

文章编号: 1001-2486 (2002) 01-0026-04

利用星间伪距观测进行编队星座相对状态测量*

王威, 郝晓宁, 韩龙

(国防科技大学机电工程与自动化学院, 湖南长沙 410073)

摘要: 以三星编队星座为例, 讨论利用高精度的星间伪距观测进行星间相对位置、姿态和时间参数确定的一些问题, 包括: 坐标系、独立参数的选取和观测方程的建立, 星座状态的转换, 天线的安装和指向等, 并针对一个对地观测的星座进行了仿真和分析。

关键词: 编队星座; 伪距; 星间状态测量

中图分类号: V47 文献标识码: A

Relative States Determination for Formation Satellite Constellation by Using Pseudo-ranging Between Satellites

WANG Wei, XI Xiao-ning, HAN Long

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

Abstract: In the case of the formation flying constellation, this paper discusses some problems about the determination of relative states, which includes the relative position, attitude and time between the formation flying satellites, by using precise pseudo-ranging. The problems are the selection of coordinate system and independent state parameters, the setting of observation equations, conversion of constellation's states, orientation and installing of antenna. Numerical simulation and analysis are made for an earth-observation constellation.

Key words: formation satellite constellation; pseudo-ranging; state determination of inter-satellite

为了满足许多空间任务(如对地观测、深空探测等)对卫星规模越来越大的要求,人们考虑使用编队星座。编队星座功能的实现,依赖于星座的位置、姿态和时间(简称为状态)的确定精度,特别是星间相对的位置、姿态和时间同步的确定精度。

全球定位系统(GPS)可用于编队星座的状态测量,但其测量精度和可靠性与编队星座可观测到的GPS卫星数目和几何分布密切相关。对于中、低轨道的编队星座一般不存在GPS卫星数目和几何分布问题,但对于高轨道甚至深空探测的编队星座,GPS则不能有效可靠地用于编队星座的状态测量。为进行状态测量需增加另外的测量手段,方法之一是采用一种类似GPS的载波相位和伪码技术。该技术是在每个卫星上安装一个发射天线和至少三个接收天线。与GPS相同,各卫星发射经过伪码调制的载波信号,并被其他卫星上的接收天线接收;与GPS不同的是,它们使用的载波波长和伪码元更短,以获得高精度的距离测量信息。文献[1]在载波波长为1cm和伪码元为3m的情况下,考虑伪码测量系统噪声误差、多路径效应等的影响,对星间伪距测量的误差进行了分析,估计伪距测量误差为1cm,载波相位测量误差为10⁻⁴m。

1 数学模型

1.1 相关坐标系

本文涉及4个直角坐标系:地心惯性坐标系、当地水平坐标系、星体坐标系和星座坐标系(文中分别用I、L、B和C表示)。其中,前3个坐标系是表示卫星位置和姿态常用的坐标系。为了方便地描述和解算星间相对的位置和姿态,建立星座坐标系。

* 收稿日期: 2001-09-10

基金项目: 863 青年基金资助项目(863-2.00.2); 国家自然科学基金资助项目(10072076)

作者简介: 王威(1963-), 男, 高级工程师, 博士生。

设编队星座由三颗卫星组成 (简称 S_1 、 S_2 和 S_3), 星座坐标系的定义如图 1 所示, 坐标原点为 S_1 质心, x 轴沿 S_1 到 S_2 方向 (质心连线), y 轴在 S_2 和 S_3 构成的平面内, 且指向 S_3 的一侧, z 轴由右手定则确定。

1.2 星间相对状态参数

对于利用星间伪距测量的情况, 三星编队星座每个观测时刻共有 14 个星间相对状态参数, 分为相对位置、相对姿态和相对钟差。

(1) 相对位置。根据星座坐标系的定义, 星间的相对位置可以用 3 个独立参数描述, 如取参数为坐标的形式, 可取为 x_2 、 x_3 和 y_3 。图 1 中所示的星间矢量 R_1 、 R_3 和 R_2 分别

$$R_1 = [x_2 \ 0 \ 0]^T, R_2 = [x_3 - x_2 \ y_3 \ 0]^T, R_3 = [x_3 \ y_3 \ 0]^T \quad (1)$$

(2) 相对姿态。编队星座中各卫星相对星座坐标系有三个姿态角, 3 颗卫星有 9 个描述姿态的参数, 具体为 θ_1 、 ϕ_1 、 ψ_1 、 θ_2 、 ϕ_2 、 ψ_2 、 θ_3 、 ϕ_3 、 ψ_3 , 它们的取值为由星座坐标系转到星体坐标系的转角。卫星的星座坐标系到星体坐标系的旋转矩阵为

$$M_i^{CB} = R_x(\theta_i) R_y(\phi_i) R_z(\psi_i) \quad (2)$$

(3) 相对钟差。设同一卫星上的发射和接收天线具有相同钟差 (通过精心的设计和校准, 这一假设是完全可能的), 则 3 个卫星有 3 个钟差 Δt_1 、 Δt_2 、 Δt_3 。三个卫星间存在三个星间钟差 $\Delta t_{12} = \Delta t_2 - \Delta t_1$ 、 $\Delta t_{13} = \Delta t_3 - \Delta t_1$ 、 $\Delta t_{23} = \Delta t_3 - \Delta t_2$, 但只有 2 个是独立的。因此在测量模型中加入 2 个星间钟差, 一般取为等效的距离偏差 $b_{12} = C\Delta t_{12}$ 和 $b_{13} = C\Delta t_{13}$ (C 为光速)。

1.3 观测方程

编队星座中每颗卫星上的三个接收天线分别接收另外二颗卫星发射的伪距信号, 星座一共可获得 18 个伪距观测值 ρ_{ij}^k (i 为接收信号卫星、 j 为卫星 i 的接收信号天线、 k 为发射信号卫星, 且 i 、 j 、 $k = 1, 2, 3$, $i \neq k$)。由每个观测时刻的 18 个伪距观测值, 可对 14 个状态参数进行估计。观测方程为:

$$\text{对 } S_1 \text{ 卫星: } \rho_{1j}^2 = |R_1 + M_2^{BC} r_{20}^B - M_1^{BC} r_{1j}^B| + b_{12}, \quad \rho_{1j}^3 = |R_3 + M_3^{BC} r_{30}^B - M_1^{BC} r_{1j}^B| + b_{13} \quad (3a)$$

$$\text{对 } S_2 \text{ 卫星: } \rho_{2j}^1 = |-R_1 + M_1^{BC} r_{10}^B - M_2^{BC} r_{2j}^B| - b_{12}, \quad \rho_{2j}^3 = |R_2 + M_3^{BC} r_{30}^B - M_2^{BC} r_{2j}^B| + b_{13} - b_{12} \quad (3b)$$

$$\text{对 } S_3 \text{ 卫星: } \rho_{3j}^1 = |-R_3 + M_1^{BC} r_{10}^B - M_3^{BC} r_{3j}^B| - b_{13}, \quad \rho_{3j}^2 = |-R_2 + M_2^{BC} r_{20}^B - M_3^{BC} r_{3j}^B| + b_{12} - b_{13} \quad (3c)$$

其中, r_{ij}^B 为第 i 颗卫星的第 j 个接收天线在星体坐标系位置矢量; r_{i0}^B 为第 i 颗卫星的发射天线在星体坐标系位置矢量; M_i^{BC} 为第 i 颗卫星的星体坐标系到星座坐标系的旋转矩阵, 则

$$M_i^{BC} = (M_i^{CB})^{-1} = R_z(-\psi_i) R_y(-\phi_i) R_x(-\theta_i) \quad (4)$$

1.4 姿态角转换

为了对卫星姿态进行控制, 需要将解算得到的各卫星相对星座的姿态角转换为相对当地水平坐标系的姿态角。

设 X_i 、 Y_i 和 Z_i 为卫星质心在地心惯性坐标系的坐标。则地心惯性坐标系至星座坐标系的旋转矩阵为

$$M^{IC} = \begin{bmatrix} m'_{11} & m'_{12} & m'_{13} \\ m'_{21} & m'_{22} & m'_{23} \\ m'_{31} & m'_{32} & m'_{33} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} m'_{11} \\ m'_{12} \\ m'_{13} \end{bmatrix} = \frac{R_{12}}{|R_{12}|}, \quad \begin{bmatrix} m'_{31} \\ m'_{32} \\ m'_{33} \end{bmatrix} = \frac{R_{12} \times R_{13}}{|R_{12} \times R_{13}|}, \quad \begin{bmatrix} m'_{21} \\ m'_{22} \\ m'_{23} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m'_{31} \\ m'_{32} \\ m'_{33} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} m'_{11} \\ m'_{12} \\ m'_{13} \end{bmatrix}, \quad R_{12} = \begin{bmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix},$$

$$R_{13} = \begin{bmatrix} X_3 \\ Y_3 \\ Z_3 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix}$$

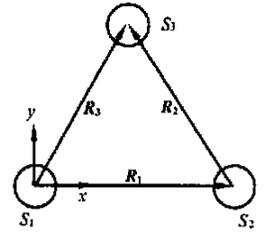


图 1 星座坐标系
Fig. 1 Coordinate system for constellation

当地水平坐标系至地心惯性坐标系的旋转矩阵

$$\mathbf{M}_i^I = \mathbf{R}_z(-\alpha_i) \mathbf{R}_y(90^\circ + \delta_i) \quad (6)$$

其中, $\alpha_i = \arctan(Y_i/X_i)$ 为卫星 i 的赤经、 $\delta_i = \arctan\left\{Z_i / \sqrt{X_i^2 + Y_i^2 + Z_i^2}\right\}$ 为卫星 i 的赤纬。

通过以上旋转矩阵, 可得到当地水平坐标系到星体坐标系的转换矩阵, 为

$$\mathbf{M}_i^{LB} = \mathbf{M}_i^{CB} \mathbf{M}_i^{IC} \mathbf{M}_i^I \quad (7)$$

另外, 卫星的当地水平坐标系到星体坐标系的旋转矩阵还可表示为

$$\mathbf{M}_i^{LB} = \mathbf{R}_x(\theta'_i) \mathbf{R}_y(\phi'_i) \mathbf{R}_z(\psi'_i) \quad (8)$$

其中 θ'_i 、 ϕ'_i 、 ψ'_i 为卫星相对当地水平坐标系的姿态角, 它们的取值为由当地水平坐标系转到星体坐标系的转角。

$$\mathbf{M}_i^{LB} = \begin{bmatrix} \cos\phi'_i \cos\psi'_i & \cos\phi'_i \sin\psi'_i & -\sin\phi'_i \\ \sin\theta'_i \sin\phi'_i \cos\psi'_i - \cos\theta'_i \sin\phi'_i & \sin\theta'_i \sin\phi'_i \sin\psi'_i + \cos\theta'_i \cos\phi'_i & \sin\theta'_i \cos\phi'_i \\ \cos\theta'_i \sin\phi'_i \cos\psi'_i + \sin\theta'_i \sin\phi'_i & \cos\theta'_i \sin\phi'_i \sin\psi'_i - \sin\theta'_i \cos\phi'_i & \cos\theta'_i \cos\phi'_i \end{bmatrix}$$

$$\triangleq \begin{bmatrix} m'_{11} & m'_{12} & m'_{13} \\ m'_{21} & m'_{22} & m'_{23} \\ m'_{31} & m'_{32} & m'_{33} \end{bmatrix} = \mathbf{M}_i^{CB} \mathbf{M}_i^{IC} \mathbf{M}_i^I \quad (9)$$

则 $\theta'_i = \arctan\left(\frac{m'_{23}}{m'_{33}}\right)$ 、 $\phi'_i = -\arcsin(m'_{13})$ 、 $\psi'_i = \arctan\left(\frac{m'_{12}}{m'_{11}}\right)$ 。

2 仿真与分析

为了对测量值进行模拟, 首先给出编队星座各卫星的轨道根数和星座坐标系中的姿态角“真值”以及天线在星体坐标系中的位置; 再利用它们计算出发射—接收天线之间的真距离; 最后加入钟差、测量误差得到模拟的伪距测量值。在仿真分析中, 取伪距测量的误差为 1cm。

取一对地观测的空间圆形三星编队飞行星座, 编队飞行轨迹与水平面夹角为 30° , 星间距离约 1000m, 各卫星轨道根数见表 1; 假设每个卫星发射天线和接收天线的安装方式相同, 它们在星体坐标系中的位置矢量为 $\mathbf{r}_{10}^b = [0.5 \ 0.5 \ -0.5]^T$ 、 $\mathbf{r}_{11}^b = [0.5 \ 0.5 \ 0.5]^T$ 、 $\mathbf{r}_{12}^b = [0.5 \ -0.5 \ 0.5]^T$ 、 $\mathbf{r}_{13}^b = [0.5 \ -0.5 \ -0.5]^T$; 根据文献 [1] 的研究, 为达到最佳测量效果, 每个卫星的天线安装面都应指向编队阵列的中心, 因此, 各卫星在相对星座坐标系的姿态角取为表 2 中真值。

表 1 编队星座各卫星的轨道根数

Tab 1 The orbit elements of constellation satellites

	a (m)	e	i ($^\circ$)	ω ($^\circ$)	Ω ($^\circ$)	M ($^\circ$)
S_1	7400000.022	0.0000390109	29.9961285125	90.000000	100.000000	-0.0000012073
S_2	7400000.073	0.0000390066	30.0019355738	-150.0050818942	99.9932947793	-119.9891112709
S_3	7400000.073	0.0000390066	30.0019355738	-29.9949181053	100.0067052206	119.9891112705

解算结果 (表 2) 表明, 在伪距测量误差为 1cm 时, 星座卫星相对位置误差为厘米级, 卫星姿态角误差量级为 10^{-2} 弧度。结果说明, 文中提出的数学模型、测量值的模拟方法及解算过程正确。

对各卫星一个轨道周期姿态角解算及转换结果表明, 如果在编队飞行过程中, 每个卫星的天线安装面都保持指向编队阵列的中心, 则各卫星天线面相对当地水平坐标系的姿态角变化范围为: 滚动 (θ'_i) 和俯仰 (ϕ'_i) 在 $(-30^\circ, 30^\circ)$ 变化、偏航 (ψ'_i) 在 $(0^\circ, 360^\circ)$ 之间变化, 各卫星天线面相对当地水平坐标系姿态角变化如图 2, 这是因为编队飞行轨迹是一个与水平面夹角为 30° 平面圆。

表 2 仿真结果

Tab 2 The simulation result

	真值	估值	真误差	均方差
θ_1 (rad)	. 0000	- . 0110	- 0. 011	0. 0153
ϕ_1 (rad)	. 0000	- . 0033	- 0. 0033	0. 0115
ψ_1 (rad)	. 5236	. 5299	0. 0063	0. 0115
θ_2 (rad)	. 0000	. 0130	0. 013	0. 0153
ϕ_2 (rad)	. 0000	. 0154	0. 015	0. 0115
ψ_2 (rad)	2. 6180	2. 6294	0. 0114	0. 0115
θ_3 (rad)	. 0000	- . 0193	- 0. 0193	0. 0153
ϕ_3 (rad)	. 0000	. 0074	0. 0074	0. 0115
ψ_3 (rad)	4. 7124	4. 7189	0. 0065	0. 0115
x_2 (m)	999. 9220	999. 9191	- 0. 0029	0. 0074
x_3 (m)	500. 0390	500. 0465	0. 0075	0. 0112
y_3 (m)	866. 0929	866. 0842	- 0. 0087	0. 0064
b_{12} (m)	. 0000	- . 0092	- 0. 0092	0. 0091
b_{13} (m)	. 0000	. 0011	0. 0011	0. 0091

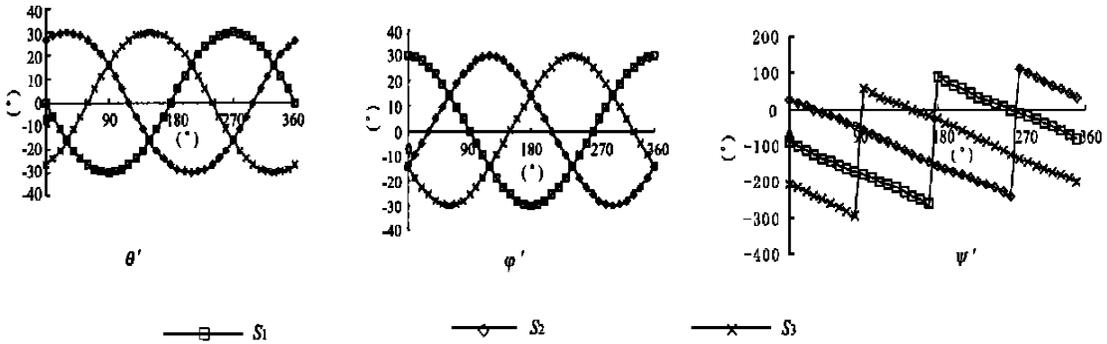


图 2 各卫星姿态角相对当地水平坐标系变化

Fig. 2 Variations of satellite attitude in local coordinate system

3 结束语

本文主要针对 3 星编队星座进行了讨论, 但其处理问题的方法具有普遍的意义, 可以扩充到具有更多卫星的星座中, 相应的观测值和状态参数也要增加。设 n 为编队星座中的卫星个数, 则观测值的个数为 $3n \times (n-1)$ 、状态参数的个数为 $7(n-1)$ 。

增加高精度的载波观测值, 将有利于提高确定状态参数的精度。利用伪距观测值计算得到的结果, 可以为载波观测值的解算提供很好的起算数据。

关于天线的设计、安装与指向, 文献 [1] 是针对深空探测进行研究的。对于对地观测的编队飞行星座而言, 在既能满足星间测量、又不影响对地观测的卫星姿态要求下, 如何进行天线的设计、安装和指向控制是正在研究的问题。

参考文献:

- [1] Purcell G, Kuang D, Lichten S, Wu S, Young L. Autonomous Formation Flyer Sensor Technology Development [C]. Paper AAS 98-062, 21st Annual AAS Guidance and Control Conference, Breckenridge, CO, Feb. 1998
- [2] Parkinson B W, Spilker J J Jr, eds. Global Positioning System: Theory and Applications. Progress in Astronautics and Aeronautics [M]. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 1996.
- [3] 许其凤. GPS 卫星导航与精密定位 [M]. 北京: 解放军出版社, 1989.
- [4] 肖业伦, 张晓敏. 编队飞行卫星群的轨道动力学特性与构形设计 [J]. 宇航学报, 2001, 22 (4): 7-12.