

文章编号: 1001-2486(2006)05-0011-06

GPS 和类 GPS 测距技术联合用于双星编队星座的状态确定*

王 威¹, 胡利民^{1,2}

(1. 国防科技大学 机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073; 2. 重庆陆军预备役 后勤保障旅, 重庆 400054)

摘 要:编队卫星状态的高精度确定是编队星座功能实现的重要基础。针对对地观测的双星编队星座的状态确定问题,为了提高状态确定的精度,在 GPS 技术的基础上,引入了类 GPS 测距技术,建立了联合 GPS 和类 GPS 测距技术进行状态整体确定的两种数学模型,并讨论了 GPS 星间单差模糊度和类 GPS 星内单差模糊度的同时初始化方法,最后进行了数值仿真。仿真结果显示,类 GPS 观测值尤其是类 GPS 星内载波单差观测值的引入,明显提高了双星编队星座的状态确定精度,其中绝对姿态角的精度达到 rad,相对位置的精度达到 m,相对钟差的精度达到 s。仿真证明方法正确有效,模型二更优于模型一。

关键词:GPS;类 GPS 测距技术;双星编队星座;状态确定;整周模糊度

中图分类号:V412.41 **文献标识码:**A

Application of GPS and 'GPS-like' Ranging Technology in the States Determination of Double-satellite Formation Constellation

WANG Wei¹, HU Li-min^{1,2}

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

2. The Reserve Logistics Support Brigade of Chongqing Army, Chongqing 400054, China)

Abstract: Precise determination of formation states provides the foundation for Formation Constellation to carry out its function. In this paper, the state determination problem of double-satellite formation constellation for earth-observation purpose was discussed. On the basis of GPS, a 'GPS-like' ranging technology was introduced to improve the state results. Two mathematical models combining 'GPS-like' Ranging technology with GPS were built. In this way, a synchronous initialization method for single differential GPS inter-satellite integer ambiguity and single differential 'GPS-like' intra-satellite integer ambiguity were also developed. Finally, these models above were simulated and analyzed. The results indicate that, 'GPS-like' observation data, especially the single differential 'GPS-like' intra-satellite carrier phase data, significantly improved the states results, and the accuracies of absolute attitudes, relative position and relative clock bias respectively reached rad, m and s. The simulation proves that these methods are correct and model II is more accurate than model I.

Key words: GPS; 'GPS-like' ranging; double-satellite formation constellation; states determination; integer ambiguity

编队星座的成功应用依赖于编队卫星(简称编星)状态的高精度确定,这一状态包括:编星绝对的和相对的姿态、位置及钟差。

GPS 技术是编队星座状态确定的主要手段,其伪距测量方式使用精度为 10m 的 GPS 伪距观测值,便于实时定位,但精度低;而载波相位测量方式使用精度为 10^{-3} m 的 GPS 载波相位观测值,可定位,可定姿,精度高,但快速初始化 GPS 星间单差模糊度很困难。本文引入的类 GPS 测距技术,指在编星上安装特殊的发射和接收天线,各编星的接收天线可接收其它编星的发射天线发射的类似 GPS 的伪距和载波相位信号,其伪码码元和载波相位波长比 GPS 的更短,观测值精度更高,分别为 10^{-2} m 和 10^{-5} m。

本文继承了三星编队的研究成果^[4],针对对地观测的双星编队星座的状态确定任务,简化了坐标系,在利用 GPS 测量信息的基础上,加入类 GPS 伪距和载波相位测量信息,建立了状态整体确定的两种

* 收稿日期:2006-04-06

基金项目:国家自然科学基金资助项目(10072076);国家部委基金资助项目(51400201013KC01)

作者简介:王威(1963—),男,副教授,博士。

数学模型,讨论了 GPS 星间单差模糊度和类 GPS 星内单差模糊度的初始化问题,最后完成了数学仿真^[1-3]。

1 坐标系和符号约定

I 坐标系:地心惯性坐标系。 L 坐标系:当地水平坐标系。 B 坐标系:卫星星体坐标系。 n_A^G, n_A^F, n_G : 分别为 GPS 接收天线的个数、类 GPS 接收天线的个数和两编星可同时持续观测到的 GPS 卫星的个数。 (α_i, δ_i) : 编星 i 质心的赤经和赤纬。 $\varphi_i^L, \theta_i^L, \Psi_i^L$: 绝对姿态角, 具体为从 B 坐标系先后绕 Y_B 轴、 X_B 轴和 Z_B 轴(简称绕 213 的顺序)旋转到 L 坐标系的三个欧拉角。 $(M_B^L)_i$: 从 B 坐标系到 L 坐标系的转换矩阵, 具体为 $(M_B^L)_i = R_3(\Psi_i^L) \cdot R_1(\theta_i^L) \cdot R_2(\varphi_i^L)$ 。 $(M_L^I)_i$: 从 L 坐标系到 I 坐标系的转换矩阵, 具体为 $(M_L^I)_i(\alpha_i, \delta_i) = R_3(-\alpha_i) \cdot R_2(90^\circ + \delta_i)$ 。 $(M_B^I)_i$: 从 B 坐标系到 I 坐标系的转换矩阵, 包含编星绝对姿态角信息, 具体为 $(M_B^I)_i = (M_L^I)_i \cdot (M_B^L)_i = R_3(-\alpha_i) \cdot R_2(90^\circ + \delta_i) \cdot R_3(\Psi_i^L) \cdot R_1(\theta_i^L) \cdot R_2(\varphi_i^L)$ 。

2 基本研究思路

为研究双星编队星座的状态确定问题,首先根据初始条件和运动方程造出 GPS 伪距、GPS 载波相位、类 GPS 伪距、类 GPS 载波相位四种模拟观测值;其次利用 GPS 伪距观测值进行单点定位,确定各编星质心的绝对位置及权阵,作差后作为相对位置的先验信息和初值;再次,在随机机动的情况下,利用 GPS 星内载波单差观测值初始化 GPS 星内单差模糊度,取整后再代入单星定姿模块,初步求解出各编星的绝对姿态及权阵,作为姿态的先验信息和初值;接着,同时初始化 GPS 星间单差模糊度和类 GPS 星内单差模糊度,各自取整后作为两类模糊度的整数解;最后,在相同的初始条件(相对位置和绝对姿态的先验信息与模糊度的整数解)下,分别根据两种状态整体确定模型,利用具有先验信息的加权最小二乘法进行迭代解算,完成最终的状态整体解算、精度评估和对比分析。由于各观测值精度不同,解算中将各观测值的精度都统一到类 GPS 伪距观测值的标准,分别赋予各观测值相应的权重系数,同时调整相对位置和绝对姿态的先验信息权阵。

3 数学模型

3.1 观测方程

本文主要使用三种观测值:GPS 星间载波相位单差、类 GPS 伪距和类 GPS 星内载波相位单差。

(1) GPS 星间载波相位单差方程

$$\begin{aligned} (\Delta \varphi_m^{Gk})_{12} &= |R_{m_1}^{Gk}| - |R_{m_2}^{Gk}| - \lambda^G \cdot (\Delta N_m^{Gk})_{12} + c \cdot \delta t_1 - c \cdot \delta t_2 + (v_m^{Gk})_{12} \\ &= (s_m^{Gk})_1^T \cdot (B_m)_1^B - \lambda^G \cdot (\Delta N_m^{Gk})_{12} + b_{12} + (v_m^{Gk})_{12} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} (B_m)_{12} &= [(x_2 \ y_2 \ z_2)^T + (M_B^I)_2(\alpha_2, \delta_2, \Psi_2, \theta_2, \varphi_2)(r_m^C)_2^B] - \\ & \quad [(x_1 \ y_1 \ z_1)^T + (M_B^I)_1(\alpha_1, \delta_1, \Psi_1, \theta_1, \varphi_1)(r_m^C)_1^B] \end{aligned} \quad (2)$$

其中, $(\Delta \varphi_m^{Gk})_{12}$ 为两编星的 GPS 主天线对 GPS 卫星 k 的载波相位单差, $(v_m^{Gk})_{12}$ 为观测误差, $(\Delta N_m^{Gk})_{12}$ 为 GPS 星间单差模糊度, λ^G 为 GPS 载波相位波长, $(s_m^{Gk})_1$ 为编星 1 的 GPS 主天线至 GPS 卫星 k 的单位视线方向, b_{12} 为两编星相对钟差的等效距离, $(B_m)_{12}$ 为两编星的 GPS 主天线构成的基线矢量, $(r_m^C)_i^B$ 为编星 i 的 GPS 主天线在其 B 坐标系中的位置矢量, $(x_i \ y_i \ z_i)^T$ 为编星 i 质心在 I 坐标系中的位置矢量。

(2) 类 GPS 伪距方程

编星 1:

$$(\rho_j^{F2})_1 = |(\Delta R_{12})^I + (M_B^I)_2 \cdot (r_0^F)_2^B - (M_B^I)_1 \cdot (r_j^F)_1^B| + b_{12} + (v_j^{F2})_1 \quad (3)$$

编星 2:

$$(\rho_j^{F1})_2 = |-(\Delta R_{12})^I + (M_B^I)_1 \cdot (r_0^F)_1^B - (M_B^I)_2 \cdot (r_j^F)_2^B| - b_{12} + (v_j^{F1})_2 \quad (4)$$

其中, $(\rho_j^{Fk})_i$ ($j=1,3; i,k=1,2, i \neq k$) 为编星 i 的类 GPS 接收天线 j 对编星 k 的类 GPS 伪距观测值,

$(v_j^k)_i$ 为观测误差, $(\Delta \mathbf{R}_{12})^I$ 为两编星在 I 坐标系中的相对位置矢量, $(\mathbf{r}_j^F)_i^B$ 为编星 i 的类 GPS 接收天线 j 在 B 坐标系中的位置矢量, $(\mathbf{r}_0^F)_i^B$ 为编星 i 的类 GPS 发射天线在 B 坐标系中的位置矢量, $(\mathbf{M}_B^I)_i$ 为编星 i 的 B 坐标系到 I 坐标系的旋转矩阵, 其它符号定义同前。

(3) 类 GPS 星内载波相位单差方程

编星 1:

$$\begin{aligned} (\Delta \phi_{mj}^{F2})_1 = & |(\Delta \mathbf{R}_{12})^I + (\mathbf{M}_B^I)_2 \cdot (\mathbf{r}_0^F)_2^B - (\mathbf{M}_B^I)_1 \cdot (\mathbf{r}_j^F)_1^B| - \\ & |(\Delta \mathbf{R}_{12})^I + (\mathbf{M}_B^I)_2 \cdot (\mathbf{r}_0^F)_2^B - (\mathbf{M}_B^I)_1 \cdot (\mathbf{r}_m^F)_1^B| - \lambda^F \cdot (\Delta N_{mj}^{F2})_1 + (v_{mj}^{F2})_1 \end{aligned} \quad (5)$$

编星 2:

$$\begin{aligned} (\Delta \phi_{mj}^{F1})_2 = & |-(\Delta \mathbf{R}_{12})^I + (\mathbf{M}_B^I)_1 \cdot (\mathbf{r}_0^F)_1^B - (\mathbf{M}_B^I)_2 \cdot (\mathbf{r}_j^F)_2^B| - \\ & |-(\Delta \mathbf{R}_{12})^I + (\mathbf{M}_B^I)_1 \cdot (\mathbf{r}_0^F)_1^B - (\mathbf{M}_B^I)_2 \cdot (\mathbf{r}_m^F)_2^B| - \lambda^F \cdot (\Delta N_{mj}^{F1})_2 + (v_{mj}^{F1})_2 \end{aligned} \quad (6)$$

其中, $(\Delta \phi_{mj}^{Fk})_i$ 为编星 i 的类 GPS 接收天线 j 与主天线对编星 k 组成的类 GPS 星内载波相位单差观测值, $(v_{mj}^{Fk})_i$ 为观测误差, $(\Delta N_{mj}^{Fk})_i$ 为类 GPS 星内单差模糊度 ($i, k = 1, 2, i \neq k; m = 1; j = 2, 3$), λ^F 为类 GPS 载波相位波长。

3.2 状态整体确定模型

本文联合 GPS 和类 GPS 测距两大技术, 建立了两种状态整体确定模型。

(1) 模型一

模型一联合了 GPS 星间载波相位单差、类 GPS 伪距两种观测值, 具体模型为:

$$\begin{bmatrix} (\Delta \phi_m^{Gk_1})_{12} \\ \vdots \\ (\rho_j^{Fk_2})_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1(\hat{X}) \\ \vdots \\ y_2(\hat{X}) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \lambda^G \cdot (\Delta N_m^{Gk_1})_{12} \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} (v_m^{Gk_1})_{12} \\ \vdots \\ (v_j^{Fk_2})_i \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中, $(\Delta \phi_m^{Gk_1})_{12}, (\rho_j^{Fk_2})_i$ ($k_1 = 1, \dots, n_G; i, k_2 = 1, 2, i \neq k_2; j = 1, 2, 3$) 分别为 GPS 星间载波相位单差观测值和类 GPS 伪距观测值; $(v_m^{Gk_1})_{12}, (v_j^{Fk_2})_i$ 为这两种观测值对应的观测误差; \hat{X} 为待求解的除模糊度参数外的状态参数, 且 $\hat{X} = [\theta_1^L, \phi_1^L, \Psi_1^L, \theta_2^L, \phi_2^L, \Psi_2^L, x_{12}, y_{12}, z_{12}, b_{12}]^T$; $y_d(\hat{X})$ ($d = 1, 2$) 为两种观测值的观测方程中与 \hat{X} 相关的函数。

假设上述 GPS 星间单差模糊度已知, 对式(7)进行线性化, 得误差方程组如下:

$$\begin{bmatrix} (v_m^{Gk_1})_{12} \\ \vdots \\ (v_j^{Fk_2})_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{y}_1(\hat{X}) \\ \vdots \\ \bar{y}_2(\hat{X}) \end{bmatrix} \cdot d\hat{X} - \begin{bmatrix} (l_m^{Gk_1})_{12} \\ \vdots \\ (l_j^{Fk_2})_i \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中, $\bar{y}_d(\hat{X})$ ($d = 1, 2$) 为式(7)中 $y_d(\hat{X})$ 函数对应的线性化形式; 对应的自由项分别为 $(l_m^{Gk_1})_{12} = (\Delta \phi_m^{Gk_1})_{12} + \lambda^G \cdot (\Delta N_m^{Gk_1})_{12} - \bar{y}_1(\hat{X}_0)$, $(l_j^{Fk_2})_i = (\rho_j^{Fk_2})_i - \bar{y}_2(\hat{X}_0)$; 改正项为 $d\hat{X} = [d\theta_1^L, d\phi_1^L, d\Psi_1^L, d\theta_2^L, d\phi_2^L, d\Psi_2^L, dx_{12}, dy_{12}, dz_{12}, db_{12}]^T$ 。

(2) 模型二

模型二比模型一多联合了一类观测值——类 GPS 星内载波相位单差观测值, 具体模型为:

$$\begin{bmatrix} (\Delta \phi_m^{Gk_1})_{12} \\ \vdots \\ (\rho_j^{Fk_2})_i \\ \vdots \\ (\Delta \phi_{mj}^{Fk_2})_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1(\hat{X}) \\ \vdots \\ y_2(\hat{X}) \\ \vdots \\ y_3(\hat{X}) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \lambda^G \cdot (\Delta N_m^{Gk_1})_{12} \\ \vdots \\ 0 \\ \vdots \\ \lambda^F \cdot (\Delta N_{mj}^{Fk_2})_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} (v_m^{Gk_1})_{12} \\ \vdots \\ (v_j^{Fk_2})_i \\ \vdots \\ (v_{mj}^{Fk_2})_i \end{bmatrix} \quad (9)$$

其中, $(\Delta \phi_{mj}^{Fk_2})_i$ 为类 GPS 星内载波相位单差观测值 ($i, k_2 = 1, 2, i \neq k_2; j = 1, 2, 3$); $(v_{mj}^{Fk_2})_i$ 为 $(\Delta \phi_{mj}^{Fk_2})_i$ 对应的观测误差; $y_d(\hat{X})$ ($d = 1, 2, 3$) 为三种观测值的观测方程中与 \hat{X} 相关的函数; 其它符号定义同前。

假设 GPS 星间单差模糊度和类 GPS 星内单差模糊度已知, 对(9)式进行线性化, 得误差方程组如下:

$$\begin{bmatrix} (v_m^{G_1})_{12} \\ \dots \\ (v_j^{F_{k_2}})_i \\ \dots \\ (v_{m_j}^{F_{k_2}})_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{y}_1(\hat{X}) \\ \dots \\ \bar{y}_2(\hat{X}) \\ \dots \\ \bar{y}_3(\hat{X}) \end{bmatrix} \cdot d\hat{X} - \begin{bmatrix} (l_m^{G_1})_{12} \\ \dots \\ (l_j^{F_{k_2}})_i \\ \dots \\ (l_{m_j}^{F_{k_2}})_i \end{bmatrix} \quad (10)$$

其中, $\bar{y}_d(\hat{X})$ ($d=1, 2, 3$) 为式(9)中 $y_d(\hat{X})$ 函数对应的线性化形式; 自由项 $(l_j^{F_{k_2}})_i = (\Delta\phi_{m_j}^{F_{k_2}})_i + \lambda^F \cdot (\Delta N_{m_j}^{F_{k_2}})_i - \bar{y}_3(\hat{X}_0)$ 。

3.3 整周模糊度初始化

整周模糊度的准确初始化是确定编队状态的前提。本文联合多个历元的 GPS 星间载波相位单差、类 GPS 伪距及类 GPS 星内载波相位单差观测值, 利用后两种观测值提供的高精度的相对状态及强约束信息, 对 GPS 星间单差模糊度和类 GPS 星内单差模糊度同时完成了快速精确的初始化。

将上述两类模糊度与其它状态参数同视为待求参数, 对(9)式重新进行线性化, 得误差方程组如下:

$$\begin{bmatrix} (v_m^{G_1})_{12}(nt) \\ \dots \\ (v_j^{F_{k_2}})_i(nt) \\ \dots \\ (v_{m_j}^{F_{k_2}})_i(nt) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{y}_1(\hat{X}) & \lambda^G & O \\ \bar{y}_2(\hat{X}) & O & O \\ \bar{y}_3(\hat{X}) & O & \lambda^F \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} d\hat{X} \\ \dots \\ d\hat{N} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} (l_m^{G_1})_{12}(nt) \\ \dots \\ (l_j^{F_{k_2}})_i(nt) \\ \dots \\ (l_{m_j}^{F_{k_2}})_i(nt) \end{bmatrix} \quad (11)$$

其中, $\bar{y}_d(\hat{X})$ ($d=1, 2, 3$) 为 nt 个历元的式(9)中的 $y_d(\hat{X})$ 函数对应的线性化形式, $(l_m^{G_1})_{12}(nt)$, $(l_j^{F_{k_2}})_i(nt)$, $(l_{m_j}^{F_{k_2}})_i(nt)$ 为对应的自由项; $d\hat{X}$ 为待求解的 nt 个历元的除模糊度参数外的状态参数的改正项, 定义同前; 模糊度参数的改正项 $d\hat{N} = [d(\Delta N_1^{G_1})_{12}, d(\Delta N_1^{G_2})_{12}, \dots, d(\Delta N_1^{G_c})_{12}, d(\Delta N_{12}^{F_2})_1, d(\Delta N_{13}^{F_2})_1, d(\Delta N_{12}^{F_1})_2, d(\Delta N_{13}^{F_1})_2]^T$ 。

利用具有先验信息的加权最小二乘法进行迭代解算, 得到:

$$[d\hat{X} \ ; \ d\hat{N}]^T = [A^T P A + P_0]^{-1} [A^T P L + P_0 [\hat{X} - \hat{X}_0 \ ; \ \hat{N} - \hat{N}_0]^T] \quad (12)$$

$$P = [P_1 \ ; \ P_2 \ ; \ P_3]^T P_0 = [P_{01} \ ; \ P_{02}]^T \quad (13)$$

其中, P 为观测值权系数阵, P_d ($d=1, 2, 3$) 分别为 GPS 星间载波相位单差观测值、类 GPS 伪距观测值和类 GPS 星内载波相位单差观测值对应的权系数阵; P_0 为待求参数的先验信息权阵, P_{01} 为状态参数先验值的先验信息权阵, 它包括由 GPS 伪距单点定位得到的相对位置的先验权阵和由 GPS 星内载波相位单差定姿得到的绝对姿态的先验权阵, P_{02} 为零矩阵, 即上述两类整周模糊度均无先验值; \hat{X}_0 为 n 个时刻的状态初值, \hat{N}_0 为整周模糊度的初值。精度评估的详细过程参见文献[1-3], 在此不再赘述。

4 数值仿真

4.1 仿真条件

仿真对象为对地观测的串行双星编队星座, 起始历元为 2003 年 6 月 1 日 12 时, 两编星间距约为 1km, 起始历元各编星的轨道根数如表 1 所示。整个仿真时段内各编星同时可持续观测到 n_c 颗 GPS 卫星(本文中取 $n_c=5$), 起始历元 GPS 星座的轨道根数参见文献[1]。设各编星均为边长 1m 的立方体, 各编星上均安装两套天线系统: 一套为 GPS 测量系统, 由 4 个接收天线 $(r_j^c)_i^B$ ($j=1, 2, \dots, 4$) 组成, 在 B 坐标系中的坐标分别为 $(0.5, 0.5, -0.5)$, $(-0.5, 0.5, -0.5)$, $(-0.5, -0.5, -0.5)$, $(0.5, -0.5, -0.5)$; 一套为类 GPS 测量系统, 由 1 个发射天线 $(r_0^f)_i^B$ 和 3 个接收天线 $(r_j^f)_i^B$ ($j=1, 2, 3$) 组成, 其中类 GPS 发射天线在 B 坐标系中的坐标为 $(0.5, 0.5, -0.5)$, 类 GPS 接收天线在 B 坐标系中的坐标分别为 $(0.5, 0.5, 0.5)$, $(0.5, -0.5, 0.5)$, $(0.5, -0.5, -0.5)$ 。

仿真中 GPS 伪距、GPS 载波相位、类 GPS 伪距和类 GPS 载波相位四类观测值误差的方差分别取为 $(\sigma_\rho^c)^2 = 13.9 \times 10^2 \text{m}^2$, $(\sigma_\phi^c)^2 = 5.4 \times 10^{-5} \text{m}^2$, $(\sigma_\rho^f)^2 = 1.0 \times 10^{-4} \text{m}^2$, $(\sigma_\phi^f)^2 = 1.0 \times 10^{-10} \text{m}^2$ 。 $\lambda^G \approx 0.19029 \text{m}$, $\lambda^F = 0.001 \text{m}$ 。

对每个观测历元,模型一中(7)式包括($n_c + 2 \times 3$)个观测值、10个状态参数(6个绝对姿态角、3个相对位置坐标和1个相对钟差)以及 n_c 个整周模糊度参数;模型二中(9)式包括($n_c + 2 \times 3 + 2 \times 2$)个观测值,10个状态参数(同前)以及($n_c + 2 \times 2$)个整周模糊度参数;整周模糊度确定后,式(7)包括($n_c + 2 \times 3$)个观测值、10个状态参数,式(9)包括($n_c + 2 \times 3 + 2 \times 2$)个观测值、10个状态参数。

表1 串行双星编队星座各编星的轨道根数

Tab.1 Satellite's classical orbit elements of serial double-satellite formation constellation

	a (km)	e	i ($^\circ$)	ω ($^\circ$)	Ω ($^\circ$)	M ($^\circ$)
编星 1	7400.000000	0.000000	30.000000	0.000000	0.000000	0.000000
编星 2	7400.000000	0.000000	30.000000	0.000000	0.000000	0.000135

4.2 模糊度解算结果

综合考虑采样周期和解算精度的关系,选取采样周期 $T = 10s$,参加解算历元数 $nt = 20$,则按照式(11)得到的 GPS 星间单差模糊度和类 GPS 星内单差模糊度的解算结果分别如表 2、表 3 所示。

表2 GPS 星间单差模糊度解算结果(周)

Tab.2 Results of GPS single differential inter-satellite carrier phase bias (period)

模糊度	$(N_m^{G1})_{12}$	$(N_m^{G2})_{12}$	$(N_m^{G3})_{12}$	$(N_m^{G4})_{12}$	$(N_m^{G5})_{12}$
解算误差	$1.5786e-2$	$-8.9973e-3$	$2.0361e-2$	$-5.3811e-2$	$4.4837e-2$
均方差	$6.4661e-3$	$7.4925e-3$	$7.9474e-3$	$4.4160e-3$	$5.3039e-3$
整体均方差	$\sigma_N^G = 1.44478659e-2$		平均均方差	$\sigma_{N_s}^G = 1.02161840e-3$	

表3 类 GPS 星内单差模糊度解算结果(周)

Tab.3 Results of "GPS-like" single differential intra-satellite carrier phase bias (period)

模糊度	$(N_{12}^{F2})_1$	$(N_{13}^{F2})_1$	$(N_{12}^{F1})_2$	$(N_{13}^{F1})_2$
解算误差	$-5.7683e-3$	$1.4176e-2$	$1.0528e-2$	$4.4147e-2$
均方差	$4.2370e-2$	$1.1488e-1$	$5.2608e-2$	$4.9393e-2$
整体均方差	$\sigma_N^F = 1.42130116e-1$		平均均方差	$\sigma_{N_s}^F = 9.92679794e-3$

4.3 状态解算结果

解算出整周模糊度后,采用模型一和模型二分别进行整体确定,状态解算精度结果如表 4 所示。

表4 模型一和模型二的状态解算精度对比

Tab.4 Comparison of states results accuracies between model I and model II

	模型一	模型二
绝对姿态角	10^{-3} rad	10^{-4} rad
相对位置	10^{-3} m	10^{-3} m
相对钟差	10^{-12} s	10^{-12} s
相对钟差等效距离	10^{-3} m	10^{-4} m

如图 1~图 3 所示,将模型一(图中符号为▲)和模型二(图中符号为■)在整个仿真历元中确定的编星的绝对姿态角和相对位置的解算误差分别绘制成对比图,可以看出模型二比模型一更为精确,误差更小。

综上所述,类 GPS 观测值尤其是类 GPS 星内载波单差观测值的引入,明显提高了双星编队星座的状态确定精度。结果显示,模型二更优于模型一。

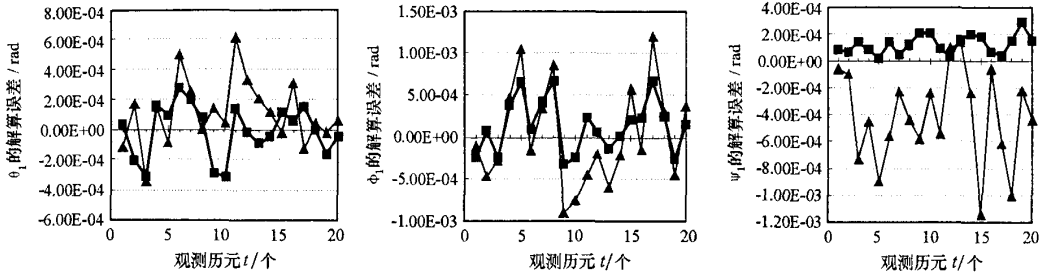


图1 模型一和模型二中编星1的绝对姿态角($\theta_1^t, \phi_1^t, \psi_1^t$)的解算误差对比图

Fig.1 Comparison of absolute attitude ($\theta_1^t, \phi_1^t, \psi_1^t$) errors of satellite 1 between model I and model II

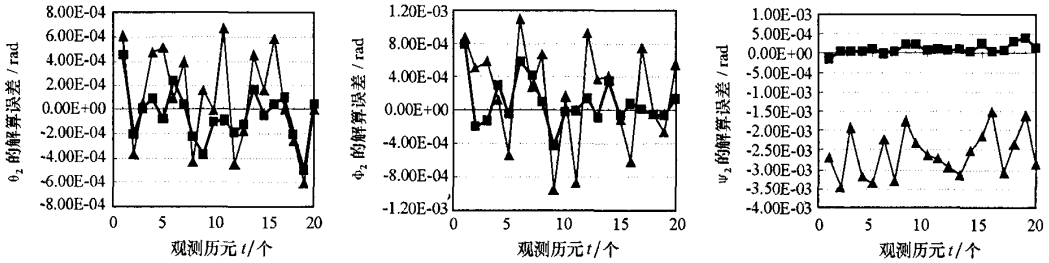


图2 模型一和模型二中编星2的绝对姿态角($\theta_2^t, \phi_2^t, \psi_2^t$)的解算误差对比图

Fig.2 Comparison of absolute attitude ($\theta_2^t, \phi_2^t, \psi_2^t$) errors of satellite 2 between model I and model II

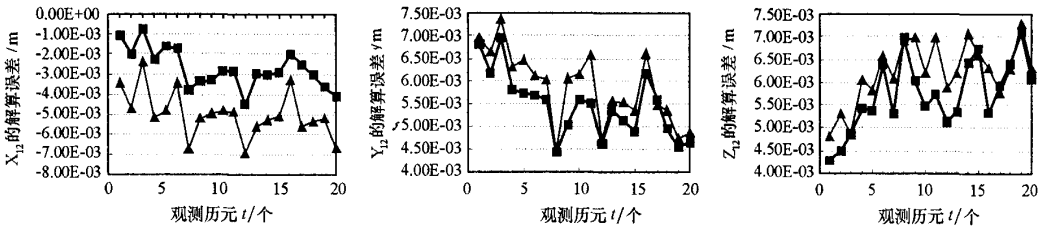


图3 模型一和模型二中相对位置(x_{12}, y_{12}, z_{12})的解算误差对比图

Fig.3 Comparison of relative position (x_{12}, y_{12}, z_{12}) errors between model I and model II

5 结论

针对双星编队星座的状态确定问题,建立了联合 GPS 和类 GPS 进行状态整体确定的两种数学模型,讨论了 GPS 星间单差模糊度和类 GPS 星内单差模糊度的初始化方法,仿真结果证明方法有效。

参考文献:

- [1] 胡利民. 联合 GPS 和类 GPS 测距技术实现双星编队星座的状态确定[D]. 长沙: 国防科技大学, 2005.
- [2] 胡利民. 联合 GPS 和类 GPS 测距技术实现双星编队星座的状态确定[A]. 国防科技大学第五届研究生学术活动节论文集(上册)[C], 2005: 121 - 128.
- [3] 胡利民, 王威, 郗晓宁. GPS 和类 GPS 测距技术在双星编队星座状态确定中的联合应用[J]. 空间科学学报, 2006, 26(3).
- [4] 范国清, 王威, 郗晓宁. 联合 CDGPS 技术和星间相对测量进行编队星座状态确定[J]. 空间科学学报, 2005, 25(3): 218 - 223.
- [5] 王威, 郗晓宁, 韩龙. 利用星间伪距观测进行编队星座相对状态测量[J]. 国防科技大学学报, 2002, 24(1): 26 - 29.
- [6] Park C W. Sensing Technologies for Formation Flying Spacecraft in LEO Using CDGPS and an Inter-Spacecraft Communication System[C]. ION GPS 2000, 2000: 1595 - 1607.

