232	34.527	42.534	139.51	- 17.53
B0614+ 091	94.284	9.136	200.88	- 3.36
B1617- 155	244.980	- 15.646	359.09	23.78
PSR J0437- 4715	69.321	- 47.249	253.39	- 41.96

CASE 1: 仅利用星间测距自主导航。给定星载原子钟初始相位误差 20ns , 初始频率漂移为 $2 \times 10^{-12}\text{Hz}$, 卫星初始位置误差 $\delta r_0 = [1, 1, 1]^T\text{m}$, 初始速度误差 $\delta v_0 = [0.1, 0.1, 0.1]^T\text{m/s}$, $P_0 = \text{diag}(10, 10, 10, 0.01, 0.01, 0.01, 4.0 \times 10^{-18}, 1.0 \times 10^{-30})$, 动力学模型噪声协方差 $Q_0 = \text{diag}(Q_F, Q_c)$, $Q_F = (1.0 \times 10^{-8}, 1.0 \times 10^{-8}, 1.0 \times 10^{-8}, 1.0 \times 10^{-14}, 1.0 \times 10^{-14}, 1.0 \times 10^{-14}, 1.0 \times 10^{-14}, 1.0 \times 10^{-14})$, Q_c 按照 Allan 方差取值。导航滤波结果如图 2~ 7 所示。

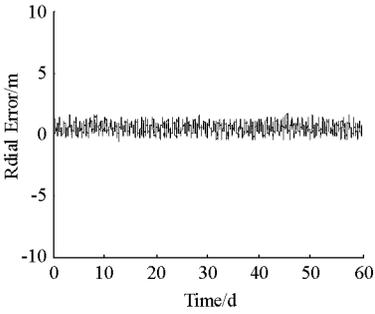


图 2 基于星间测距的轨道径向误差

Fig. 2 Error in radial direction in case 1

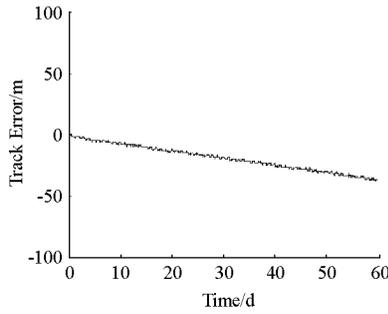


图 3 基于星间测距的轨道切向误差

Fig. 3 Error in tangential direction in case 1

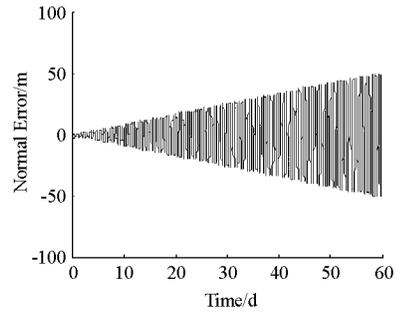


图 4 基于星间测距的轨道法向误差

Fig. 4 Error in normal direction in case 1

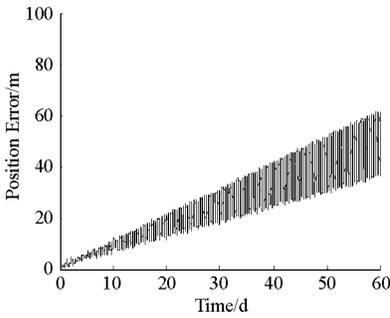


图 5 基于星间测距的轨道位置误差

Fig. 5 Orbital position error in case 1

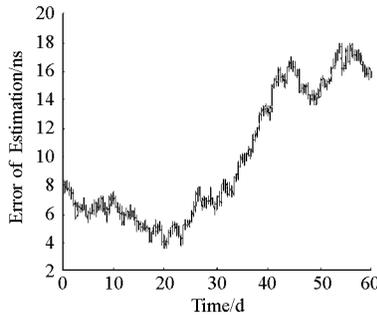


图 6 基于星间测距的绝对时间同步误差

Fig. 6 Time synchronization error in case 1

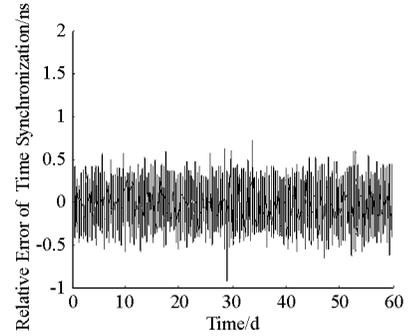


图 7 基于星间测距的相对时间同步误差

Fig. 7 Relative time synchronization error

从图 2~ 7 可以看出, 在轨道初始误差较小的情况下, 仅利用星间测距进行 60day 自主导航, 轨道切向和法向方向误差逐渐累积至 50m, 这是由于仅星间测距时星座整体旋转不可测, 存在整体旋转误差; 卫星钟差估计误差累积至 20ns, 存在整体漂移, 但星间相对时间同步误差仅为 0.5ns, 精度较高。

CASE 2: 星间测距+ 脉冲星 TOA 测量的组合导航方式。给定星载原子钟初始相位误差 20ns , 初始频率漂移为 $2 \times 10^{-12}\text{Hz}$, 脉冲星 TOA 测量误差 $0.1\mu\text{s}$, 脉冲星方位误差 10^{-4}as ; 卫星初始位置误差 $\delta r_0 = [1000, 1000, 1000]^T\text{m}$, 初始速度误差 $\delta v_0 = [100, 100, 100]^T\text{m/s}$, $P_0 = \text{diag}(1.0 \times 10^6, 1.0 \times 10^6, 1.0 \times 10^6, 1.0 \times 10^4, 1.0 \times 10^4, 1.0 \times 10^4, 4.0 \times 10^{-18}, 1.0 \times 10^{-30})$, 动力学模型噪声协方差 $Q_0 = \text{diag}(Q_F, Q_c)$, 取值与 CASE 1 相同。导航结果如图 8~ 13 所示。

从图 8~ 13 可以看出, 在星座中的 3 颗卫星上增加脉冲星 TOA 测量, 采用数据融合方法, 在初值误差较大的情况下定轨位置误差仍可收敛到 5m 内, 时间同步误差收敛到 1.5ns, 导航精度提高。

以上仿真说明, 在组合导航中通过对星间测距和脉冲星 TOA 测量信息的抗差融合, 定轨精度受到两种测量信息共同影响。采用简化和改进的广义联邦滤波算法对两类观测数据融合, 可有效解决时空基准问题; 且给定 TOA 测量误差 $0.1\mu\text{s}$, 脉冲星方位误差 10^{-4}as 时, 60d 的自主导航位置误差在 5m 之内。

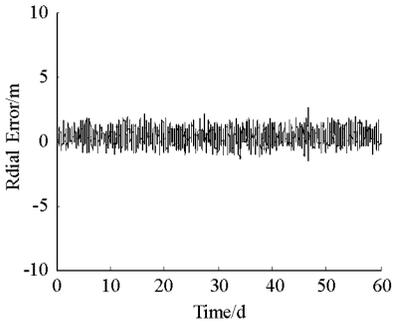


图8 基于组合导航的
轨道径向误差

Fig. 8 Error in radial direction
in case 2

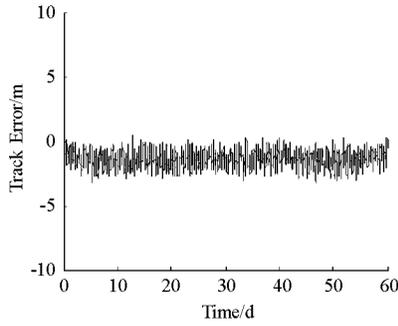


图9 基于组合导航的
轨道切向误差

Fig. 9 Error in tangential direction
in case 2

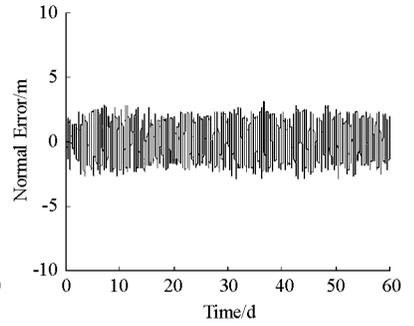


图10 基于组合导航的
轨道法向误差

Fig. 10 Error in normal direction
in case 2

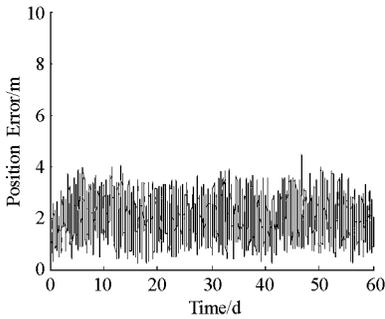


图11 基于组合导航的
轨道位置误差

Fig. 11 Orbital position error
in case 2

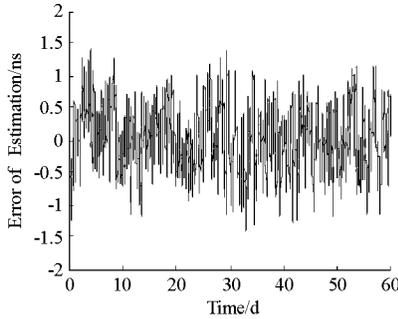


图12 基于组合导航的绝对
时间同步误差

Fig. 12 Time synchronization error
in case 2

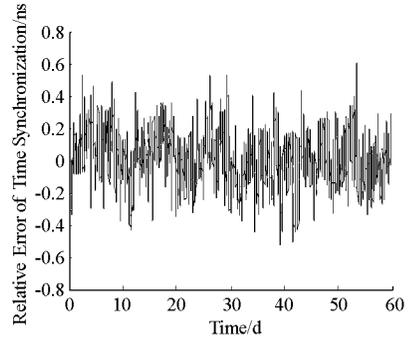


图13 基于组合导航的相对
时间同步误差

Fig. 13 Relative time
synchronization error

4 结论

卫星导航星座利用星间测距进行长期自主定轨时,由于缺少绝对时空基准,会出现整体旋转和漂移。本文的研究结果表明,采用脉冲星 TOA 测量和星间测距的组合导航方法能够抑制整体旋转和漂移误差,提高导航精度;所研究的基于广义联邦滤波改进和简化的数据融合方法,能够对两类观测数据进行有效融合,同时分散了计算量,有利于提高星座自主导航的实时性。

参考文献:

- [1] Rajan J A, Orr M. On-orbit Validation of GPS IIR Autonomous Navigation[C]//Proceedings of the ION 59th Annual Meeting, Albuquerque, NM, 2003: 411-419.
- [2] 刘林,刘迎春. 关于星-星相对测量自主定轨中的亏秩问题[J]. 飞行器测控学报, 2000, 19(3): 13-16.
- [3] Cai Zhiwu, Zhao Dongming, Chen Jinping, et al. Research on Autonomous Orbit Determination of Navigation Satellite Based on Crosslink Range and Orientation Parameters Constraining[J]. Geospatial Information of Science, 2006, 9(1): 18-23.
- [4] 杨萍,张艳,李本津. 基于星敏感器的星座自主导航融合技术研究[J]. 系统工程与电子技术, 2007, 29(12): 2131-2135.
- [5] 蔡志武,韩春好,陈金平,等. 导航卫星长期自主定轨的星座旋转误差分析与控制[J]. 宇航学报, 2008, 29(2): 522-528.
- [6] 朱俊,廖瑛,文援兰. 基于星间测距和地面发射源的导航星座整网自主定轨研究[J]. 国防科技大学学报, 2009, 31(2): 15-19.
- [7] 张艳,张育林. 星间测距网的抗差估计方法研究[J]. 系统工程与电子技术, 2006, 28(4): 519-524.
- [8] Woodfork D W II, Raquet K F, Racca R A. Use of X-ray Pulsars for Aiding GPS Satellite Orbit Determination[C]//ION 61st Annual Meeting, Cambridge, MA, June 2005: 27-29.
- [9] 帅平,李明,陈绍龙,等. 基于 X 射线脉冲星的导航卫星自主导航[J]. 中国空间科学技术, 2008(2): 1-7.
- [10] 熊凯,魏春岭,刘良栋. 基于脉冲星的卫星星座自主导航技术研究[J]. 宇航学报, 2008, 29(2): 545-549.
- [11] Carlson N A. Federated Filter for Fault-tolerant Integrated Navigation Systems [C]//Proceeding of PLANS, Orlando, FL, 1988.
- [12] Carlson N A. Federated Square Root Filter for Decentralized Parallel Processes[J]. IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems, 1990, AES-26(3).
- [13] Sheikh S I, Pines D J. Spacecraft Navigation Using X-ray Pulsars[J]. Journal of Guidance, Control and Dynamics, 2006, 29(1): 49-62.
- [14] 王颂,顾启泰. 广义联邦滤波器的全局最优性[J]. 中国惯性技术学报, 2004, 12(6): 38-44.
- [15] 杨元喜. 抗差估计理论及其应用[M]. 北京: 八一出版社, 1993.