



论文

基于星敏感器和星间链路的卫星星座自主定轨研究

甘庆波^{①②*}, 马剑波^①, 徐劲^①

① 中国科学院紫金山天文台, 南京 210008;

② 中国科学院研究生院, 北京 100049

* E-mail: qbo.gan@gmail.com

收稿日期: 2009-11-20; 接受日期: 2010-01-08

国家自然科学基金资助项目(批准号: 10673035)

摘要 以对地定位观测三星星座为例, 研究了联合星敏感器和星间链路测量信息的卫星星座自主定轨方法. 通过仿真三星星座星间链路观测和 CCD 星敏感器对背景恒星的观测, 生成两种类型的仿真观测资料, 基于这些资料建立了星座联合自主定轨的测轨方程, 在此基础上进行了星座自主定轨的仿真计算. 综合考虑各种定轨方案以及潜在的各种测量误差的影响, 对卫星星座自主定轨精度进行了比较和分析, 结果表明所采用技术手段应用于卫星星座自主定轨是可行的, 并形成了若干研究结论, 对于这种自主定轨技术拓展应用于更广泛意义下的卫星编队星座具有重要的参考价值.

关键词 卫星星座, 星敏感器, 星间链路, 自主定轨

PACS: 95.10.Eg, 95.40.+s, 95.55.-n

卫星自主定轨是确保飞行器在轨安全运营的一种重要手段, 是当前国际上卫星动力学研究领域的热门课题之一. 国际上采用的主要技术包括: 利用导航星系统(如星载 GPS)^[1,2]、利用中继星(如 TDRSS)^[3]、利用星载地球磁强计^[4,5]、利用星载敏感器^[6]以及近年来兴起的利用脉冲星相位信号^[7,8]等实现星上自主定轨, 前两种技术虽能达到很高的定轨精度, 但却不是真正意义上的自主定轨, 在后几种技术中, 利用星敏感器的自主定轨从技术成熟度和定轨精度两方面综合考虑在当前具备较好的实用价值.

利用星敏感器的自主定轨技术在国际上受到广泛重视, 欧美等主要发达国家已形成较好的研究基础, 国内这方面研究尚处于研究的起步阶段, 大多数

研究还是概念性研究^[9,10], 研究方法简单, 不能较好地反应实际情况. 文献[11]基于卫星轨道动力学和姿态动力学的基本原理, 仿真了在轨飞行器的轨道运动和姿态运动变化, 并通过对恒星星表和实际型号星敏感器的选用建立了飞行器运动特征与复杂空间观测环境之间的动态关联, 在此基础上运用 CCD 照相天体测量原理仿真产生了星敏感器观测资料, 首次在逼真的仿真环境下展开了对这种自主定轨技术的研究, 取得了一系列有实际参考价值的研究结论, 但该文的研究局限于单颗卫星, 对这种技术用于卫星星座的自主定轨国内外尚未见成果发表.

国际上自 20 世纪 80 年代开始发展小卫星技术以来, 卫星星座逐步得到广泛的空间应用, 如美国白

云卫星星座、我国的 HJ-1 和欧空局的 LISA 星座等。卫星星座通过组成星座的各颗卫星之间的协同工作能够实现单颗卫星无法达到的应用需求, 星座的共同特点是星座中的各颗卫星之间一般具有星间链路通信, 一方面通过信息交换完成各星之间的协同工作, 另一方面可以得到各星之间精确的测距资料, 为实现卫星星座的定轨奠定了良好的基础。相关的研究表明^[12]仅利用星座中各星间测距资料的定轨过程是一个亏秩计算过程, 不能有效地实现对星座的定轨处理, 为了克服这一本质困难, 必须辅之以其他测量技术, 至少应在其中一颗卫星上建立某种绝对测量基准。本文主要展开基于星敏感器和星间链路的卫星星座自主定轨研究, 通过在某颗主星上搭载星敏感器和红外地平仪获取导航观测数据, 星敏感器导航数据与星间链路测量数据相结合, 一方面, 可解决定轨计算中的亏秩问题, 能够有效实现对卫星星座的联合定轨, 另一方面, 定轨处理彻底摆脱了对地面站的依赖, 实现了真正意义上的星座自主定轨。

研究过程中, 我们参照美国白云系列的三星星座, 设计了一个能够适用于对地观测定位的三星编队星座, 该星座中的三颗卫星分布在两个轨道面上, 星座由一颗异轨星和同轨双星组成, 其中星间距的变化范围控制在 30~150 km。本文以此三星编队星座为例, 展开卫星星座的自主定轨研究, 具有较好的典型意义, 不仅可以对最基本的多星(三星)星座展开自主定轨研究, 而且也包含了对最简单的双星星座的自主定轨研究, 研究方法和结论有利于向复杂的多星星座拓展推广。

1 星座自主定轨方法

三星编队星座利用星敏感器和星间链路自主定轨的观测模型如图 1。

图中主星搭载星敏感器和红外地平仪观测设备, 星敏感器与主星刚性连接, 红外地平仪测算地心方向, 星座中各星之间有星间链路。星座自主定轨利用的观测资料是星敏感器对恒星的观测数据、由红外地平仪观测数据测算得到的地心方向与星敏感器光轴指向的夹角 θ 以及星间伪距测量数据^[13,14]

$$L_{ij}(i, j=1, 2, 3, i \neq j).$$

三星星座自主定轨的测量方程为

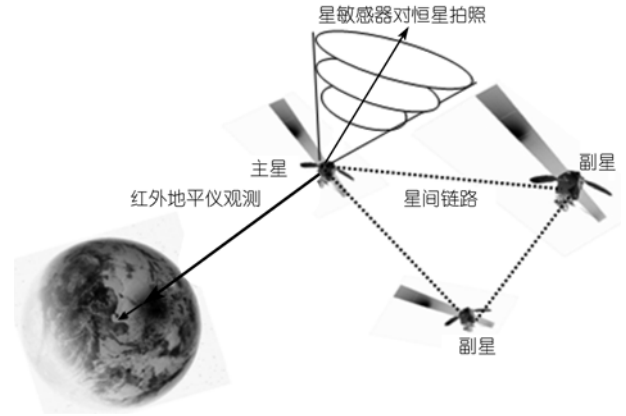


图 1 三星星座利用星敏感器和星间链路自主定轨的测量模型

$$\begin{cases} \theta = \arccos\left(-\frac{\mathbf{r}}{r} \cdot \boldsymbol{\rho}_s\right) + V_\theta, \\ L_{ij} = \rho_{ij} + V_L = |\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j| + V_L. \end{cases} \quad (1)$$

上式中, $\mathbf{r}$ 为主星的位置矢量, r 为其模, $\mathbf{r}_i$ 与 $\mathbf{r}_j$ 分别为第 i 颗和第 j 颗卫星的位置矢量, ρ_{ij} 是第 i 颗与第 j 颗卫星之间的几何距离, V_θ 是红外地平仪测量误差, V_L 为星间链路测量误差, $\boldsymbol{\rho}_s$ 为星敏感器光轴指向单位矢量, 即

$$\boldsymbol{\rho}_s = \begin{pmatrix} \cos \alpha_0 \cos \delta_0 \\ \sin \alpha_0 \cos \delta_0 \\ \sin \delta_0 \end{pmatrix}. \quad (2)$$

(α_0, δ_0) 是星敏感器光轴指向对应的天球坐标的赤经和赤纬, 由观测到的背景恒星的天球坐标和对应的照相底片坐标归算得到。

为简洁地说明定轨原理, 在定轨过程中仅估算卫星星座的轨道参数, 不考虑其它物理和星体参数, 设三星星座轨道参数为

$$\mathbf{X} = (\boldsymbol{\sigma}_1, \boldsymbol{\sigma}_2, \boldsymbol{\sigma}_3)^T. \quad (3)$$

$\boldsymbol{\sigma}_i$ 选择第一类无奇点根数, 具体形式是

$$\boldsymbol{\sigma}_i = (a, i, \Omega, \xi = e \cos \omega, \eta = e \sin \omega, \lambda = M + \omega)_i^T, \quad (4)$$

相应的待估轨道参数为某历元 t_0 时刻的 $\mathbf{X}_0 = \mathbf{X}(t_0)$ 。

星座自主定轨中的观测资料记为 $\mathbf{Y} = (\theta, L_{ij})^T$, 对测量方程线性化后得到定轨的条件方程为

$$\mathbf{y} = \mathbf{B}\mathbf{x} + \mathbf{v}, \quad (5)$$

其中 $\mathbf{x}$ 为待估参数的修正量, $\mathbf{v}$ 为测量误差, $\mathbf{y}$ 为观测

值 Y_o 和计算值 Y_c 的残差, 即

$$\mathbf{y} = \mathbf{Y}_o - \mathbf{Y}_c = \begin{pmatrix} \theta_o - \theta_c \\ L_{ij}^o - L_{ij}^c \end{pmatrix}. \quad (6)$$

$\mathbf{B}$ 矩阵是观测量对状态量的一阶偏导数, 具体表达式为

$$\mathbf{B} = \left(\frac{\partial \mathbf{Y}}{\partial \mathbf{r}} \right) \left(\frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \mathbf{X}} \right) \left(\frac{\partial \mathbf{X}}{\partial \mathbf{X}(t_0)} \right). \quad (7)$$

以联合自主定轨方法为例, 得到 $\mathbf{B}$ 中三个矩阵的具体形式为

$$\left(\frac{\partial \mathbf{Y}}{\partial \mathbf{r}} \right) = \begin{pmatrix} \frac{\partial \theta}{\partial \mathbf{r}_1} & 0 & 0 \\ \frac{\partial L_{12}}{\partial \mathbf{r}_1} & \frac{\partial L_{12}}{\partial \mathbf{r}_2} & 0 \\ \frac{\partial L_{13}}{\partial \mathbf{r}_1} & 0 & \frac{\partial L_{13}}{\partial \mathbf{r}_3} \\ 0 & \frac{\partial L_{23}}{\partial \mathbf{r}_2} & \frac{\partial L_{23}}{\partial \mathbf{r}_3} \end{pmatrix}, \quad (8)$$

$$\left(\frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \mathbf{X}} \right) = \begin{pmatrix} \frac{\partial \mathbf{r}_1}{\partial \sigma_1} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial \mathbf{r}_2}{\partial \sigma_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial \mathbf{r}_3}{\partial \sigma_3} \end{pmatrix}, \quad (9)$$

$$\left(\frac{\partial \mathbf{X}}{\partial \mathbf{X}(t_0)} \right) = \begin{pmatrix} \frac{\partial \sigma_1}{\partial \sigma_1(t_0)} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial \sigma_2}{\partial \sigma_2(t_0)} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial \sigma_3}{\partial \sigma_3(t_0)} \end{pmatrix}, \quad (10)$$

上述公式中, $\sigma_1(t_0)$, $\sigma_2(t_0)$ 和 $\sigma_3(t_0)$ 分别是 t_0 时刻的三颗卫星的轨道参数, $\partial \mathbf{r} / \partial \mathbf{X}$ 和 $\partial \mathbf{X} / \partial \mathbf{X}(t_0)$ 在众多文献^[12]中都给出过具体的计算公式, 本文不再赘述.

由测量方程(1), 得到 $\partial \mathbf{Y} / \partial \mathbf{r}$ 分量的具体形式为

$$\frac{\partial \theta}{\partial \mathbf{r}_1} = \frac{1}{r_1 \sin \theta} \left(\rho_s + \frac{r_1}{r_1} \cos \theta \right), \quad (11)$$

$$\frac{\partial L_{12}}{\partial \mathbf{r}_1} = -\frac{\partial L_{12}}{\partial \mathbf{r}_2} = \frac{\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2}{L_{12}}, \quad (12)$$

$$\frac{\partial L_{13}}{\partial \mathbf{r}_1} = -\frac{\partial L_{13}}{\partial \mathbf{r}_3} = \frac{\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_3}{L_{13}}, \quad (13)$$

$$\frac{\partial L_{23}}{\partial \mathbf{r}_2} = -\frac{\partial L_{23}}{\partial \mathbf{r}_3} = \frac{\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_3}{L_{23}}. \quad (14)$$

利用加权最小二乘方法得到

$$\mathbf{x}^{lsq} = (\mathbf{B}^T \mathbf{W} \mathbf{B})^{-1} (\mathbf{B}^T \mathbf{W} \mathbf{y}). \quad (15)$$

在定轨过程中采用的权矩阵 $\mathbf{W}$ 为

$$\mathbf{W} = \text{diag}(w_\theta, w_{L_{12}}, w_{L_{13}}, w_{L_{23}}) = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sigma_\theta^2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma_{L_{12}}^2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\sigma_{L_{13}}^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\sigma_{L_{23}}^2} \end{pmatrix}, \quad (16)$$

σ 是观测资料残差的标准差.

2 观测资料仿真

由于目前对该方法的研究尚无实际观测资料, 研究中只能通过仿真计算产生模拟观测数据. 本文选取的三星星座轨道参数见表 1, 仿真用到的星体参数和姿态参数与文献[11]相同. 为了研究的简洁且不失一般性, 主星选用三轴稳定卫星, 仅考虑重力梯度力矩对主星姿态的影响, 采用 Tycho-2 星表, 门限星等设为 8 等星, 星敏感器视场为 $2^\circ \times 2^\circ$, 焦距为 20 cm, 星敏感器光轴放置在星体坐标系 z 轴(接近于卫星在轨运行时的地心方向)的反方向, 观测弧段长度为 2 天, 每 10 s 产生一组星敏感器观测恒星背景的数据

表 1 三星星座各卫星的轨道 Kepler 根数

卫星	星座各卫星轨道根数					
	a (km)	e	i ($^\circ$)	Ω ($^\circ$)	ω ($^\circ$)	M ($^\circ$)
主星	7449.20	0.0275	63.43	62.067091	358.5	26.529514
副星 1	7449.20	0.0275	63.43	62.960353	1.5	22.732641
副星 2	7449.20	0.0275	63.43	62.960353	1.5	23.520182

和地心方向与星敏感器光轴指向夹角资料. 为了保护星敏感器的相关光学器件, 当星敏感器光轴指向与太阳方向的夹角小于 35° 时不对背景恒星进行观测.

主星的星敏感器观测数据的具体产生过程如下: 星敏感器与主星刚性连接, 首先计算卫星空间位置和速度, 摄动模型主要考虑地球非球形引力摄动、日月引力摄动、潮汐摄动、太阳辐射压摄动和大气阻力摄动; 然后仿真计算主星姿态矩阵, 由卫星姿态和空间位置可以计算得到由历元地心惯性系到主星星体坐标系的旋转矩阵, 再利用星敏感器的初装矩阵可以计算得到观测时刻的星敏感器光轴指向的单位矢量及视场中心的赤经赤纬, 从而可以得到星敏感器所能观测到的恒星及 CCD 视场内恒星的量度坐标. 通过得到的星敏感器光轴指向单位矢量利用公式(1)可得到星敏感器光轴指向与地心方向的夹角 θ , 详细过程可参照文献[11]中的星敏感器观测数据仿真计算.

星间链路的观测资料产生过程是利用同一时刻各卫星位置计算星间几何距离, 利用公式(1)最后输出星间伪距测量资料.

仿真研究中, 我们结合当前各种测量技术水平对测量误差进行了针对性的考虑, 对于星间链路测量和星敏感器测量仪考虑了随机差, 而对红外地平仪不仅考虑了随机差还纳入了系统差, 由于实际运行中引起红外地平仪测量系统误差的因素有很多, 系统差的根源很难确知, 因此只考虑了常值系统差.

3 自主定轨计算

本文针对现有的测量设备精度, 对三星星座以及其中包含的单星(主星)和双星星座进行了自主定轨研究, 单星的情况为主星搭载星敏感器和红外地平仪, 双星则在主星的基础上增加与副星 1 的星间链路观测, 而三星星座则分两种星间链路模式分别进行探讨.

由于星间链路技术相对比较成熟, 现有的星间距测量精度能达到米级, 其测量误差主要受到星载原子钟同步误差的影响, 与红外地平仪的测量精度相比, 星间链路测量误差对卫星定轨精度的影响要小很多, 在本文的研究中将主要考虑红外地平仪和星敏感器观测误差对星座定轨精度的影响, 并在相应的分析计算中设定星间链路随机测量误差为 10 m, 而星间链路系统差对定轨精度的影响将在本文后面部分做一专门讨论.

3.1 单星自主定轨

在文献[11]的基础上, 本文对主星利用星敏感器观测资料自主定轨进行了仿真计算, 表 2 列出了各种星敏感器和红外地平仪随机误差情况下主星的自主定轨精度, 表 3 则是在星敏感器随机测量误差 $5''$ 时几种红外地平仪测量误差情况下的主星定轨精度, 卫星的定轨精度是历元 t_0 时刻的空间位置偏差.

由表 2 和表 3 可知, 主星的定轨误差随着星敏感器随机误差增大而增大, 但是增长的幅度要远低于红

表 2 几种红外地平仪和星敏感器随机误差下的主星定轨精度(单位: m)

红外地平仪 随机差	星敏感器随机误差					
	5''	10''	15''	20''	25''	30''
30''	103.098	106.562	110.450	114.660	119.127	123.850
60''	203.254	206.606	210.327	214.336	218.588	223.102
90''	303.326	306.614	310.242	314.144	318.284	322.691
120''	403.318	406.555	410.114	413.937	417.997	422.333

表 3 几种红外地平仪测量误差下的主星定轨精度(单位: m)

红外地平仪 系统差	红外地平仪随机误差					
	30''	60''	90''	120''	150''	180''
30''	173.266	248.479	335.718	427.654	521.768	617.019
60''	289.800	341.689	409.977	487.778	571.164	657.999
90''	411.204	450.579	504.829	569.683	641.828	719.155
120''	531.356	563.457	608.197	662.777	725.307	793.727

外地平仪的测量误差影响, 红外地平仪随机误差增加 30" 自主定轨精度降低近 100 m, 而星敏传感器测量误差增加到 30" 时定轨精度才降低了 20 m 左右. 同时, 现今国内外星敏传感器的测量精度已达到角秒量级, 而红外地平仪由于地球红外观测的复杂性等诸多因素, 其测量精度只能达到角分量级. 因此, 在接下来的研究中将设定星敏传感器测量精度为 5", 主要考虑红外地平仪的测量误差对自主定轨精度的影响.

3.2 双星星座自主定轨

双星星座自主定轨, 如果仅利用星间链路, 由于定轨计算过程存在矩阵亏秩的问题, 以致不能确定两个卫星的轨道参数. 然而, 当一颗卫星上搭载红外地平仪和星敏传感器后, 正如引言所述, 利用这两种设备的观测在卫星上可以建立一种绝对测量基准, 从而使整个星座能够完成自主定轨. 本文选取了表 1 中的主星和副星 1 构成双星星座, 给出了几种红外地平仪测量误差情况下的定轨精度, 具体结果见表 4.

由表 4 可以看出, 在一颗卫星上搭载星敏传感器和红外地平仪后, 双星星座自主定轨能够顺利进行, 表

明这种自主定轨方法是可行的. 和表 3 相比, 在同样的红外地平仪测量误差情况下, 主星定轨精度普遍优于单星情况, 在红外地平仪随机误差 180" 和系统差 120" 时精度提高近 1 倍, 主星和副星的定轨精度都令人满意.

3.3 三星星座自主定轨

对于三星星座自主定轨, 本文分两种星间链路模式进行分析, 第一种是采用主星和副星之间有星间链路, 两颗副星之间没有星间链路, 其自主定轨结果见表 5; 第二种是三颗卫星之间都有星间链路, 其自主定轨结果见表 6.

由表 5 可知, 与双星星座相比, 第一种模式虽然多了一颗卫星和一条星间链路, 但主星和副星 1 的定轨精度仍与表 4 基本相当. 表 6 反映了第二种模式的三颗卫星定轨精度相比第一种模式都有所提高, 在红外地平仪系统差 120" 和随机差 180" 时三颗卫星定轨精度都能低于 300 m, 比第一种模式提高 50 m 左右.

由表 5 和表 6 可以看出, 增加星间链路能有效地提高星座各卫星的定轨精度, 当红外地平仪观测资

表 4 几种红外地平仪测量误差下的双星星座自主定轨精度(单位: m)

星座 卫星	红外地平仪 系统差	红外地平仪随机误差					
		30"	60"	90"	120"	150"	180"
主星	30"	68.103	111.206	155.879	197.681	234.651	266.269
	60"	104.941	135.817	174.746	214.069	250.491	282.767
	90"	145.811	171.309	204.331	239.426	273.143	303.799
	120"	185.438	209.157	238.240	269.520	300.381	329.213
副星 1	30"	67.280	110.723	155.428	197.196	234.109	265.662
	60"	102.658	134.228	173.515	212.991	249.462	281.731
	90"	142.594	168.696	202.178	237.554	271.422	302.143
	120"	181.443	205.674	235.209	266.819	297.894	326.852

表 5 第一种模式几种红外地平仪测量误差下的星座自主定轨精度(单位: m)

星座	红外地平仪 系统差	红外地平仪随机误差					
		30"	60"	90"	120"	150"	180"
主星	30"	69.154	113.795	158.272	197.019	228.693	253.910
	60"	105.340	138.630	177.362	213.804	245.121	270.944
	90"	144.349	171.857	204.450	236.866	266.134	291.229
	120"	181.885	206.606	234.773	263.342	290.032	313.700
副星 1	30"	68.331	113.325	157.839	196.551	228.167	253.317
	60"	103.250	137.195	176.243	212.809	244.154	269.959
	90"	141.398	169.495	202.509	235.169	264.563	289.712
	120"	178.224	203.444	232.033	260.903	287.789	311.577
副星 2	30"	69.104	113.775	158.212	196.908	228.538	253.721
	60"	105.301	138.860	177.683	214.131	245.420	271.202
	90"	144.309	172.187	204.978	237.472	266.751	291.821

	120"	181.914	207.009	235.422	264.122	290.865	314.533
表 6 第二种模式几种红外地平仪测量误差下的星座自主定轨精度(单位: m)							
卫星	红外地平仪 系统差	红外地平仪随机误差					
		30"	60"	90"	120"	150"	180"
主星	30"	68.030	104.940	136.020	159.657	177.343	191.147
	60"	101.338	129.786	158.174	182.025	200.980	216.089
	90"	138.385	161.639	186.136	208.295	226.932	242.256
	120"	173.861	194.618	216.144	236.255	253.837	268.716
副星 1	30"	67.345	104.399	135.457	159.025	176.624	190.335
	60"	99.505	128.329	156.876	180.759	199.684	214.736
	90"	135.627	159.250	183.990	206.272	224.954	240.280
	120"	170.337	191.414	213.196	233.478	251.163	266.100
副星 2	30"	68.273	105.252	136.311	159.917	177.569	191.335
	60"	101.397	130.192	158.694	182.559	201.486	216.545
	90"	138.334	161.999	186.705	208.943	227.586	242.874
	120"	173.806	194.944	216.708	236.939	254.561	269.427

料误差较大时效果更为显著。

此外, 本文对三星星座的整体漂移和总体构型在以上两种模式下的稳定性也做了比较分析。三星星座构型变化如图 2 所示, 三角形三个顶点代表星座的三颗卫星, 实三角形代表实际位置, 虚三角形代表定轨得到的位置, 两个三角形的几何中心位置偏差情况说明了卫星星座的整体漂移情况, 而几何中心到各卫星的距离变化则反映了星座构型的保持情况。

针对星座的整体漂移, 统计了以上两种模式在几种红外地平仪测量误差下几何中心的位置偏差情

况(见表 7), 两种模式的星座几何中心偏差基本上与表 5 和表 6 中三颗卫星的定轨精度量级相当。分别比较表 7 中的两组数据, 第二种模式的几何中心位置偏差较小, 表明增加一条星间链路能有效减少星座的整体漂移。

通过比较星座几何中心到三颗卫星的距离变化之和分析两种模式下的星座整体构型保持情况, 具体结果见表 8。表中在相同资料误差情况下第二种模式的距离变化之和小于第一种模式, 在红外地平仪系统差 120"和随机差 180"时第一种模式的距离变化之和小于 2 m, 而第二种模式则不到 0.3 m, 表明这种星座自主定轨方法对星座整体构型的影响较小, 能够较好地保持星座飞行整体构型。

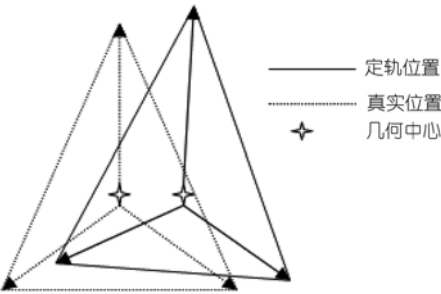


图 2 三星星座的漂移和构型变化示意图

4 讨论

4.1 与分离式自主定轨方法的比较

本文前述的星座自主定轨方法是利用星敏感器和星间链路资料同时确定星座各卫星的轨道参数,

表 7 两种模式三星星座的几何中心偏差情况(单位: m)							
星座	红外地平仪 系统差	红外地平仪随机误差					
		30"	60"	90"	120"	150"	180"
第一种模式	30"	68.858	113.627	158.103	196.821	228.460	253.643
	60"	104.626	138.223	177.089	213.575	244.891	270.694
	90"	143.346	171.172	203.971	236.494	265.807	290.911
	120"	180.667	205.678	234.067	262.779	289.552	313.260
第二种模式	30"	67.880	104.860	135.925	159.528	177.174	190.934
	60"	100.742	129.431	157.909	181.775	200.711	215.784
	90"	137.443	160.956	185.603	207.829	226.483	241.796

	120"	172.660	193.650	215.341	235.549	253.178	268.072
表 8 两种模式三星星座的几何中心相对各卫星的距离变化之和(单位: m)							
星座	红外地平仪系统差	红外地平仪随机误差					
		30"	60"	90"	120"	150"	180"
第一种模式	30"	0.708	0.719	0.716	0.732	0.806	0.884
	60"	0.748	0.742	0.762	0.799	0.883	0.937
	90"	0.771	0.761	0.792	0.826	0.880	1.025
	120"	0.788	0.785	0.807	0.832	0.862	1.084
第二种模式	30"	0.127	0.138	0.146	0.152	0.155	0.161
	60"	0.136	0.140	0.153	0.163	0.170	0.174
	90"	0.139	0.155	0.170	0.181	0.187	0.191
	120"	0.149	0.170	0.190	0.201	0.206	0.208

通常称之为联合定轨方法,此外还存在另一种自主定轨方法,即分离式定轨方法,其具体过程是先利用星敏感器资料确定主星的轨道参数,再利用星间链路资料以及得到的主星轨道参数确定其他卫星的轨道参数.

我们利用分离式定轨方法对前面提到的三星星座第二种模式进行了仿真计算,为了便于和联合定轨方法比较,给出了与表 6 相同的测量误差下的定轨精度,两颗副星的定轨精度见表 9. 由计算结果可见,副星的定轨精度相比表 6 要低很多,仅与表 3 中主星的定轨精度相当.

4.2 星间链路测量系统差对定轨精度的影响

星间链路测量的系统差根源比较复杂,而编队

星座为了确保星座寿命,通常都放置在大气层外,大气传播对星间链路测量基本没有影响,同时,相对论效应引起的误差也仅有厘米级,因此,星间链路测量主要受到星载原子钟同步误差影响,而当前国际上星载原子钟的同步误差一般能达到几个纳秒到几十个纳秒,所造成的测量系统差一般为 10 m 量级,本文对几种星间链路和红外地平仪系统差情况下第二种三星星座模式的自主定轨进行了仿真计算,选取星敏感器精度为 5",红外地平仪随机误差为 60",星间链路随机误差 10 m,钟同步误差换算成距离单位,具体结果参见表 10.

与表 7 相比,增加了星间链路的钟同步系统差之后,编队星座几何中心精度并未有显著变化,量级基本上和表 7 保持一致;而星座构型的误差在增加钟同

表 9 三星星座分离式自主定轨的副星定轨精度

星座 卫星	红外地平仪系统差	红外地平仪随机误差(单位: m)					
		30"	60"	90"	120"	150"	180"
副星 1	30"	174.749	251.993	340.283	432.881	527.489	623.152
	60"	289.517	344.193	414.356	493.386	577.609	665.017
	90"	409.149	451.375	507.861	574.357	647.741	725.885
	120"	526.986	561.894	608.984	665.626	729.555	798.985
副星 2	30"	174.553	251.169	338.942	431.069	525.220	620.425
	60"	289.314	343.108	412.479	490.788	574.335	661.087
	90"	408.244	449.380	504.843	570.397	642.903	720.214
	120"	524.932	558.575	604.464	659.992	722.890	791.357

表 10 几种星间链路和红外地平仪系统差下的几何中心和星座构型情况

第二种模式	原子钟同步系统差(单位: m)	红外地平仪系统误差(单位: m)			
		30"	60"	90"	120"
几何中心变化	5	94.233	120.141	153.055	184.908
	10	90.024	117.724	149.677	184.043
	15	93.661	122.702	155.915	191.860
	20	104.179	135.798	180.325	226.484
星座构型	5	9.645	9.667	9.711	9.595
	10	19.090	19.129	19.055	19.033

精度	15	28.424	28.467	28.389	28.367
	20	37.625	37.664	37.572	37.553

步系统差之后有所变化, 其大小与引入的钟同步系统差相当, 在现有的钟同步精度水平下, 星间链路测量系统差不会对编队星座构型精度产生本质影响。

4.3 星敏感器光轴指向和定轨精度的关系

为了能够在星座自主定轨方法的测量方程(1)式中更直观地反映红外地平仪和星敏感器的测量误差, 我们根据公式(1)的特点有针对性地对其进行变形, 得到如下关系式(保留误差的一阶项):

$$\cos \theta_o = \cos \theta_c + \sin \theta' (\delta\alpha + \delta\beta), \quad (17)$$

其中 θ_o 为红外地平仪观测得到的地心方向和星敏感器光轴真实指向的夹角, 即实际观测资料, θ_c 为卫星地心真方向与归算得到的星敏感器光轴指向的夹角, θ' 为真实地心方向和星敏感器光轴真实指向的夹角, $\delta\alpha$ 为星敏感器随机误差, $\delta\beta$ 为红外地平仪的测量误差(包括随机差和系统差)。图 3 简洁描述了星敏感器和红外地平仪在星体坐标系中的测量模型, 直观反映了各量的意义, 图中 ρ 与 ρ' 分别为星敏感器光轴的真实指向与归算得到后的指向, E 与 E' 则分别是卫星的地心真方向和红外地平仪观测得到的地心方向。

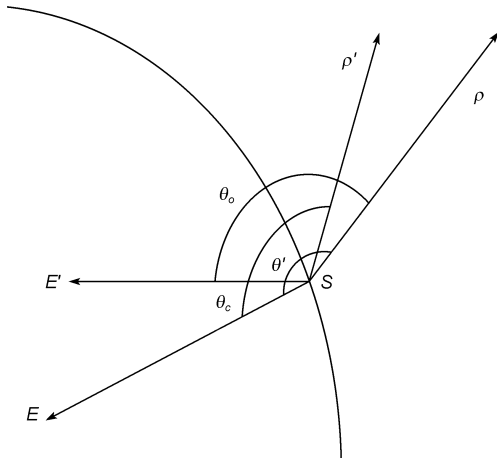


图 3 星敏感器观测示意图

其中 θ' 又可以表示为

$$\theta' = \varphi + \delta\varphi,$$

φ 为星敏感器光轴指向相对卫星本体坐标系的初装角(星敏感器光轴指向与星体坐标系 z 轴的夹角), $\delta\varphi$ 是由卫星姿态变化引起的随时间变化的量, 将其代入(17)式得

$$\cos \theta_o = \cos \theta_c + \sin(\varphi + \delta\varphi)(\delta\alpha + \delta\beta). \quad (18)$$

由上式可以看出, φ 能够抑制红外地平仪和星敏感器测量误差对定轨精度的影响, 当 φ 接近 180° 时, $\sin(\varphi + \delta\varphi)$ 接近最小, 星敏感器测量误差 $\delta\alpha$ 和红外地平仪测量误差 $\delta\beta$ 对自主定轨精度的影响会接近最弱。因此, 星敏感器光轴指向在卫星本体中初装角 φ 的配置的不同将会对星座自主定轨精度产生较大影响。

此外, 星敏感器光轴在卫星上摆放的状态将直接影响所观测到的背景恒星资料情况, 例如, 当星敏感器光轴指向垂直轨道面的方向时, 由于短时间内受摄动影响卫星轨道面变化不大, 其对准的天区在各个时刻基本上相同, 利用得到的观测资料难以完成定轨计算; 而当星敏感器光轴搁置在卫星轨道面内时, 在卫星一个轨道周期内的不同时刻星敏感器总会观测到不同背景恒星资料, 利用这样的观测资料对星座进行定轨, 定轨精度也就较高。

本文分别采用分离式自主定轨方法和联合自主定轨方法就星敏感器光轴指向设置在卫星轨道面内和垂直轨道面内两种情况的星座自主定轨进行了仿真计算, 得到了星敏感器光轴指向和星座几何中心确定精度的关系(见图 4~7), 充分验证了以上分析结论。

当星敏感器光轴指向在轨道面内变化时, 在一个周期内星敏感器观测到的背景恒星基本相同, 从得到的仿真观测资料情况看, 当 $90^\circ \leq \varphi \leq 180^\circ$ 时, 观测资料数量几乎相同, 但定轨结果却存在较大差异, 如图 4 和 5 中所示, 当 φ 接近 180° 的时候, 定轨精度也接近最优, 而当 φ 接近 90° 的情况下定轨精度要降低很多。结果表明, 在星敏感器光轴放置在轨道面内时, 定轨精度明显地受到了初装角 φ 设置的影响, 当 φ 在 180° 附近时定轨精度接近最优。

当星敏感器光轴指向设置在垂直轨道面内时, 星敏感器观测到的背景恒星会随着 φ 变化而变化, 得到的观测资料也会差异很大, 导致定轨精度也随着 φ 的不同而不同。如图 6, 7 所示, 在图的前半部分, 定轨的精度起伏比较大, 表明自主定轨主要受到星敏感器观测资料的影响; 而当 φ 接近 180° 时, 不仅观

测到的背景恒星资料有助于定轨精度的改善, 而且初装角 φ 的设置也有效地抑制了测量误差对定轨精度的影响, 使得定轨精度逐步提高.

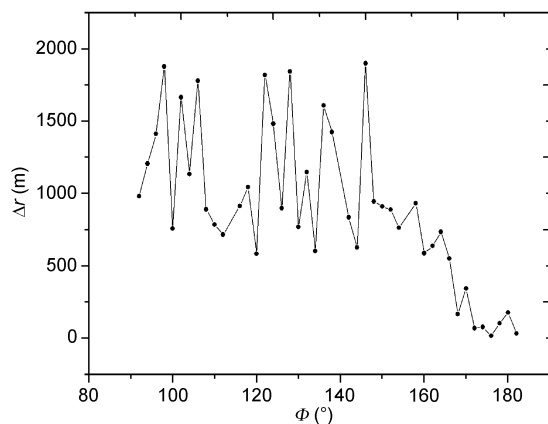


图 4 星敏感器光轴指向在轨道面内变化时利用分离式定轨的精度情况

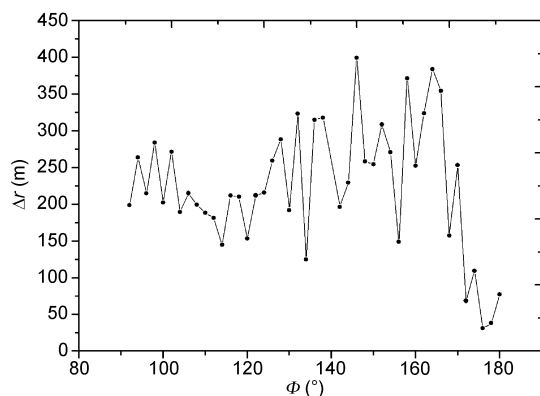


图 5 星敏感器光轴指向在轨道面内变化时联合定轨的精度情况

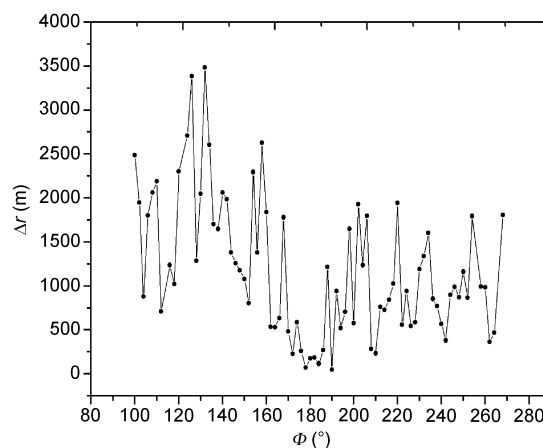


图 6 星敏感器光轴指向在垂直轨道面内变化时分离式定轨的精度情况

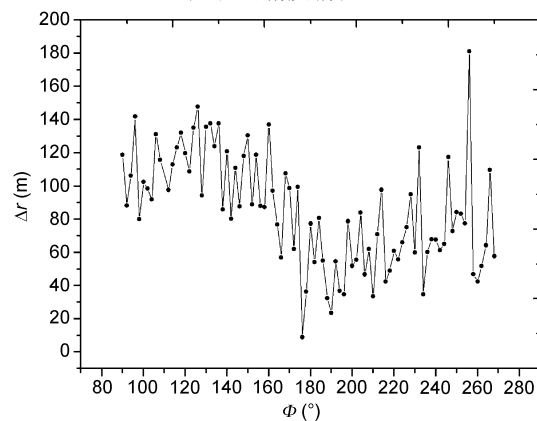


图 7 星敏感器光轴指向在垂直轨道面内变化时联合定轨的精度情况

5 结论

通过对三星星座利用星敏感器和星间链路自主定轨进行的仿真计算和分析, 得到以下几个主要结论:

本文提出的星座自主定轨方法是可行的. 自主定轨精度主要受到红外地平仪测量误差尤其是其测量系统差的影响, 由仿真计算结果进行的保守估计表明: 这种方法用于编队星座的自主定轨, 分离式自主定轨方法能够实现优于 800 m 的定轨精度, 联合定轨方法能够实现优于 400 m 的定轨精度.

在星座联合自主定轨中, 由于利用了星间测距资料, 使自主定轨精度有了较大提高(比较分离式和

联合式两种方法的定轨结果), 表明星间测距资料能够有效制约红外地平仪和星敏感器测量误差对自主定轨精度的影响. 随着星间链路的增加, 自主定轨精度可以逐步得到提高.

编队星座的整体定轨精度主要受红外地平仪和星敏感器测量误差的影响, 而构型确定精度则主要取决于星间链路的测量误差. 本文提出的自主定轨方法不仅能够整体上较好地确定星座的轨道, 而且能够提供非常精确的星座构型信息, 这一点对于确保星座的高水平应用尤其重要.

星座自主定轨精度与星敏感器的光轴指向相对于星体坐标的配置有着密切联系. 星敏感器光轴在星体坐标系中指向的不同将决定卫星轨道运动时星敏感器视场扫过的背景恒星的不同, 从而影响星座定轨精度; 另一方面, 基于测轨方程的特征, 在星体坐标系中合理选取星敏感器光轴指向将会有效抑制红外地平仪测量误差(包括随机差和系统差)对定轨精度的影响, 研究表明, 当星敏感器光轴指向与星体坐标系的 z 轴(接近于卫星运动时地心方向)夹角接近 180° 时可以达到较为理想的定轨精度.

参考文献

- 1 Parkinson B W, Spilker J. Global Positioning System: Theory and Applications, Vol.2. Washington, DC: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1996
- 2 Grewal M S, Weill L R, Andrews A P. Global positioning system inertial navigation and integration. New York: John Wiley & Sons, Inc Publication, 2001
- 3 Gramling C J, Long A C. Autonomous navigation using the TDRSS Onboard Navigation System (TONS). Adv Space Res, 1995, 16: 77—80
- 4 Shorsh G, Itzhack Y. Satellite autonomous navigation based on magnetic field measurement. J Guid Control Dyn, 1995, 18(4): 843—850
- 5 Psiaki M L. Autonomous LEO orbit determination from magnetometer and sun sensor data. AIAA-98-4308
- 6 章仁为. 卫星轨道姿态动力学与控制. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1998
- 7 Sheikh S I, Pines D J, Wood K S, et al. The use of X-ray pulsar for spacecraft navigation. In: Proceedings of the 14th AAS/AIAA Space Flight Mechanics Conference. AAS 04-109, Maui, 2004. 105—119
- 8 Sala J, Urruela A, Villares X, et al. Feasibility Study for a Spacecraft Navigation System relying on Pulsar Timing Information (Final Report). ESA, 2004
- 9 杨博, 房建成, 伍小杰, 等. 一种航天器天文自主定轨方法. 中国惯性性质学报, 2000, 8(3): 33—37
- 10 杨博, 房建成, 伍小杰. 一种利用星敏感器的航天器自主定位方法. 中国空间科学技术, 2001, 2: 26—30
- 11 马剑波, 徐劲, 曹志斌. 一种利用星敏感器的卫星自主定轨方法. 中国科学 G 辑: 物理学 力学 天文学, 2005, 35(2): 213—224
- 12 刘林. 航天器轨道理论. 北京: 国防工业出版社, 2000
- 13 Wolf R. Satellite Orbit and Ephemeris Determination using Inter Satellite Links. Dissertation for the Doctoral Degree. Neubiberg: University RAF Munich, 2000
- 14 Taplay B D, Schutz B E, Born G H. Statistical Orbit Determination. San Diego: Elsevier Academic Press Inc, 2004