



# 一种移动网络的结构稳定算法研究

## 摘要

本文提出了在有限的感知范围内,提高二维空间中移动网络的拓扑鲁棒性和连接鲁棒性的方法.由于移动基站和网络用户的动态不同步,控制策略被假定为异步的.在基于封闭区域重新定义连接的基础上,导出了保持当前网络拓扑的条件,并设计了两种方法来保证在提高拓扑和连接鲁棒性的过程中满足该条件.然后,设计了一种组方法,给出了网络拓扑保持完整的充分条件.最后,通过数值算例验证了所提方法的有效性.

## 关键词

结构稳定;连接;封闭区域;移动网络

中图分类号 TP11

文献标志码 A

收稿日期 2020-01-31

作者简介

于洪君,男,博士,副教授,研究方向为多智能体和网络最优化. hongjun.yu@hrbeu.edu.cn

## 0 引言

移动网络满足多个用户的数据需求,一定数量的移动基站可以按需为移动的用户提供民用和军用的服务<sup>[1-2]</sup>.移动基站通常具有有限的通信范围,这使得网络拓扑变得时变<sup>[3]</sup>.移动基站和数据用户的动态存在不确定性.基站和用户之间的连接可能会改变,并且网络拓扑容易受到干扰<sup>[1,3-7]</sup>.服务质量(QoS)取决于网络拓扑结构的健壮性.提高移动网络服务质量的方法有很多,比如文献[8-11]中的一些研究成果.

节点的移动性给网络服务带来了许多挑战.移动基站改变网络拓扑结构,对网络服务造成潜在损害<sup>[3-4]</sup>.数据路由需要根据网络拓扑结构的变化进行调整,以达到最小的开销和能量效率<sup>[9]</sup>,但由于网络拓扑结构的时变性而导致的消息丢失和延迟,使得任何节点都很难获得动态网络拓扑结构的可靠知识<sup>[8]</sup>.节点之间的协调是可取的,并用于调节数据流和认证<sup>[11]</sup>.为了解决数据路由问题,许多研究者将网络节点看作智能体进行了深入的研究<sup>[10]</sup>.这些方法的优点在于它可以以较低的成本提高网络的鲁棒性和灵活性.

本文从编队的角度出发,研究了提高网络拓扑鲁棒性的运动控制策略,目标是达到一个特定的网络拓扑,而不是一个特定的位置.相对距离和方位通常假定至少部分已知<sup>[5-7,12-13]</sup>.势函数<sup>[12,14-15]</sup>可用于处理软边界,这需要修改硬边界,例如避免碰撞.

弹性编队控制策略<sup>[16]</sup>在网络节点出现故障和故障时很有用,但它们的重点不是网络拓扑.图刚性也是一样,它用于调节代理之间的距离<sup>[17]</sup>,如果达到特定的距离,则需要形成队形.

本文的主要工作概括如下:

- 1) 针对具有一阶特性的基站和动态的网络连接,基于有限通信范围和封闭区域重新定义基站,并为其设计了一种主动分布式控制器;
- 2) 针对具有一阶特性的数据用户,设计了一种被动分布式控制器,以提高用户与网络连接的鲁棒性;
- 3) 提出了一种结合了主动和被动控制器优点的组合分布式控制器.

## 1 系统描述和准备工作

考虑二维空间中的一组移动基站和一组网络用户:

<sup>1</sup> 哈尔滨工程大学 自动化学院,哈尔滨, 150001

$$\mathbf{x}_i(k+1) = \mathbf{x}_i(k) + \mathbf{u}_i(k) + \boldsymbol{\varepsilon}_i(k), \quad (1)$$

$$\mathbf{z}_i(k+1) = \mathbf{z}_i(k) + \mathbf{v}_i(k) + \boldsymbol{\omega}_i(k), \quad (2)$$

其中,在二维空间中,  $\mathbf{x}_i(k) \in \mathbf{R}^2$  是移动基站在  $k$  时刻的位置;  $\mathbf{z}_i(k) \in \mathbf{R}^2$  是移动网络用户在二维空间中  $k$  时刻的位置;  $\mathbf{u}_i(k) \in \mathbf{R}^2$  和  $\mathbf{v}_i(k)$  是控制输入;  $\boldsymbol{\varepsilon}_i(k) \in \mathbf{R}^2$  和  $\boldsymbol{\omega}_i(k) \in \mathbf{R}^2$  是干扰输入. 干扰输入未知, 满足:

$$\|\boldsymbol{\varepsilon}_i(k)\| \leq \varepsilon^-, \|\boldsymbol{\omega}_i(k)\| \leq \omega^-, \quad (3)$$

其中,  $\varepsilon^-$  和  $\omega^-$  是已知常数.

移动底座  $\mathbf{x}_1(k), \mathbf{x}_2(k), \dots$  具有有限的通信范围  $R_1, R_2, \dots$ . 我们将从单个基站的角度讨论移动基站之间的联网. 如果  $\|\mathbf{x}_i(k) - \mathbf{x}_j(k)\| \leq R_i$ , 则移动基站  $\mathbf{x}_i(k)$  可以通过建立定向通信信道连接到基站  $\mathbf{x}_j(k)$ , 以接收来自基站  $\mathbf{x}_j(k)$  的数据. 基于基站  $\mathbf{x}_i(k)$  的有限通信范围  $R_i$ , 我们将 2D 空间分成两个子空间: 包含位于通信范围内的点的合集的子空间  $E(k)$ , 包含范围之外的点的合集的子空间  $E^-(k)$ . 基于  $\mathbf{x}_j(k)$  的通信范围  $R_j$ , 进一步的空间分割将  $E(k)$  和  $E^-(k)$  变成更多的子空间.  $n$  个移动基站有  $n$  次空间分割.

从第 2 次分割到第  $n$  次, 衍生的子空间可用来定义基站  $\mathbf{x}_i(k)$  到  $\mathbf{x}_i(k)$  以外的基站的连接. 其他的  $n-1$  次分割可以定义从其他基站到基站  $\mathbf{x}_i(k)$  的连接. 除了第 2 次分割, 给定  $\mathbf{x}_i(k)$  和  $R_i$ , 第  $n+1$  次分割将衍生子空间转化为更多子空间. 进行  $2n-1$  次分割后, 子空间可完全定义移动基站间的有向连接. 图 1 给出了 3 个移动基座  $\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \mathbf{x}_3$  的示例. 通信范围分别为  $R_1, R_2$  和  $R_3$  ( $R_2 < R_1 < R_3$ ). 可以看出, 从基站  $\mathbf{x}_1$  的角度分割空间后, 包含这 3 个基站的子空间分别被着色.

类似的, 网络用户与移动基站的连接也可以通过子空间重新定义. 假设一个网络用户 (坐标  $\mathbf{z}_i(k) \in \mathbf{R}^2$ ) 连接到一个移动基站  $\mathbf{x}_i(k)$ , 则  $\|\mathbf{x}_i(k) - \mathbf{z}_i(k)\| \leq R_i$ . 因此, 给定  $R_i$ , 2D 空间被分成两个子空间.  $n$  个基站共有  $n$  次分割. 图 2 中给出了一个网络用户  $\mathbf{z}_1$  和移动基站  $\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2$  和  $\mathbf{x}_3$  的示例.

我们使用子空间来重新定义移动基站和网络用户的连接. 可见, 只要移动基站或网络用户停留在其驻留子空间内, 其连接就不会改变. 另一方面, 对于移动基站之间, 如果所有移动基站的连接没有改变, 网络拓扑也不会改变. 这两种情况下的子空间都由不同中心圆的弧包围. 因此, 我们使用弧包围的封闭区域来表示子空间:

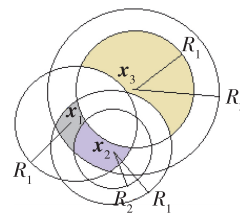


图 1 三个移动基站  $\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \mathbf{x}_3$  的子空间

Fig. 1 Colored space among bases  $\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \mathbf{x}_3$

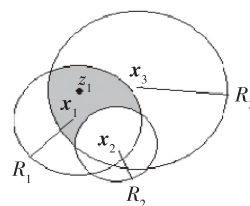


图 2 网络用户  $\mathbf{z}_1$  所在子空间

Fig. 2 Colored space for user  $\mathbf{z}_1$

$$E = \{e_1, e_2, e_3, \dots\},$$

式中,  $e_i$  是一个弧,  $E$  是由弧  $e_1, e_2, e_3, \dots$  包围的区域.

为了使移动基站和网络用户保持连接不变, 它们必须留在自己驻留的封闭区域内. 为此, 我们需要定义点到圆弧的距离:

$$g_i(k) = \lambda(e_i, \mathbf{x}_i(k)), \quad h_i(k) = \lambda(e_i, \mathbf{z}_i(k)),$$

其中,  $g_i(k)$  是移动基点  $\mathbf{x}_i(k)$  与圆弧上的点之间的最短距离;  $h_i(k)$  是网络用户  $\mathbf{z}_i(k)$  与圆弧  $e_i$  上的点之间的最短距离. 然后, 我们定义驻留在封闭区域中的点的逃逸距离:

$$g_i^-(k) = \lambda(E, \mathbf{x}_i(k)) = \varphi \min \lambda(e_i, \mathbf{x}_i(k)), e_i \in E;$$

$$h_i^-(k) = \lambda(F, \mathbf{z}_i(k)) = \kappa \min \lambda(f_i, \mathbf{z}_i(k)), f_i \in F,$$

其中  $E$  和  $F$  是封闭区域. 如果  $\mathbf{x}_i(k)$  在  $E$  内, 则为  $\varphi = 1$ ; 如果  $\mathbf{x}_i(k)$  在  $E$  外, 则为  $\varphi = -1$ ; 如果  $\mathbf{x}_i(k)$  在  $F$  内, 则为  $\kappa = 1$ ; 如果  $\mathbf{z}_i(k)$  在  $F$  的范围外, 则为  $\kappa = -1$ ; 移动基站  $\mathbf{x}_i(k)$  在  $E$  中的逃逸距离是  $g_i^-(k)$ , 移动基  $\mathbf{z}_i(k)$  在  $F$  中的逃逸距离是  $h_i^-(k)$ . 逃逸距离  $g_i^-(k)$  和  $h_i^-(k)$  可用于测量驻留封闭区域的连接鲁棒性. 因此, 对于封闭区域  $E$  内的移动基站  $\mathbf{x}_i(k)$  和封闭区域  $F$  内的网络用户  $\mathbf{z}_i(k)$ , 为了保持它们的连接, 我们应该有:

$$g_i^-(k) > 0, h_i^-(k) > 0, g_i^-(k) = \min g_i^-(k),$$

$$h_i^-(k) = \min h_i^-(k).$$

网络拓扑依赖于移动基站的连接. 它们的连接由逃逸距离  $g_i^-(k)$  决定, 整个网络拓扑的鲁棒性取决于  $g_i^-(k)$ . 为了提高拓扑的鲁棒性, 理想状态下, 我

们需要有非递减的  $g^-(k)$ . 同样,  $h_l^-(k)$  被用来测量网络用户  $z_l$  的连接健壮性. 理想状态下, 为了提高网络用户的连接鲁棒性, 需要有非递减  $h^-(k)$ .

## 2 主要结论

### 2.1 主动排斥

在本节中, 我们将介绍一种控制设计, 使移动基站和网络用户能够主动地提高整体拓扑健壮性和自身的连接健壮性, 移动基站和网络用户可以积极提高其对网络的连接鲁棒性. 提高移动基站的连接鲁棒性, 也能提高网络拓扑的鲁棒性. 系统是分布式的, 我们的方法是从单个移动基站和网络用户的角度出发. 假设移动基站  $x_i(k)$  位于封闭区域  $E$  内, 网络用户  $z_l(k)$  驻留在封闭区域  $F$  内.

$$g_i^-(k) = \lambda(E, x_i(k)) > 0, h_l^-(k) = \lambda(F, z_l(k)) > 0.$$

假设圆弧  $e_i \in E$ , 圆弧  $f_l \in F$ , 且

$$\lambda(e_i, x_i(k)) = \min \lambda(e_i, x_i(k)),$$

$$\lambda(f_l, z_l(k)) = \min \lambda(f_l, z_l(k)),$$

这意味着在属于  $E$  (或  $F$ ) 的所有弧中,  $e_i$  (或  $f_l$ ) 是最靠近  $x_i(k)$  (或  $z_l(k)$ ) 的. 在弧  $e_i$  上的所有点中, 发现点  $p_i(k)$  最接近于  $x_i(k)$ ; 在弧  $f_l$  上, 我们找到最接近  $z_l(k)$  的  $q_l(k)$  点. 我们有:

$$\begin{aligned} g_i^-(k) &= \|p_i(k) - x_i(k)\|, \\ h_l^-(k) &= \|q_l(k) - z_l(k)\|. \end{aligned} \quad (4)$$

基于(1)和(2), 控制器设计如下:

$$u_i(k) = \tau_i(k) (x_i(k) - p_i(k)) / \|x_i(k) - p_i(k)\|, \quad (5)$$

$$v_l(k) = \zeta_l(k) (z_l(k) - q_l(k)) / \|z_l(k) - q_l(k)\|, \quad (6)$$

其中  $\tau_i(k)$  和  $\zeta_l(k)$  分别是移动基站和网络用户的采样周期.

**定理 1** 一组移动基  $x_i(k)$ ,  $i = 1, 2, \dots$  按照(1)和(5)运动以提高拓扑健壮性. 给定  $g^-(0) > \varepsilon^-$ , 如果  $g_i^-(k) < g_j^-(k)$  和  $\tau_i(k) \geq 3\varepsilon^- + \tau_j(k)$ ,  $g^-(k)$  将逐渐增加到一个区间, 其中  $\|p_i(k) - x_j(k)\| = R_j$ .

**证明** 根据式(3)和(5), 我们有:

$$\|u_i(k) + \varepsilon_i(k)\| \geq \tau_i(k) - \varepsilon^-,$$

其中, 当  $\|u_i(k) + \varepsilon_i(k)\|$  取最小值时, 等号(=)成立. 我们可有:

$$\|p_i(k) - x_i(k+1)\| - \|p_i(k) - x_i(k)\| \geq \tau_i(k) - \varepsilon^-, \quad (7)$$

假设  $p_i(k)$  和  $p_i(k-1)$  在移动基站  $x_j(k)$  的通信范围边界处. 由于向量  $u_j(k)$ ,  $\varepsilon_i(k)$  和  $\varepsilon_j(k)$  能够决定

$p_i(k)$ , 我们可得:

$$\|p_i(k) - p_i(k-1)\| \leq \|u_j(k)\| + \|\varepsilon_i(k)\| + \|\varepsilon_j(k)\| = \tau_j(k) + 2\varepsilon^-. \quad (8)$$

假设  $g_i(k) = g^-(k)$ . 根据(7)和(8), 我们可得:

$$\begin{aligned} g_i^-(k) - g_i^-(k-1) &= \|p_i(k) - x_i(k)\| - \|p_i(k-1) - x_i(k-1)\| = \\ &= \|p_i(k) - p_i(k-1) + p_i(k-1) - x_i(k)\| - \|p_i(k-1) - x_i(k-1)\| \geq (\|p_i(k-1) - x_i(k)\| - \|p_i(k-1) - x_i(k-1)\|) - \|p_i(k) - p_i(k-1)\| \geq \\ &= \tau_i(k) - \varepsilon^- - \tau_j(k) - 2\varepsilon^- \geq 0. \end{aligned}$$

假设  $p_i(k)$  和  $p_i(k-1)$  在不同移动基站的范围边界上. 这意味着逃逸距离开始在来自不同移动基座的弧之间切换,  $g^-(k)$  将在最小值和次小值之间振荡.

**定理 2** 一组网络用户  $z_l(k)$ ,  $l = 1, 2, \dots$  按照(2)和(6)运动以提高连接的健壮性, 移动基站静止. 给定  $h^-(0) > \omega^-$ , 如果  $h_l^-(k) = h^-(k)$  和  $\zeta_l(k) \geq 2\omega^-$ ,  $h^-(k)$  将逐渐增加并收敛到一个区间.

**证明** 由(3)和(6), 我们可得:

$$\|v_l(k) + \omega_l(k)\| \geq \zeta_l(k) - \omega^-,$$

其中当  $\|v_l(k) + \omega_l(k)\|$  取最小值时, 等号(=)成立. 则我们有:

$$\|q_l(k) - z_l(k+1)\| - \|q_l(k) - z_l(k)\| \geq \zeta_l(k) - \omega^-. \quad (9)$$

假设  $q_l(k)$  和  $q_l(k-1)$  在同一移动基站的通信范围边界处. 由于向量  $\omega_l(k)$  决定  $q_l(k)$ , 我们可有,

$$\|q_l(k) - q_l(k-1)\| \leq \|\omega_l(k)\| = \omega^-. \quad (10)$$

假设  $h_l(k) = h^-(k)$ . 根据(9)和(10), 我们可得:

$$\begin{aligned} h^-(k) - h^-(k-1) &= \|q_l(k) - z_l(k)\| - \|q_l(k-1) - z_l(k-1)\| = \\ &= \|q_l(k) - q_l(k-1) + q_l(k-1) - z_l(k)\| - \|q_l(k-1) - z_l(k-1)\| \geq \\ &= (\|q_l(k-1) - z_l(k)\| - \|q_l(k-1) - z_l(k-1)\|) - \|q_l(k) - q_l(k-1)\| \geq \\ &= \zeta_l(k) - \omega^- - \omega^- > 0. \end{aligned}$$

假设  $q_l(k)$  和  $q_l(k-1)$  在不同移动基站的范围边界上. 这意味着逃逸距离开始在来自不同移动基座的弧之间切换,  $h^-(k)$  将在最小值和次小值之间振荡.

**注 1** 定理 1 提出了一组移动基站的边界条件,

以获得更健壮的网络拓扑.这样的条件可以保证所有基站的逃逸距离都不会减少.定理2在基站不可移动的假设下,给出了一组网络用户实现更健壮连接的边界条件.

## 2.2 被动排斥

在本节中,我们将介绍一种控制设计,使移动基站能够被动地增加其他移动基站和用户的拓扑健壮性和连接健壮性.设计从个人基础和用户的角度进行分析.基于(3),控制器设计如下:

$$\mathbf{u}_j(k) = -\tau_j(k) (\mathbf{x}_i(k) - \mathbf{p}_i(k)) / \|\mathbf{x}_i(k) - \mathbf{p}_i(k)\|, \quad (11)$$

$$\mathbf{u}_j(k) = -\tau_j(k) (\mathbf{z}_i(k) - \mathbf{q}_i(k)) / \|\mathbf{z}_i(k) - \mathbf{q}_i(k)\|, \quad (12)$$

其中 $\tau_j(k)$ 是移动基站和用户的采样周期.由(11)可得, $\|\mathbf{x}_j(k) - \mathbf{p}_i(k)\| = R_j$ ,由(12)可得, $\|\mathbf{x}_j(k) - \mathbf{q}_i(k)\| = R_j$ .

**定理3** 一组移动基站 $\mathbf{x}_i(k), i = 1, 2, \dots$ 按照(1)和(11)运动以提高网络稳定.给定 $g^-(0) > \varepsilon^-$ ,并且在 $g_i^-(k) < g_j^-(k)$ 和 $\tau_j(k) \geq 3\varepsilon^- + \tau_i(k)$ 的情况下, $g^-(k)$ 将一致递增收敛到某个区间,其中 $\|\mathbf{p}_i(k) - \mathbf{x}_i(k)\| = R_j$ .

**证明** 由(3)和(11)我们可得:

$$\|\mathbf{u}_j(k) + \boldsymbol{\varepsilon}_j(k)\| \geq \tau_j(k) - \varepsilon^-,$$

当 $\|\mathbf{u}_j(k) + \boldsymbol{\varepsilon}_j(k)\|$ 取最小值时,等号(=)成立.则我们有:

$$\|\mathbf{p}_i(k) - \mathbf{x}_i(k+1)\| - \|\mathbf{p}_i(k) - \mathbf{x}_i(k)\| \geq \tau_j(k) - \varepsilon^-. \quad (13)$$

假设 $\mathbf{p}_i(k)$ 和 $\mathbf{p}_i(k-1)$ 在移动基站 $\mathbf{x}_i(k)$ 的通信范围边界处.已知向量 $\mathbf{u}_i(k), \boldsymbol{\varepsilon}_i(k)$ 和 $\boldsymbol{\varepsilon}_j(k)$ 能够决定 $\mathbf{p}_i(k)$ ,我们可有:

$$\|\mathbf{p}_i(k) - \mathbf{p}_i(k-1)\| \leq \|\mathbf{u}_i(k)\| + \|\boldsymbol{\varepsilon}_i(k)\| + \|\boldsymbol{\varepsilon}_j(k)\| = \tau_i(k) + 2\varepsilon^-. \quad (14)$$

假设 $g_i(k) = g^-(k)$ ,则根据(13)和(14),我们可以得到:

$$\begin{aligned} g_i^-(k) - g_i^-(k-1) &= \|\mathbf{p}_i(k) - \mathbf{x}_i(k)\| - \|\mathbf{p}_i(k-1) - \mathbf{x}_i(k-1)\| = \\ &= \|\mathbf{p}_i(k) - \mathbf{x}_i(k-1) + \mathbf{x}_i(k-1) - \mathbf{x}_i(k)\| - \|\mathbf{p}_i(k-1) - \mathbf{x}_i(k-1)\| \geq \\ &= (\|\mathbf{p}_i(k) - \mathbf{x}_i(k-1)\| - \|\mathbf{p}_i(k-1) - \mathbf{x}_i(k-1)\|) - \|\mathbf{x}_i(k-1) - \mathbf{x}_i(k)\| \geq \\ &= \tau_j(k) - \varepsilon^- - \tau_i(k) - 2\varepsilon^- > 0. \end{aligned}$$

假设 $\mathbf{p}_i(k)$ 和 $\mathbf{p}_i(k-1)$ 在不同移动基座的范围边界上.这意味着逃逸距离开始在来自不同移动基

座的弧之间切换, $g^-(k)$ 将在最小值和次小值之间振荡.

**定理4** 一组移动基站的用户 $\mathbf{z}_l(k), l = 1, 2, \dots$ 按照(2)和(12)来提高所处网络位置的稳定性,假设移动基站是静止的.给定 $h^-(0) > \omega^-$ ,在 $h_l^-(k) = h^-(k)$ 和 $\tau_j(k) \geq \varepsilon^-$ 的情况下, $h^-(k)$ 将递增收敛到某个区间.

**证明** 由(3)和(12),我们可得:

$$\|\mathbf{u}_j(k) + \boldsymbol{\varepsilon}_j(k)\| \geq \tau_j(k) - \varepsilon^-,$$

其中当 $\|\mathbf{u}_j(k) + \boldsymbol{\varepsilon}_j(k)\|$ 取最小值时等号(=)成立,我们可得:

$$\|\mathbf{q}_i(k) - \mathbf{z}_i(k+1)\| - \|\mathbf{q}_i(k) - \mathbf{z}_i(k)\| \geq \tau_j(k) - \varepsilon^-. \quad (15)$$

假设 $\mathbf{q}_i(k)$ 和 $\mathbf{q}_i(k-1)$ 处在同一移动基站的通信范围边界处.假设网络用户的位置静止,我们可有:

$$\|\mathbf{z}_i(k) - \mathbf{z}_i(k-1)\| = 0. \quad (16)$$

假设 $h_l(k) = h^-(k)$ ,根据(15)和(16),我们可得:

$$\begin{aligned} h^-(k) - h^-(k-1) &= \|\mathbf{q}_i(k) - \mathbf{z}_i(k)\| - \|\mathbf{q}_i(k-1) - \mathbf{z}_i(k-1)\| = \\ &= \|\mathbf{q}_i(k) - \mathbf{z}_i(k-1) + \mathbf{z}_i(k-1) - \mathbf{z}_i(k)\| - \|\mathbf{q}_i(k-1) - \mathbf{z}_i(k-1)\| \geq \\ &= (\|\mathbf{q}_i(k) - \mathbf{z}_i(k-1)\| - \|\mathbf{q}_i(k-1) - \mathbf{z}_i(k-1)\|) - \|\mathbf{z}_i(k-1) - \mathbf{z}_i(k)\| \geq \\ &= \tau_j(k) - \varepsilon^- - 0 \geq 0. \end{aligned}$$

假设 $\mathbf{q}_i(k)$ 和 $\mathbf{q}_i(k-1)$ 在不同移动基座的范围边界上.这意味着逃逸距离开始在来自不同移动基座的弧之间切换, $h^-(k)$ 将在最小值和次小值之间振荡.

**注2** 定理3给出了一组移动基站之间增加逃逸距离的边界条件,使得网络拓扑更加健壮.定理4提出了移动基站的边界条件,以提高网络用户的连接鲁棒性.这是在假定网络用户不是移动用户的情况下实现的.

## 2.3 组合法

在这一部分中,我们将介绍结合主动和被动控制器的控制设计,并提出渐近稳定的条件.移动基站采用组合控制器来提高网络拓扑的鲁棒性.基于(3),(5)和(11),控制器设计如下:

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_j(k) &= (1 - \sigma_j(k)) \tau_j(k) (\mathbf{x}_j(k) - \mathbf{p}_j(k)) / \|\mathbf{x}_j(k) - \mathbf{p}_j(k)\| - \sigma_j(k) \tau_j(k) \\ & \quad (\mathbf{x}_i(k) - \mathbf{p}_i(k)) / \|\mathbf{x}_i(k) - \mathbf{p}_i(k)\|, \quad (17) \end{aligned}$$

其中  $\tau_j(k)$  为移动基站  $\mathbf{x}_j(k)$  的采样周期,  $\sigma_j(k)$  为主动控制器和被动控制器的控制信号, 且  $\sigma_j(k) = 1$  或 0.

**定理 5** 一组移动基站  $\mathbf{x}_i(k), i = 1, 2, \dots$  按(1)和(17)运动以提高网络结构稳定. 给定  $g^-(0) > \varepsilon^-$ , 在  $g_j^-(k) < g_i^-(k), \tau_j(k) > 3\varepsilon^- + \tau_i(k), g_i^-(k) > g_i^-(k), \tau_i(k) > 3\varepsilon^- + \tau_j(k)$  的情况下,  $g^-(k)$  将逐渐递增收敛到稳定的区间, 且  $\|\mathbf{p}_i(k) - \mathbf{x}_i(k)\| = R_j$ .

**证明** 如果  $g_j^-(k) < g_i^-(k)$ , 则证明过程与定理 1 的证明过程类似. 如果  $g_i^-(k) > g_j^-(k)$  则证明过程与定理 3 的证明过程类似. 证明过程的剩余部分被省略.

**注 3** 通过引入(5)和(11)的开关信号, 提出了组合控制器(17). 定理 5 给出了控制器的一个边界条件. 与单个控制器相比, 组合控制器放松了不等式边界条件, 降低了保守性.

### 3 仿真实例

本节中系统由 5 个移动基站组成, 并设置以下初始条件:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_1(0) &= [0, 0], \mathbf{x}_2(0) = [250, 0], \\ \mathbf{x}_3(0) &= [400, 0], \mathbf{x}_4(0) = [200, -230], \\ \mathbf{x}_5(0) &= [440, -230]; \\ R_1 &= 250.25, R_2 = 250.25, R_3 = 250.25, \\ R_4 &= 250.25, R_5 = 250.25; \\ \tau_i(k) &= 1, i = 1, \dots, 5; \varepsilon^- = 0.01. \end{aligned} \quad (18)$$

为了提高网络拓扑的鲁棒性, 在控制器(5)和(11)上进行了两次仿真(图 3—16). 两个控制器下的移动基座的轨迹分别如图 3 和图 10 所示. 图 4—9 显示了控制器(5)下移动基座的逃逸距离曲线(即  $g_i^-(k), i = 1, \dots, 5$ ), 图 11—16 显示了控制器(11)下的逃逸距离曲线. 在图 3 和图 10 中可以看到, 两个控

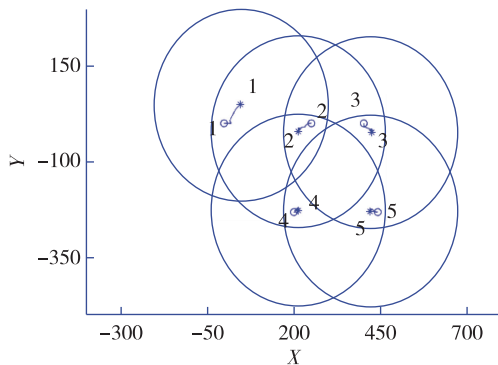


图 3 5 个移动基站在控制器(5)下的轨迹  
Fig. 3 Trajectory of five bases by controller (5)

制器都能够驱动移动基座紧靠其驻留的封闭区域的中心. 在这个过程中, 可以看到两个控制器的最短逃逸距离  $g^-(k)$  都能递增收敛到某个区间内. 此外, 两个仿真例子中  $g^-(k)$  开始抖动的时间在(5)下为  $k=18, g^-(20) = 33.05$ , 在(11)下为  $k=23, g^-(23) = 33.3$ , 接近于单个移动基站开始抖动的的时间.

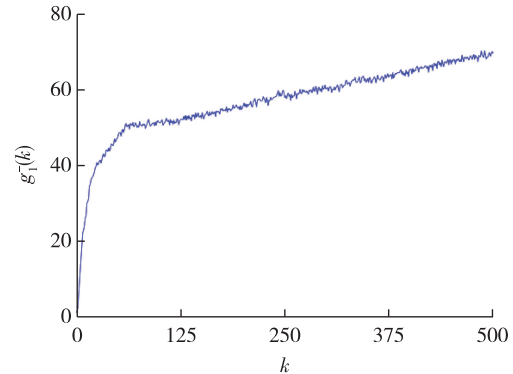


图 4 控制器(5)下的  $g_1^-(k)$  曲线

Fig. 4 Curve of  $g_1^-(k)$  by controller (5)

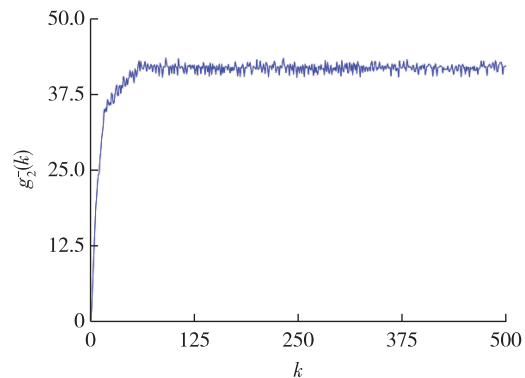


图 5 控制器(5)下的  $g_2^-(k)$  曲线

Fig. 5 Curve of  $g_2^-(k)$  by controller (5)

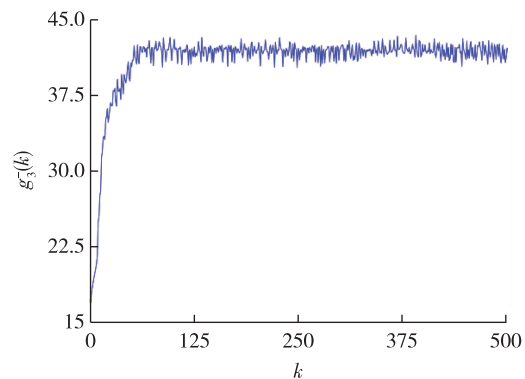


图 6 控制器(5)下的  $g_3^-(k)$  曲线

Fig. 6 Curve of  $g_3^-(k)$  by controller (5)

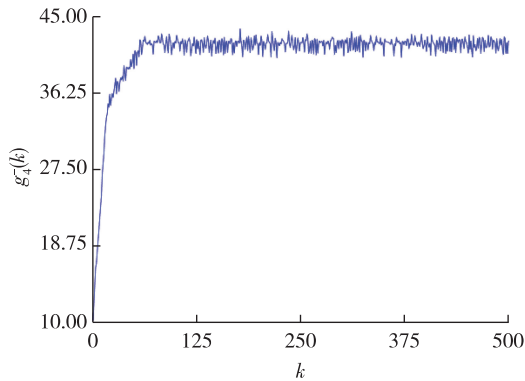


图7 控制器(5)下移的  $g_4^-(k)$  曲线

Fig. 7 Curve of  $g_4^-(k)$  by controller (5)

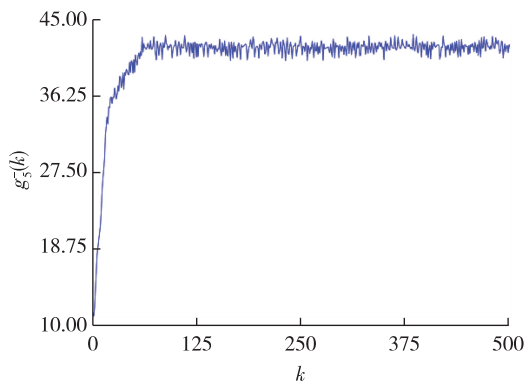


图8 控制器(5)下的  $g_5^-(k)$  曲线

Fig. 8 Curve of  $g_5^-(k)$  by controller (5)

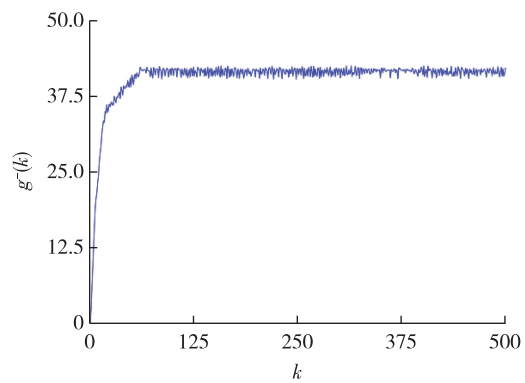


图9 控制器(5)下的  $g^-(k)$  曲线

Fig. 9 Curve of  $g^-(k)$  by controller (5)

## 4 结论

本文研究了利用编队控制提高网络拓扑鲁棒性和连接鲁棒性的问题.为了提高网络拓扑和连接的鲁棒性,提出了一种主动控制器和一种被动控制器,并给出了它们在采样率上的边界条件,以保证网络

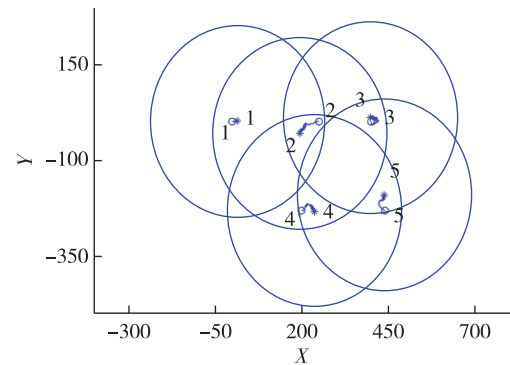


图10 5个移动基站在控制器(11)下的轨迹

Fig. 10 Trajectory of five bases by controller (11)

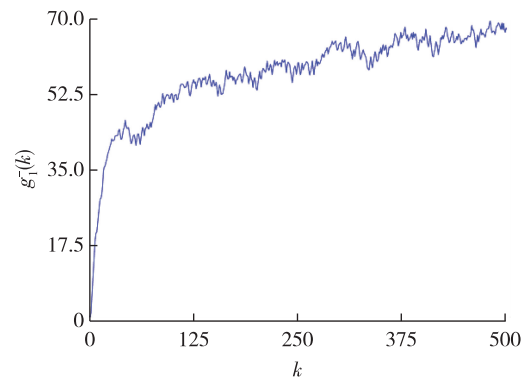


图11 控制器(11)下的  $g_1^-(k)$  曲线

Fig. 11 Curve of  $g_1^-(k)$  by controller (11)

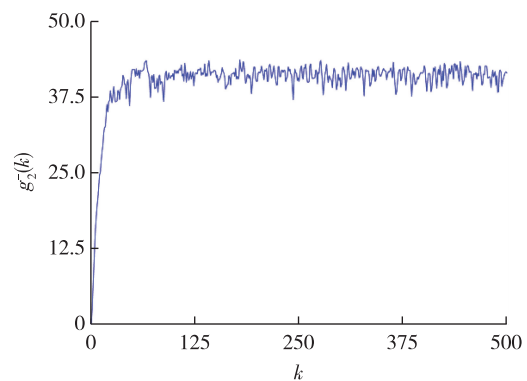
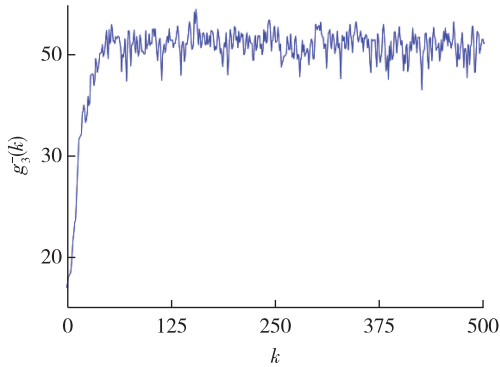
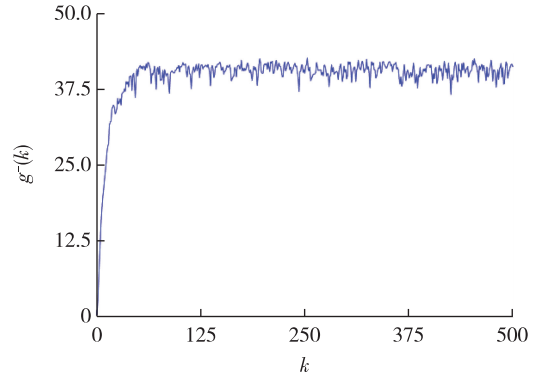
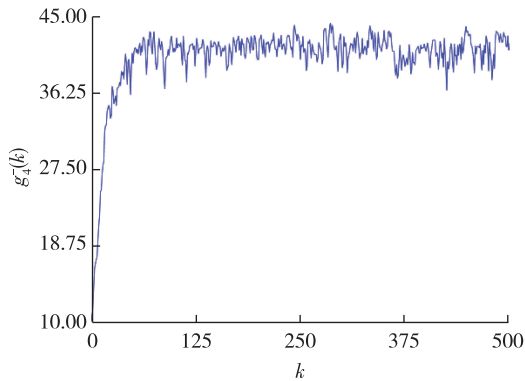
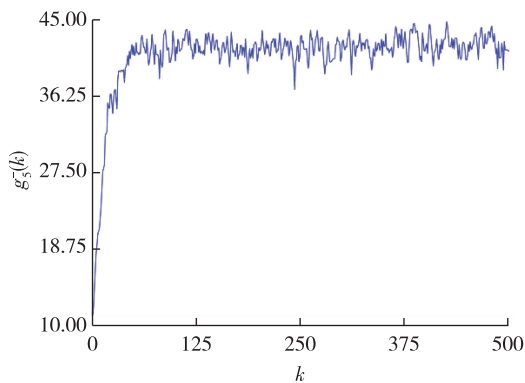


图12 控制器(11)下的  $g_2^-(k)$  曲线

Fig. 12 Curve of  $g_2^-(k)$  by controller (11)

拓扑鲁棒性和连接鲁棒性的渐近改善.通过引入开关信号,使边界条件的保守性得到放松,提出了一种组合控制器.进一步的工作中,二维控制器和边界条件可以扩展到三维.此外,即使网络拓扑发生变化,也可以保持拓扑的连接性.这涉及到对连接健壮性的评估和在移动基站和网络用户之间进行分布式控制的协议设计.



图 13 控制器(11)下的  $g_3^-(k)$  曲线Fig. 13 Curve of  $g_3^-(k)$  by controller (11)图 16 控制器(11)下的  $g^-(k)$  曲线Fig. 16 Curve of  $g^-(k)$  by controller (11)图 14 控制器(11)下的  $g_4^-(k)$  曲线Fig. 14 Curve of  $g_4^-(k)$  by controller (11)图 15 控制器(11)下的  $g_5^-(k)$  曲线Fig. 15 Curve of  $g_5^-(k)$  by controller (11)

## 参考文献

### References

- [ 1 ] Gankhuyag G, Shrestha A P, Yoo S J. Robust and reliable predictive routing strategy for flying ad-hoc networks[J]. IEEE Access, 2017, 5: 643-654
- [ 2 ] Stephan J, Fink J, Kumar V, et al. Concurrent control of mobility and communication in multirobot systems[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2017, 33(5): 1248-1254
- [ 3 ] Liang Q K, Modiano E. Survivability in time-varying networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2017, 16(9): 2668-2681
- [ 4 ] Scellato S, Leontiadis I, Mascolo C, et al. Evaluating temporal robustness of mobile networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2013, 12(1): 105-117
- [ 5 ] Yu H J, Shi P, Lim C C. Robot formation control in stealth mode with scalable team size[J]. International Journal of Control, 2016, 89(11): 2155-2168
- [ 6 ] Yu H J, Shi P, Lim C C. Scalable formation control in stealth with limited sensing range[J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2017, 27(3): 410-433
- [ 7 ] Yu H J, Shi P, Lim C C, et al. Formation control for multi-robot systems with collision avoidance[J]. International Journal of Control, 2019, 92(10): 2223-2234
- [ 8 ] Alhosainy A, Kunz T. Robustness, stability, and gains of utility maximization algorithms for mobile ad hoc networks[J]. International Journal of Wireless Information Networks, 2016, 23(4): 257-272
- [ 9 ] Karyakarte M S, Tavildar A S, Khanna R. Connectivity based energy efficient opportunistic robust routing for mobile wireless sensor networks[J]. Wireless Personal Communications, 2015, 84(1): 729-744
- [ 10 ] Zhang H, Wang X, Memarmoshrefi P, et al. A survey of ant colony optimization based routing protocols for mobile ad hoc networks[J]. IEEE Access, 2017, 5: 24139-24161
- [ 11 ] Zha X, Ni W, Zheng K F, et al. Collaborative authentication in decentralized dense mobile networks with key predistribution[J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2017, 12(10): 2261-2275
- [ 12 ] Hernandez-Martinez E G, Ferreira-Vazquez E D, Fernandez-Anaya G, et al. Formation tracking of heterogeneous mobile agents using distance and area constraints[J]. Complexity, 2017, 2017: 1-13
- [ 13 ] Soares C, Gomes J, Ferreira B Q, et al. LocDyn: robust distributed localization for mobile underwater networks[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2017, 42(4):

- 1063-1074
- [14] Do K D. Bounded controllers for formation stabilization of mobile agents with limited sensing Ranges [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2007, 52 (3): 569-576
- [15] Sabattini L, Secchi C, Fantuzzi C. Arbitrarily shaped formations of mobile robots; artificial potential fields and coordinate transformation[J]. Autonomous Robots, 2011, 30 (4): 385-397
- [16] Saulnier K, Saldana D, Prorok A, et al. Resilient flocking for mobile robot teams [J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2017, 2(2): 1039-1046
- [17] Ramazani S, Selmic R, de Queiroz M. Rigidity-based multi-agent layered formation control [J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2017, 47(8): 1902-1913

## Flocking towards a robust mobile network topology

YU Hongjun<sup>1</sup>

<sup>1</sup> College of Automation, Harbin Engineering University, Harbin 150001

**Abstract** This paper proposes methods to improve the topology robustness and connection robustness against jittering from both mobile bases and network users of mobile networks in a 2D space under limited sensing ranges. The control strategy is assumed to be asynchronous due to the unsynchronized dynamics of the mobile bases and the users in the network. The conditions are derived based on redefined connection based on enclosed areas to maintain the current network topology, and two methods are designed to ensure that the conditions are satisfied in the course of improving topology and connection robustness. Then, a combined method is devised, and the sufficient condition is presented such that the network topology remain intact. Finally, numerical examples are presented to test the performance of the proposed techniques.

**Key words** topology robustness; connection; enclosed area; mobile network