

# 基于双星定位系统的近地卫星联合定轨建模及精度分析

赵德勇,王炯琦,周海银,王正明,潘晓刚

(国防科技大学数学与系统科学系,湖南长沙 410073)

**摘要:** 通过对基于双星定位系统的近地卫星联合定轨测量模式的分析,建立了基于距离和观测数据的联合定轨模型,构建了一种有效的系统误差参数估计方法,设计了一种基于数值融合法的联合定轨算法.仿真计算结果表明,联合定轨方式可以较好地抑制静地卫星星历误差对近地卫星定轨精度的影响,两天观测数据下近地卫星定轨精度可以达到 11.26 米,验证了本文所提出的系统误差估计方法及数值融合实现算法的有效性.

**关键词:** 双星定位系统;联合定轨;数值融合算法;精度分析

**中图分类号:** TN911 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2006) 09-1681-05

## LEO Combined Orbit Determination Modeling and Precision Analysis Based on Bi-Satellite Positioning System

ZHAO De-yong, WANG Jiong-qi, ZHOU Hai-yin, WANG Zheng-ming, PAN Xiao-gang

(Department of Mathematics and System Science, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

**Abstract:** This paper constructs combined orbit determination (COD) models from the angle of range-sum observation data by analyzing Low Earth Orbiter (LEO) combined orbit determination ranging mode based on Bi-satellite Positioning System (BPS), and designs a ranging system error parameters estimation method and a numerical fusion method based COD algorithm. Simulation computation results show that COD strategy can restrain influence of geostationary orbit satellites ephemeris errors, and LEO orbit determination precision can achieve 11.26 meters which is estimated by two days range sum simulation data, which proves the validity of the system error estimation method and numerical fusion algorithm.

**Key words:** bi-satellite positioning system; combined orbit determination; numerical fusion algorithm; precision analysis

### 1 引言

双星定位系统是一种主动式定位系统,它通过用户设备接收来自两颗分步在地球同步轨道上的静地卫星的导航定位信号,同时向卫星转发该定位信号,进而由地面中心站解算出用户所在位置.这种主动式定位原理需要采用高程约束解算出用户位置,无法满足高动态用户的实时导航定位需要.但是对一些近地卫星而言,可以通过信号高动态接收及发射频率补偿技术将其作为双星定位系统的特殊用户,进而利用双星定位系统的授时功能对近地卫星进行校时,利用其短信息通信功能传送遥控指令和注入数据实现对近地卫星的测控,利用对近地卫星提取的地面中心站一定星(静地卫星)—用户星(近地卫星)的双时延距离和数据实现其基于轨道动力学模型的近地卫星精密定轨.作为空间观测站的两颗静地卫星是影响近地卫星定轨精度的主要因素之一,为满足近地卫星的高精度应用需

求,可以采取联合定轨策略同时估计静地卫星和近地卫星的轨道参数及系统误差参数,以抑制两颗静地卫星星历误差对近地卫星轨道估计精度的影响.

文献 [1] 对基于双星定位系统的近地卫星联合定轨模型及其解析算法进行了初步的探讨,但该算法需要求解卫星状态转移矩阵,增加了算法实现的复杂性<sup>[1]</sup>;文献 [2] 和文 [3] 提出了基于中继卫星和双星系统的中低轨卫星的联合定轨概念,但算法实现中未涉及到系统误差参数估计的建模问题<sup>[2,3]</sup>.本文在文献 [1]、[4] 研究的基础上,建立了基于双星定位系统的近地卫星距离和观测联合定轨模型,构建了一种有效的系统误差参数估计方法,提出了一种基于数值融合法的联合定轨算法,最后针对不同仿真条件进行了具体的仿真实验和结果分析.

### 2 联合定轨模型

图 1 和图 2 给出了基于双星定位系统的近地卫星定

轨系统示意关系图,根据双星定位系统的工作模式不失一般性,本文考虑响应 \$B\_1\$ 星的定轨工作模式,图中 \$O\$ 为地心, \$C\$ 为地面中心站, \$B\_1\$、\$B\_2\$ 为两颗静地卫星, \$U\$ 为近地卫星. 考虑到基于双星定位系统的近地卫星定轨系统测量信号往返途径的不同,双星定位系统可有如下两种距离和测量模式,即:

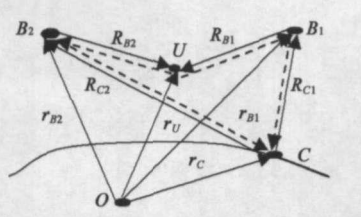


图1 基于一颗定位星的双程距离和测量定轨系统示意图

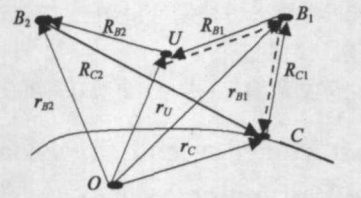


图2 基于两颗定位星的交叉距离和测量定轨系统示意图

(a)信号通过一颗定位星的双程距离和测量模式; (\$C B\_1 U B\_1 C, C B\_2 U B\_2 C\$);

(b)信号通过两颗定位星的交叉距离和测量模式. (\$C B\_1 U B\_1 C, C B\_2 U B\_2 C\$).

两种不同距离和测量模式的定轨系统示意图分别如图 1、2 所示.

2.1 联合定轨的数学描述

基于双星定位系统的近地卫星联合定轨原理可以用下述数学模型简要描述<sup>[1]</sup>:

$$\begin{cases} Y = G(X, t) + \\ \dot{X} = F(X, t) \end{cases} \quad (1)$$

其中: \$X = (X\_{B1}, X\_{B2}, X\_U) = (\varphi\_1, \varphi\_1, \varphi\_2, \varphi\_2, \varphi\_U, \varphi\_U)\$ 表示两颗静地卫星及近地卫星的位置速度状态向量; 表示观测误差. 根据双星定位系统的两种距离和测量模式,在对近地卫星定轨时其测量模型可分别表示为:

双程距离和观测模型:

$$S_i = 2(s_i + r_i) + i = 2(|\varphi_i - \varphi_c| + |\varphi_U - \varphi_i|) + i \quad (2)$$

交叉距离和观测模型:

$$\begin{cases} S_1 = 2(s_1 + r_1) + 1 \\ \quad = 2(|\varphi_1 - \varphi_c| + |\varphi_U - \varphi_1|) + 1 \\ S_2 = (s_1 + r_1) + (s_2 + r_2) + 2 \\ \quad = |\varphi_1 - \varphi_c| + |\varphi_U - \varphi_1| + |\varphi_2 - \varphi_U| + |\varphi_c - \varphi_2| + 2 \end{cases} \quad (3)$$

其中: \$s\_i\$ 表示双星系统第 \$i\$ 颗卫星到地面中心站的距离; \$r\_i\$ 表示双星系统第 \$i\$ 颗卫星到用户星的距离; \$\varphi\_i\$ 表示双星系统第 \$i\$ 颗卫星的位置矢量 (\$i=1, 2\$); \$\varphi\_U\$ 表示用户星的位置矢量; \$\varphi\_c\$ 表示地面中心站的位置矢量.

而 \$X\_{B1}, X\_{B2}, X\_U\$ 又分别满足卫星动力学方程:

$$\begin{cases} \dot{X}_{B1} = F_1(X_{B1}, t) & X_{B1}(t_0) = X_{B1}^0 \\ \dot{X}_{B2} = F_2(X_{B2}, t) & X_{B2}(t_0) = X_{B2}^0 \\ \dot{X}_U = F_U(X_U, t) & X_U(t_0) = X_U^0 \end{cases} \quad (4)$$

传统精密定轨的实质就是在已知双星定位系统两颗静地卫星星历的条件下,利用上述距离和观测模型和近地卫星的动力学模型求解近地卫星的状态向量,而联合定轨则是根据上述模型,利用飞行动力学关系及距离和测量几何关系联合解算任意时刻静地卫星、近地卫星的瞬时状态向量或瞬时轨道根数.

2.2 基于距离和观测数据的联合定轨模型

对于近地卫星定轨而言,由于交叉距离和测量关系中实际上隐含了两颗星的双程距离和测量关系,在观测数据精度相当且较为充分的情况下,对交叉距离和观测数据的分析更具有普遍意义和代表性. 根据交叉距离和观测模型 (3),可以建立两个距离和观测量的条件方程分别为:

$$y_{S1} = \frac{\partial S_1}{\partial(\varphi_1, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_2, \varphi_U, \varphi_U)} \cdot \begin{bmatrix} X_{B10} \\ X_{B20} \\ X_{U0} \end{bmatrix} + s_1 = \left[ 2 \left[ \frac{(\varphi_1 - \varphi_c)}{|\varphi_1 - \varphi_c|} - \frac{(\varphi_U - \varphi_1)}{|\varphi_U - \varphi_1|} \right], 0, 0, 0, 2 \frac{(\varphi_U - \varphi_1)}{|\varphi_U - \varphi_1|}, 0 \right] \cdot \begin{bmatrix} X_{B10} \\ X_{B20} \\ X_{U0} \end{bmatrix} + s_1 \quad (5)$$

$$y_{S2} = \frac{\partial S_2}{\partial(\varphi_1, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_2, \varphi_U, \varphi_U)} \cdot \begin{bmatrix} X_{B10} \\ X_{B20} \\ X_{U0} \end{bmatrix} + s_2 = \left[ \frac{(\varphi_1 - \varphi_c)}{|\varphi_1 - \varphi_c|} - \frac{(\varphi_U - \varphi_1)}{|\varphi_U - \varphi_1|}, 0, \frac{(\varphi_2 - \varphi_U)}{|\varphi_2 - \varphi_U|} - \frac{(\varphi_c - \varphi_2)}{|\varphi_c - \varphi_2|}, 0, \frac{(\varphi_U - \varphi_1)}{|\varphi_U - \varphi_1|} - \frac{(\varphi_2 - \varphi_U)}{|\varphi_2 - \varphi_U|} \right] \cdot \begin{bmatrix} X_{B10} \\ X_{B20} \\ X_{U0} \end{bmatrix} + s_2 \quad (6)$$

根据联合定轨系统测量几何关系,经过简单推导(具体过程参阅文献[4])距离和观测量条件方程可变形为:

$$\begin{bmatrix} y_{S1} \\ y_{S2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 \left[ \frac{\partial R_{C1}}{\partial(\varphi_1, \varphi_1)} + \frac{\partial R_{B1}}{\partial(\varphi_1, \varphi_1)} \right] & \frac{\partial R_{C1}}{\partial(\varphi_1, \varphi_1)} + \frac{\partial R_{B1}}{\partial(\varphi_1, \varphi_1)} \\ 0 & 2 \frac{\partial R_{B2}}{\partial(\varphi_2, \varphi_2)} \\ 2 \frac{\partial R_{B1}}{\partial(\varphi_U, \varphi_U)} & \frac{\partial R_{B1}}{\partial(\varphi_U, \varphi_U)} + \frac{\partial R_{B2}}{\partial(\varphi_U, \varphi_U)} \end{bmatrix}^T \cdot \begin{bmatrix} B1 & 0 & 0 \\ 0 & B2 & 0 \\ 0 & 0 & U \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{B10} \\ X_{B20} \\ X_{U0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

上式定义为: \$y\_s = H\_s x\_0 + s\$ (8)

则基于加权最小二乘法的初始轨道 (设观测权矩阵为  $W_s$ ) 估计为:

$$\hat{X}_0 = (H_s^T W_s H_s)^{-1} H_s^T W_s Y_s, X = X_0^* + \hat{X}_0.$$

### 2.3 系统误差参数估计

对于基于双星定位系统的近地卫星联合定轨而言,其主要工作就是估准测量系统误差,揭示随机误差的统计特性,得到符合工程景象的高精度定轨结果.由于在仿真产生距离和观测数据时加入了一定的星历误差和测距误差(本文假定加周期为一天的余弦函数)<sup>[5]</sup>,同时由于近地卫星每个可见观测弧段相对整个观测周期时间很短,在每个观测弧段内其系统误差可以认为是基本不变的,因此最简单的处理方式是将其假定为常值系统误差;同时现行双星定位系统在每个可见观测弧段中还存在距离和观测数据的切换问题,因此每个观测弧段(假设共有  $N$  个可见观测弧段)需要估计两个常值系统误差,即

$$SE_2 = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{21} & \dots & b_{\lambda 1} \\ b_{12} & b_{22} & \dots & b_{\lambda 2} \end{bmatrix}^T$$

对于一般形式系统误差的参数估计问题,可以采用经典的最小二乘算法,直接应用 Gauss-Newton 极值求解方法实现,而对于常值系统误差的估计问题可以采用如下一种更为有效的简单算法.这里以两个可见观测弧段  $m$  个观测数据为例进行讨论.含有测量系统误差的近地卫星任意时刻距离和观测方程可表示为:

$$\begin{cases} Y_1(t) = S_1(X(X_0, t), t) + b_1 + \epsilon_1(t) \\ Y_2(t) = S_2(X(X_0, t), t) + b_2 + \epsilon_2(t) \end{cases} \quad (9)$$

其中:  $b_1, b_2$  为常值系统误差; 设  $\{\epsilon_i(t)\}_{j=1}^m$  是方差为  $\sigma_i^2$  的零均值正态白噪声序列. 记:

$$Y = \begin{bmatrix} {}_1^{-1} Y_1(t_1) \\ {}_2^{-1} Y_2(t_2) \\ \dots \\ {}_1^{-1} Y_1(t_{m-1}) \\ {}_2^{-1} Y_2(t_m) \end{bmatrix}, Z = \begin{bmatrix} {}_1^{-1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & {}_2^{-1} & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & {}_1^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & {}_2^{-1} \end{bmatrix},$$
  
$$b = \begin{bmatrix} b_{11} \\ b_{12} \\ b_{21} \\ b_{22} \end{bmatrix}, S = \begin{bmatrix} {}_1^{-1} S_1(t_1) \\ {}_2^{-1} S_2(t_2) \\ \dots \\ {}_1^{-1} S_1(t_{m-1}) \\ {}_2^{-1} S_2(t_m) \end{bmatrix}, = \begin{bmatrix} {}_1^{-1} {}_1(t_1) \\ {}_2^{-1} {}_2(t_2) \\ \dots \\ {}_1^{-1} {}_1(t_{m-1}) \\ {}_2^{-1} {}_2(t_m) \end{bmatrix}.$$

在上述记号下距离和观测方程 (9) 可变为:

$$Y = S + Zb + \epsilon \quad (10)$$

假设:

$$H = Z(Z^T Z)^{-1} Z^T \quad \tilde{Y} = (I - H) Y$$

$$G(X_0) = (I - H) S(X_0) = (I - H)$$

注意到  $(I - H) Zb = LZ - Z(Z^T Z)^{-1} Z^T Z b = 0$

因此距离和观测方程变为:

$$\tilde{Y} = G(X_0) + \epsilon \quad (11)$$

下面的定理给出了求解含常值系统误差的距离和观测方程 (9) 的简单方法.

定理 1<sup>[6]</sup> 若  $X_0, \theta$  是极值问题 (11) 的解, 那么

$$\begin{cases} \tilde{Y} - G(X_0) = \min_{X_0} \tilde{Y} - G(X_0) \\ \theta = (Z^T Z)^{-1} Z^T (\tilde{Y} - G(X_0)) \end{cases} \quad (12)$$

该定理表明对于含有常值系统误差的参数估计问题, 可以通过简单的变换先利用最小二乘算法求得轨道初值的估计值, 然后利用系统误差参数与轨道初值之间的映射关系求解系统误差参数.

### 3 基于数值融合法的联合定轨算法

由于可以利用基于数值积分策略的轨道生成软件外推得到任意时刻的双星、近地卫星状态向量的概略值, 同时考虑到基于距离和观测数据联合定轨模型中求解  $H_s$  矩阵中状态转移矩阵的复杂性, 我们采用数值融合法求解  $H_s$  矩阵, 其通用表达式如下:

$$H_s = \left[ \frac{\partial S}{\partial X} \cdot \frac{\partial X}{\partial X_0} \right] \Big|_{X_0} \triangleq \left[ \frac{\partial \tilde{S}}{\partial X_0} \right]_{X_0} = \frac{\tilde{S}(X_0^* + X_0) - \tilde{S}(X_0^*)}{X_0}$$

对于双星定位系统及近地卫星而言,

$$H_s = \left[ \frac{\tilde{S}(X_0^* + x_{10} \cdot e_1) - \tilde{S}(X_0^*)}{x_{10}}, \dots, \frac{\tilde{S}(X_0^* + \tilde{z}_{10} \cdot e_{18}) - \tilde{S}(X_0^*)}{\tilde{z}_{10}} \right]$$

这里  $\tilde{S}$  是计算观测值,  $e_i$  是单位坐标向量.

根据非线性回归模型的 LS 估计 Gauss-Newton 迭代方法, 基于上述数值融合法的近地卫星联合定轨算法的基本迭代格式如下:

$$\begin{cases} \text{给定初值 } X_0^{(0)}, \\ V_j = \nabla G(X_0^{(j)}), \\ X_0^{(j+1)} = X_0^{(j)} + (V_j^T V_j)^{-1} V_j^T (\tilde{Y} - G(X_0^{(j)})), \\ \theta = (Z^T Z)^{-1} Z^T (\tilde{Y} - G(X_0)). \end{cases} \quad (13)$$

基于上述数值融合算法的近地卫星联合定轨算法的具体步骤如下:

Step 1 给定轨道初值  $X_0^{(0)}$  及常数  $1 > 0, \lambda > 0$ ;

Step 2 计算  $X_0^{(1)} = X_0^{(0)} + 1 \cdot (V_0^T V_0)^{-1} V_0^T (\tilde{Y} - G(X_0^{(0)}))$  ( $\lambda$  为收敛因子).

Step 3 定义  $Q(X_0) = (\tilde{Y} - G(X_0))^T \cdot (\tilde{Y} - G(X_0))$ , 计算  $Q(X_0^{(0)}), Q(X_0^{(1)})$ , 若  $Q(X_0^{(1)}) < Q(X_0^{(0)})$  (称为允许误差, 则转向 step 4; 若  $Q(X_0^{(1)}) > Q(X_0^{(0)})$ , 则令  $\lambda = \lambda/2$  转向 step 2

Step 4 对于给定的  $\lambda$ , 若  $Q(X_0^{(0)}) - Q(X_0^{(1)}) < \lambda$ , 则  $X_0 = X_0^{(1)}$ ; 否则令  $X_0^{(0)} = X_0^{(1)}$  并将  $\lambda$  恢复到 step 1 中所给值, 返回 step 2

Step 5 根据初始状态向量精确值  $X_0$  可以解算得到任意时刻  $t$  双星及近地卫星状态向量  $X(t)$  的准确值。

### 4 仿真实验及精度分析

#### 4.1 距离和仿真数据生成及联合定轨仿真条件

距离和仿真数据:根据静地卫星星历计算得到理论距离和数据,在此基础上加上由观测残差系统误差模型仿真产生的测距误差和 10米随机误差模拟生成距离和仿真数据,并考虑距离和数据切换周期和双星定位系统的观测区域选用可观测弧段的距离和数据;

动力学模型参数:地球同步卫星动力学模型(J20的地球引力场 JGM2模型以及日月引力、太阳光压、固体潮模型);近地卫星动力学模型(J20的地球引力场 JGM2模型以及大气阻力、日月引力、太阳光压、固体潮模型)。

#### 4.2 联合定轨仿真结果及说明

CASE 1 选用总长度为 86400秒、每 5秒一个采样点的距离和仿真数据,根据双星定位系统的工作区域计算得到其实际可用观测数据为 7500秒,观测数据的切换周期为 50秒,此时通过传统精密定轨和联合定轨两种方式解算常值系统误差  $SE_2$ 。

CASE 2 选用总长度为 86400秒、每 5秒一个采样点的距离和仿真数据,所加双星星历误差及距离和观测系统

误差均为 30米的常值误差,此时通过传统精密定轨和联合定轨两种方式解算常值系统误差  $SE_2$ 。

#### CASE 3 选用

总长度为 172800秒、每 5秒一个采样点的距离和仿真数据,根据双星定位系统的工作区域计算得到其实际可用观测数据为 14700秒,双星观测数据的切换周期为 50秒,此时通过传统精密定轨和联合定轨两种方式解算常值系统误差  $SE_2$ ,其 J2000 惯性坐标系下位置方向定轨误差分别如下图 3、4所示。

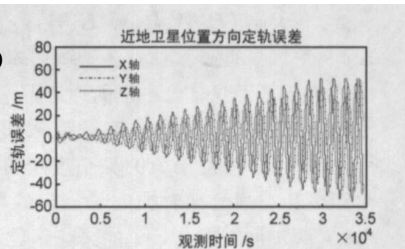


图 3 Case3 近地卫星精密定轨位置误差

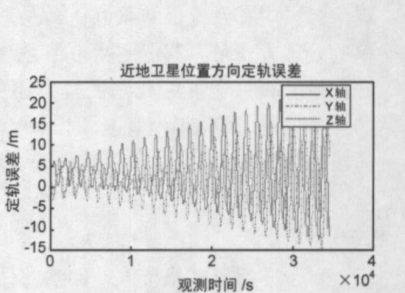


图 4 Case3 近地卫星联合定轨位置误差

以下是上面三种情况下的仿真条件以及与传统数值融合定轨仿真计算结果的对比,具体见表 1所示。

表 1 不同条件下的联合定轨仿真结果及其与传统精密定轨结果比较

仿真情况	观测数据(可用观测量)	切换周期(秒)	仿真数据所加误差源			定轨方式	卫星类型	卫星定轨精度(m)			
			距离和	$B_1$ 星星历	$B_2$ 星星历			X轴	Y轴	Z轴	位置误差
1	86400 (1500)	50	A = 30 S = 5	A = 30 S = 0	A = 30 S = 0	传统定轨	近地卫星 U	21.53	15.90	20.08	33.46
							近地卫星 U	16.31	19.04	12.48	28.00
						联合定轨	B1卫星	33.60	42.02	48.16	72.21
							B2卫星	45.51	27.48	11.42	54.37
2	86400 (1500)	50	A = 30 (C)	A = 30 (C)	A = 30 (C)	传统定轨	近地卫星 U	21.18	17.26	18.02	32.73
							近地卫星 U	6.99	9.25	6.09	13.11
						联合定轨	B1卫星	18.13	26.64	52.75	61.81
							B2卫星	31.69	31.33	21.16	49.33
3	172800 (2940)	50	A = 30 S = 5	A = 30 S = 0	A = 30 S = 0	传统定轨	近地卫星 U	23.64	19.70	19.15	36.24
							近地卫星 U	7.68	7.16	4.05	11.26
						联合定轨	B1卫星	21.60	24.72	30.84	45.04
							B2卫星	23.91	20.89	3.43	31.94

#### 4.3 简要结论

(1)完全观测情况下的联合定轨结果与传统精密定轨结果相比,联合定轨可以较好地改善近地卫星的定轨精度;对静地卫星的定轨综合利用了地面测量和空间测量信息,静地卫星的定轨精度也得到一定程度的改善;

(2)当距离和仿真数据所加误差源形成较为简单时,系统误差估计效果较好,此时近地卫星定轨精度改善较为明显;

(3)两天观测数据条件下传统方法得到的近地卫星定轨精度与一天数据相比反而降低,这主要是由于利用轨道生成软件外推产生轨道时会随着观测时间的增加轨道累

计误差逐渐增加;而采用联合定轨方式则很好地抑制了两颗静地卫星星历误差对近地卫星精密定轨的影响,近地卫星定轨精度有较大幅度的提高。

### 5 结束语

本文建立了基于双星定位系统的近地卫星的距离和观测联合定轨模型,构建了一种有效的系统误差参数估计方法和基于数值融合合法的联合定轨算法,初步的仿真计算结果表明联合定轨方式可以较好地抑制静地卫星星历误差对定轨精度的影响,近地卫星和两颗静地卫星的定轨精度均得到了较大幅度的提高,这验证了我们所建立的联合

定轨模型及实现算法的有效性.同时,本文所设计的联合定轨数值融合算法避免求解卫星状态向量的状态转移矩阵,具有计算量小,稳健性好等特点.

利用双星定位系统对近地卫星进行精密定轨是国内发展天基测控技术的一种新的尝试,本文的研究只是原理性的探讨和初步的仿真实验,还需要进行更深入的研究,如卫星动力学模型的稀疏参数建模及高精度表示、测量系统误差建模、联合定轨结果的偏差修正等则是我们需要进一步深入研究的问题.

#### 参考文献:

- [1] ZHAO Deyong, PAN Xiaogang The model and algorithm of LEO satellite combined orbit determination based on Bi-satellite positioning system [A]. Progress in Intelligent Computation and Its Application [C]. WuHan: China University of Geosciences Press, 2005. 619 - 624.
- [2] Marshall J A, Lerch F J. An assessment of TDRSS for precision orbit determination [J]. The Journal of the Astronautical Sciences, 1996, 44 (1): 115 - 127.
- [3] 胡松杰, 陈力, 刘林. 双星定位系统中低轨卫星定轨中的应用 [J]. 天文学报, 2002, 43 (3): 293 - 301.  
Hu Songjie, Chen Li, Liu Lin The application of Bi-satellite positioning system to LEO or MEO satellite orbit determination [J]. 2002, 43 (3): 293 - 301. (in Chinese)
- [4] Zhao Deyong, Pan Xiaogang, Wang Jiongqi, et al Research on two sorts of combined orbit determination models based on BPS and improved fusion algorithm [A]. Conference Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Conference on Electronic

Measurement & Instruments [C]. Beijing: Jiaotong University Press, 2005, (3): 682 - 686

- [5] Zhao Deyong, Wang Jiongqi, Zhou Haiyin, et al Research on LEO range sum observation data simulation and precise orbit determination fusion algorithm based on Bi-satellite positioning system [J]. 模糊系统与数学, 2005, 19 (4): 28 - 35.
- [6] 王正明, 易东云. 测量数据建模与参数估计 [M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1996  
Wang Zhengming, Yi Dongyun Modeling and Parameter Estimation of Measured Data [M]. Changsha: National University of Defense Technology Press, 1996. (in Chinese)

#### 作者简介:

赵德勇 男, 1977年 2月出生于湖北省孝感市, 2004年攻读国防科技大学系统工程专业博士学位, 主要研究方向为数据融合与试验评估. E-mail: zdy77218@sina.com

王炯琦 男, 1979年 9月出生于浙江省绍兴市, 2005年攻读国防科技大学应用数学专业博士学位, 主要研究方向为武器系统试验设计分析与评估. E-mail: wangjq1979@163.com

周海银 男, 1965年 10月出生于湖南省岳阳市, 于 2004年获得国防科技大学系统工程专业博士学位, 现为国防科技大学理学院教授, 硕士生导师, 主要研究方向为数据融合与试验评估.

王正明 男, 1962年出生于湖南省岳阳市, 现为国防科技大学理学院教授, 博士生导师. 主要研究方向为数据融合与试验评估、数字图像处理的数学理论与技术.

潘晓刚 男, 1979年 12月出生于山东省安丘市, 2006年攻读国防科技大学应用数学专业博士学位, 主要研究方向为武器系统试验设计分析与评估.