

分布式卫星编队飞行队形保持协同控制

张世杰, 段广仁

(哈尔滨工业大学控制理论与制导技术研究中心, 哈尔滨 150001)

摘 要: 针对分布式卫星编队飞行队形保持控制问题提出一种分布式协同控制算法,并给出该协同控制算法与编队卫星间信息传递拓扑结构之间的关系。该协同控制算法以模型预测控制为基础,利用分布式编队卫星的自然特性以及编队卫星之间的信息传递拓扑结构,采用分布式的算法结构,设计分布式的模型预测协同控制算法。该控制算法是一种在线滚动优化控制算法,同时能够较好地解决存在状态约束、控制输入约束等情形下的各种控制问题。最后通过数值仿真验证了结果的有效性。仿真结果表明,当编队卫星间信息传递拓扑结构中存在生成树时,提出的分布式协同控制算法能够有效地应用到编队卫星队形保持控制问题上来。

关键词: 分布式卫星; 队形保持; 协同控制; 分布式模型预测控制

中图分类号: V412.41 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1328(2011)10-2140-06

DOI: 10.3873/j.issn.1000-1328.2011.10.007

Cooperative Control for Distributed Satellite Formation Keeping

ZHANG Shi-jie, DUAN Guang-ren

(Center for Control Theory and Guidance Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: A distributed cooperative control algorithm is proposed in this paper for a class of distributed satellite formation keeping problem, and the relationship between the proposed algorithm and the topology structure of the information communication among formation flying satellites is presented. The proposed algorithm is based on model predictive control, and the nature and the topology structure of the distributed satellite formation, are used to design a distributed model predictive control algorithm in a distributed structure. The proposed algorithm is optimized over a finite time on line and can deal with the constrained control problem well. Numerical simulations have demonstrated the effectiveness of the approach proposed. Simulation results show that the proposed algorithm can be applied to the distributed satellite formation keeping control problem effectively.

Key words: Distributed satellite; Formation keeping; Cooperative control; Distributed model predictive control

0 引 言

近年来,小卫星技术得到迅速发展和应用,为空间领域提供了更广泛的应用范围^[1-4]。由多颗小卫星通过一定构型组成编队以取代原有的单颗复杂卫星来完成任务已是未来空间技术发展的一个趋势。与传统的单颗复杂大卫星相比较,由多颗小卫星通过编队组成的“虚拟卫星”可以在功能上取代甚至超越原来的单颗复杂大卫星,同时具有低成本、强适

应性、高可靠性等一系列的优势。

队形保持协同控制是编队飞行的一项重要的关键技术^[5]。目前针对编队队形保持控制的研究大部分集中在主从式的结构上,首先选定某颗星作为主星,其它星作为从星跟踪主星的参考轨道。这种控制方式可以称之为集中式的协同控制问题。优势在于控制器容易实现,但如果主星受到摄动等因素的影响偏离参考轨道的话,整个队形也会发生变化。其次,注意到如果编队中卫星数目较多时,会给整个

系统带来很大的计算负担。另一方面,虽然文献中采用的编队控制方法有很多,例如,非线性自适应控制、LQR 控制、神经网络控制以及滑模变结构控制等^[7-10],但是,这些研究中一般都假设用于设计控制器的状态可以完全得到,而很少有文献考虑实际编队飞行任务中测量系统的一些约束条件,假如编队中的卫星采用基于视觉的导航系统,由于视角的原因,编队中的卫星不可能得到其它所有卫星的相对信息,只能得到其周围卫星的相对信息。针对这些问题,本文提出分布式的协同控制方法,并将编队内星间信息传递拓扑和控制系统性能联系起来,在本文中,不提前选定某颗星为主星,而是假设在整个编队中的卫星地位是“平等”的,目的在于使得编队中的卫星通过星间信息拓扑能够自主地进行队形保持的协同控制。这种方式可以称之为基于行为的编队方式。

本文的组织结构如下所示,第一节给出编队卫星的动力学模型并用图论的方式描述星间的信息传递拓扑结构;第二节给出分布式编队队形保持协同控制器的设计方法;第三节给出相应的数值仿真,并给出相应的分析;最后总结全文。

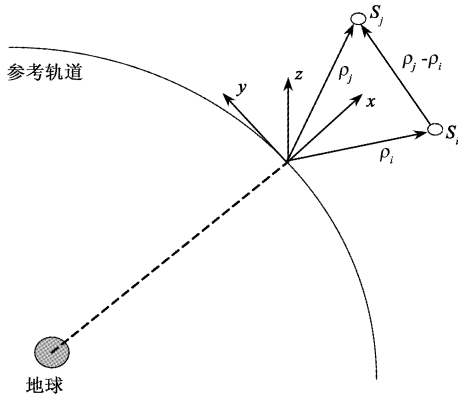


图 1 编队中任意两颗卫星相对运动示意图

Fig.1 The relative motion of two satellites in the formation

1 问题描述

1.1 动力学模型

在本文中,我们假设编队中有 N 颗卫星 $S_i, i = 1, \dots, N$, 围绕一个圆形参考轨道进行编队飞行的情形,假设该参考轨道的轨道角速度为 ω , 如图 1 所示,图中所示的是编队中的任意两颗卫星之间的相对运动关系。为了给出二者之间的相对运动方程,首

先建立相关的轨道坐标系,坐标原点在圆参考轨道上, x 轴沿径向背离地心方向, z 轴垂直轨道平面方向, y 轴由右手法则确定。编队中卫星在此坐标系下的位置矢量用 $\rho_i, i = 1, \dots, N$ 来表示。令 $\rho_i = (x_i \ y_i \ z_i)^T, \dot{\rho}_i = (\dot{x}_i \ \dot{y}_i \ \dot{z}_i)^T$, 给出卫星 S_i 在此轨道坐标系下的动力学方程:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \rho_i \\ \dot{\rho}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{I}_3 \\ \mathbf{A}_p & \mathbf{A}_{\dot{p}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \rho_i \\ \dot{\rho}_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{I}_3 \end{bmatrix} \left(-\frac{\mu(\rho_i + \mathbf{R})}{\|\rho_i + \mathbf{R}\|^3} + \frac{\mu}{a^2} \mathbf{x} + \mathbf{u}_i \right) \quad (1)$$

式中:

$$\mathbf{A}_p = \begin{bmatrix} \omega^2 & 0 & 0 \\ 0 & \omega^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{A}_{\dot{p}} = \begin{bmatrix} 0 & 2\omega & 0 \\ -2\omega & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$\mathbf{R} \triangleq [a \ 0 \ 0]^T$, a 为圆参考轨道的半径, μ 为万有引力常数, $\mathbf{u}_i \in \mathbf{R}^3$ 为施加在卫星 S_i 上的控制力。

记 $\Delta \rho_i = \rho_j - \rho_i$ 表示卫星 S_i 和 S_j 之间的相对位置矢量,通过(1)式线性化处理,可以得到编队中两颗卫星的相对动力学方程:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Delta \rho_i \\ \Delta \dot{\rho}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{I}_3 \\ \mathbf{A}_{p_l} & \mathbf{A}_{\dot{p}_l} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \rho_i \\ \Delta \dot{\rho}_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{I}_3 \end{bmatrix} \Delta \mathbf{u}_i \quad (2)$$

式中:

$$\mathbf{A}_{p_l} = \begin{bmatrix} 3\omega^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\omega^2 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{A}_{\dot{p}_l} = \begin{bmatrix} 0 & 2\omega & 0 \\ -2\omega & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$\Delta \mathbf{u}_i \in \mathbf{R}^3$ 为相应的控制输入。注意到(2)式就是 C-W 方程。为了以后讨论方便,记 $\mathbf{U} = (u_x \ u_y \ u_z)^T, \mathbf{X} = (\Delta \rho_i \ \Delta \dot{\rho}_i)^T = (\Delta x \ \Delta y \ \Delta z \ \Delta \dot{x} \ \Delta \dot{y} \ \Delta \dot{z})^T$ 。我们将(2)式写成如下形式:

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}\mathbf{U} \quad (3)$$

式中:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 3\omega^2 & 0 & 0 & 0 & 2\omega & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -2\omega & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\omega^2 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

1.2 星间信息传递拓扑结构

我们用有向图来描述编队中由星间测量或者通

信关系构成的传递拓扑结构。

记 $G = (V, E)$ 来表示图,其中, $V \neq \emptyset$ 称为图 G 的顶点集,其元素称为顶点; E 称为边集,其元素称为边。如果图中 (v_i, v_j) 是有序的,则称此图为有向图,否则称之为无向图。在编队中,可以把每颗卫星看做图中的顶点,星间的信息传递拓扑构成有向图的边。

在有向图 G 中, $\forall u, v \in V$, 如果从顶点 u 到 v 之间存在通路,则称 u 可达 v ,若同时 v 可达 u ,则称 u 和 v 相互可达。如果 G 中任何两个顶点都是相互可达的,则称 G 是强连通的。称没有回路的连通图为树,用 T 来表述树。若 T 是 G 的生成子图并且为树,则称 T 是 G 的生成树。注意到生成树的连通性要比强连通弱,即一个图如果是强连通的则图中必然包含一个生成树,反之则未必。

如果 G 中的两个顶点 $(v_i, v_j) \in E$,那么称 v_i 和 v_j 是相邻的,与 v_i 相邻的所有顶点的集合记为 N_i 。

我们可以这样理解有向图的物理意义,把编队中的每一颗卫星可以看做有向图中的每一个顶点,假设编队卫星通过无线网络传递它们之间的相对位置或者姿态信息,若在每颗星上面都装载有收发机构,那么这时整个编队卫星之间的信息传递拓扑图就构成一个强连通的有向图。如果只在某颗星上面装载有信息发射机构,而其它星体上面只装载有接收机构,那么这时整个编队卫星之间的信息传递拓扑图就构成一个简单的生成树。

在本文中,我们将解决下述的控制问题:在动力学模型(3)描述的相对运动方程下,假设编队飞行中的卫星之间测量系统只能得到相邻卫星的信息,那么在什么样的信息传递拓扑构形下,设计出的分布式协同控制器才能够使得卫星保持一定的队形。

2 主要结果

首先假设星上装载的传感器不存在测量误差以及信息传递时滞。在基于模型预测控制的基础上,本文给出分布式模型预测控制算法。和传统的模型预测控制不同,分布式模型预测控制将一个大问题分解成若干个子问题来求解,可以大大减轻计算负担。

在本文中,假设优化时域为 P ,记 $\mathbf{x}_i(t)$ 表示 t 时刻第 i 颗卫星的实际状态, $\mathbf{x}_{t_k}^{i,i}(t)$ 表示在 t_k 时刻

预测出的 t 时刻第 i 颗卫星的状态,同时假设 $k = 0$ 时, $t_k = 0$ 。记

$$\mathbf{x}^i(t_k: t_k + P) = \{\mathbf{x}_{t_k}^{i,i}(t) \mid t \in [t_k, t_k + P]\}$$

表示在一个控制时域内从 t_k 时刻预测出的 t 时刻第 i 颗卫星的状态集合。类似地,我们用 $\mathbf{u}^i(t_k: t_k + P)$ 来表示相应的控制序列

$$\mathbf{u}^i(t_k: t_k + P) = \{\mathbf{u}_{t_k}^{i,i}(t) \mid t \in [t_k, t_k + P]\}$$

同时,用 $\tilde{\mathbf{x}}^i(t_k: t_k + P)$, $\tilde{\mathbf{u}}^i(t_k: t_k + P)$ 表示和第 i 颗卫星相邻的其它卫星的状态和控制序列如下所示:

$$\tilde{\mathbf{x}}^i(t_k: t_k + P) = [\dots, \mathbf{x}^j(t_k: t_k + P), \dots]^T;$$

$$\tilde{\mathbf{u}}^i(t_k: t_k + P) = [\dots, \mathbf{u}^j(t_k: t_k + P), \dots]^T$$

记 $\mathbf{X}^i(t_k) = \{\mathbf{x}^i(t_k), \tilde{\mathbf{x}}^i(t_{k-1}: t_{k-1} + P)\}$ 来表示第 i 颗卫星及其相邻卫星的状态集。我们将在下面的预测控制算法设计中用到这一集合。

对于编队飞行问题,在 t_k 时刻编队中的第 i 颗卫星的优化性能指标为:

$$\begin{aligned} & J^i[\mathbf{X}^i(t_k)] \\ &= \int_{t_k}^{t_k+P} [\|\mathbf{x}_{t_k}^{i,i}(t) - \mathbf{x}^{P,i}\|_2^2 + \|\mathbf{u}_{t_k}^{i,i}(t)\|_2^2] dt + \|\mathbf{x}_{t_k}^{i,i}(t_k + P) - \mathbf{x}^{P,i}\|_2^2 + \\ & \sum_{j \in N_i} \int_{t_k}^{t_k+P} [\|\mathbf{x}_{t_k}^{i,i}(t) - \mathbf{x}_{t_k}^{j,j}(t) - \mathbf{r}^{i,j}\|_2^2] dt \quad (4) \end{aligned}$$

式中: $\|\mathbf{x}\|_2^2 = \mathbf{x}^T \mathbf{x}$, $\mathbf{x}^{P,i}$ 表示第 i 颗卫星在终端时刻的状态约束, $\mathbf{r}^{i,j}$ 表示第 i 颗卫星和第 j 颗卫星之间期望的相对位置。

下面给出基于分布式模型预测控制的具体算法,首先定义优化问题 $P^i(t_k)$:

$$\min_{\{\mathbf{u}^i(t_k: t_k+P), \mathbf{x}^i(t_k: t_k+P)\}} J^i[\mathbf{X}^i(t_k)] \quad (5)$$

并满足以下约束条件:

$$\dot{\mathbf{x}}_{t_k}^{i,i}(t) = \mathbf{A} \mathbf{x}_{t_k}^{i,i}(t) + \mathbf{B} \mathbf{u}_{t_k}^{i,i}(t),$$

$$\forall t \in (t_k, t_k + P) \quad (6a)$$

$$\mathbf{x}_{t_k}^{i,i}(t_k) = \mathbf{x}_i(t_k) \quad (6b)$$

$$\mathbf{u}_{t_k}^{i,i}(t) \in U^i \quad (6c)$$

$$\mathbf{x}_{t_k}^{i,i}(t_k + P) \in \mathbf{X}_f^i \quad (6d)$$

式中: $i = 1, \dots, N$, U^i 和 \mathbf{X}_f^i 分别表示第 i 颗卫星的控制输入和终端状态条件约束。

下面给出问题 $P^i(t_k)$ 的求解算法:

算法 1. (分布式模型预测控制算法):

1) 令 $k = 0$, 同时测量出当前第 i 颗卫星的状态 $\mathbf{x}_i(t_k)$ 作为初始条件, 进入第 3 步;

2) 相邻卫星 N_i 接受来自第 i 颗卫星的预测状态 $\mathbf{x}^i(t_{k-1} : t_{k-1} + P)$, 同时测量得到当前时刻的第 i 颗卫星的状态 $\mathbf{x}_i(t_k)$, 更新 $\mathbf{X}^i(t_k)$;

3) 求解优化问题 $P^i(t_k)$, 得到相应的控制 and 状态集合 $\mathbf{u}^i(t_k : t_k + P)$ 和 $\mathbf{x}^i(t_k : t_k + P)$;

4) 将第 i 颗卫星的预测状态 $\mathbf{x}^i(t_k : t_k + P)$ 发送给其相邻的卫星 N_i ;

5) 应用优化控制输入序列的第一项元素作为控制输入

$$\mathbf{u}^i(t) = \mathbf{u}_{t_k}^{i,i}(t), \quad t \in [t_k, t_k + 1];$$

6) 令 $k = k + 1$, 返回到第 2 步。

在给出本文结果之前先给出相关的结果。

引理 1. ^[11] 假设 $U_{\text{opt}}^i(t_k)$ 是问题 $P^i(t_k)$ 的一组最优解, 另外, 如果 G 中的任何一个顶点 j 和定点 i 之间不存在约束关系, 那么 $U_{\text{opt}}^i(t_k)$ 仍然是 G 中定点集 $\{N_i, j\}$ 的一组最优解。

接下来给出本文的主要结果, 描述了分布式模型预测控制算法和星间信息传递的拓扑结构之间的关系。

定理 1. 用 G 来描述分布式卫星之间信息传递的拓扑结构, 如果在任何时刻 G 中至少包含一个生成树, 那么在算法 1 作用下得到的控制器能够使系统(3) 表示的分布式卫星保持一定的队形, 同时能够满足相应的约束条件。

证. 首先给出分布式卫星之间信息传递拓扑结构对算法 1 之间的关系, 即证明在任何时刻 G 中需至少包含一个生成树。用反证法来证明, 假设在某一时刻 G 中不存在一个生成树, 那么在 G 中则至少存在一个定点没有邻集, 假设为定点 i , 则 $N_i = \emptyset$, 由引理 1 可知, 若问题 $P^i(t_k)$ 有一组最优解 $U_{\text{opt}}^i(t_k)$, 那么这组最优解则是问题 $P^j(t_k), j \neq i$ 的最优解, 但是, 定点 i 和定点 j 是相互独立的, 若这两组最优解相同, 则根据 i 和 j 的一般性可知定点 i 和定点 j 之间必存在通路, 这和两个顶点是相互独立的矛盾, 从而, 在任意时刻 G 中需要至少包含一个生成树。

3 数值实例

为了检验本文协同控制方法的有效性, 以一个空间分布式编队飞行为背景进行分布式卫星协同控制的系统仿真。任务构型为典型的共面圆构型, 空间五颗星在半径为 1km 的圆上均匀分布构成圆形编队。在任务开始时, 五颗卫星均运行于圆参考轨道上, 未形成工作构型。

仿真中假设的参考轨道根数如表 1 所示。

表 1 参考轨道轨道根数

Table 1 The orbit element of the reference orbit

a/km	e	$i/(\text{°})$	$\Omega/(\text{°})$	$\omega/(\text{°})$	$f/(\text{°})$
7159.493	0.000	97.889	280.000	0.000	200.000

编队卫星的标称构型为空间圆形构型, 绕飞半径为 1km, 其初始时刻五颗星在参考轨道上运行, 每两颗星间间隔 50m。

空间五颗卫星之间的信息传递拓扑结构如图 2 所示, 从图中可以看出, 这个图中存在一个生成树。其实际的物理意义也可以从图中加以简单说明, 即通过一定的星间链路通信传递关系, 卫星 2、卫星 3、卫星 4 以及卫星 5 均分别可以得到卫星 1 的相关信息。

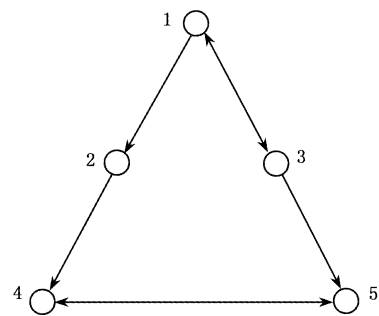


图 2 分布式卫星信息传递拓扑图包含生成树情形

Fig.2 The information exchange topology which contains a spanning tree

仿真过程将分为两部分进行, 首先验证在图 2 所示的星间信息传递图下控制算法 1 的有效性; 其次, 假设星间信息传递图中不存在生成树时算法 1 是否仍有效。

仿真中采样步长设为 60s, 预测步长设为 5, 图 3 和图 4 分别给出了分布式卫星 $x - y$ 平面相对运动轨迹和控制输入的仿真结果。

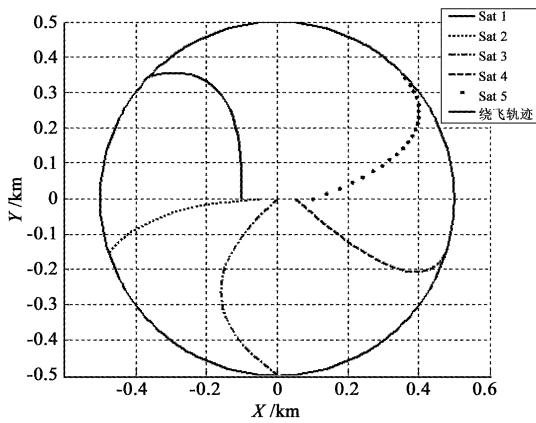


图 3 分布式卫星相对运动轨迹平面图
(星间信息传递结构包含生成树情形)

Fig. 3 The trajectories of the distributed satellites in the x - y plane (the case of the information exchange topology which contains a spanning tree)

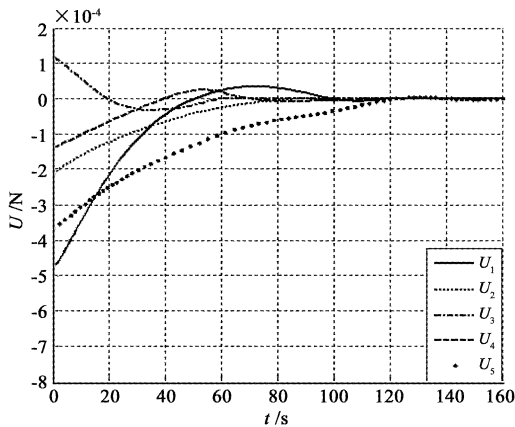


图 4 分布式模型预测控制下的控制量
(星间信息传递结构包含生成树情形)

Fig. 4 The behaviors of the control variables (the case of the information exchange topology which contains a spanning tree)

下面假设空间这五颗卫星之间的信息传递拓扑图不包含一个生成树,假设它们之间的信息传递拓扑结构如图 5 所示,这时卫星 3 不能得到其它任何卫星的信息。

在此情形下,仿真中的采样步长和预测步长均和前面仿真过程一样,图 6 给出了此情形下分布式卫星 $x - y$ 平面相对运动轨迹的仿真结果。

从仿真图可以看出,当卫星之间的信息传递拓扑图包含一个生成树时,由控制算法 1 作用下的卫星能够按照期望的轨迹运行,形成希望的空间圆形编队构型。如果卫星间的信息传递拓扑图中不存在

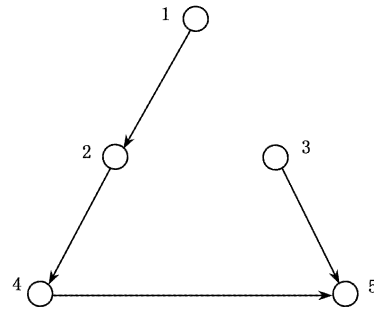


图 5 分布式卫星信息传递拓扑图不包含生成树情形

Fig. 5 The information exchange topology which does not contains a spanning tree

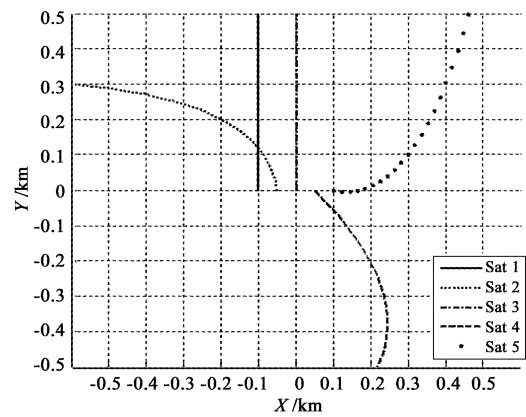


图 6 分布式卫星相对运动轨迹平面图
(星间信息传递结构不包含生成树情形)

Fig. 6 The trajectories of the distributed satellites in the $x - y$ plane (the case of the information exchange topology which does not contains a spanning tree)

一个生成树时,那么控制算法 1 作用下的系统无法实现期望的运行轨迹,卫星也不能够形成相应的空间圆形构型。仿真结果表明:卫星间的信息传递结构能够影响控制系统的效果,在设计实际空间任务时,对星间信息的传递结构如何设计须加以考虑。

4 结 论

针对分布式卫星编队飞行队形保持控制问题,本文给出了基于模型预测控制方法的协同控制方法,并且该方法能够很好地应用到分布式卫星队形控制中来,同时,本文考虑分布式卫星间的信息传递拓扑结构对控制系统的影响,指出在设计控制系统时,对星间信息传递拓扑结构的考虑不可忽略。仿真结果也表明本文结论的正确性和所提出的控制算法的有效性。但是针对星间信息传递存在干扰、时

滞,以及信息交流拓扑图时刻变化等问题,还值得深入研究。

参 考 文 献

- [1] Olfati S R, Murray R M. Consensus protocols for networks of dynamic agents [C]. The 29th American Control Conference, Denver, USA, June 4 - 6, 2003.
- [2] Moreau L. Leaderless coordination via bidirectional and unidirectional time dependent communication [C]. The IEEE Conference on Decision and Control, Maui, Hawaii, December 9 - 12, 2003.
- [3] 张振民, 林来兴. 小卫星编队飞行动力学以及应用 [J]. 航天控制, 2002, 20 (3): 44 - 50. [Zhang Zhen-min, Lin Lai-xing. Formation flying dynamics of small satellites and its application [J]. Aerospace Control, 2002, 20 (3): 44 - 50.]
- [4] Jadbabaie A, Lin J, Morse A S. Coordination of groups of mobile autonomous agents using nearest neighbor rules [J]. IEEE Transaction on Automatic Control, 2003, 48 (1): 988 - 1001.
- [5] 刘辉, 李俊峰. 卫星编队飞行的协同控制 [J]. 清华大学学报 (自然科学版), 2006, 46 (11): 1922 - 1925. [Liu Hui, Li Jun-feng. Coordinated control of spacecraft formation flying [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2006, 46 (11): 1922 - 1925.]
- [6] Melain T W, Beard R W. Coordination variables, coordination functions, and cooperative timing missions [C]. The 29th American Control Conference, Denver, USA, June 4 - 6, 2003.
- [7] Queiroz M S, Kapila V, Yan Q. Adaptive nonlinear control of multiple spacecraft formation flying [J]. Journal of Guidance, Control and Dynamics, 2000, 23 (3): 385 - 390.
- [8] Starin S, Yedavalli R K, Sparks A G. Spacecraft formation flying maneuvers using LQR with no radial axis inputs [C]. AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, Montreal, Canada, August 6 - 9, 2001.
- [9] Vadali S, Schaub H, Alfriend K T. Initial conditions and fuel-optimal control for formation flying of satellites [C]. AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, Portland, USA, August 9 - 12, 1999.
- [10] 吴宝林, 曹喜滨. 基于模型预测控制的卫星编队队形机动控制 [J]. 吉林大学学报 (工学版), 2007, 37 (1): 218 - 223. [Wu Bao-lin, Cao Xi-bin. Satellite formation maneuver control using model predictive control [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2007, 37 (1): 218 - 223.]
- [11] Trodden P, Richards A. Adaptive cooperation in robust distributed model predictive control [C]. IEEE International Symposium on Intelligent Control, Saint Petersburg, Russia, July 8 - 10, 2009.

作者简介:张世杰(1984 -),男,博士生,主要从事卫星编队控制、协同控制等。

通信地址:哈尔滨工业大学 416 信箱(150001)

电话:(0451)86402224 - 217

E-mail:zhangshijie1@gmail.com

(编辑:曹亚君)