

一种多智能体系统抗毁性拓扑结构构建方法^{*}

王 强 陈 杰 方 浩

(北京理工大学 自动化学院 北京 100081)
(复杂系统智能控制与决策重点实验室 北京 100081)

摘 要 拓扑结构抗毁性对多智能体系统分布式协同控制完成既定的目标任务具有重要意义. 文中研究多智能体系统拓扑结构, 提出基于权重的分簇方法, 通过虚拟骨干网的分布式提取, 完成层次型拓扑结构的构建. 在基于簇的层次型结构的基础上, 提出关节点判断与中继节点运动控制相结合的分布式方法, 实现网络的双连通, 并阐述该方法在网络化火控系统中的应用. 实验表明文中提出的概念和方法能提高多智能体系统拓扑结构的灵活性和抗毁性, 为网络化无人作战理论在实践中的应用打下良好基础.

关键词 多智能体系统, 拓扑结构, 抗毁性, 双连通

中图法分类号 TP 181

A Construction Method of Fault-Tolerant Topology for Multi-agent Systems

WANG Qiang, CHEN Jie, FANG Hao

(School of Automation, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081)

(Key Laboratory of Intelligent Control and Decision of Complex Systems, Beijing 100081)

ABSTRACT

The fault-tolerant topology is important for multi-agent systems to complete the established objectives and tasks based on distributed cooperative control. The fault-tolerant topology of multi-agent systems is studied. A clustering algorithm based on weight is presented, and the hierarchical topology is constructed by distributed extraction of the virtual backbone network. A bi-connected network is realized using a distributed algorithm which combines articulation node-based algorithm with control of relay nodes on the basis of hierarchical structure. Application of the method to the networked fire-control system is represented. Experimental results show that the proposed methods enhance the fault tolerance of topology for multi-agent systems, which lays the foundations for the networked unmanned warfare theory into practice.

Key Words Multi-agent System, Topology, Fault-Tolerance, Bi-connectivity

^{*} 国家自然科学基金项目 (No. 61175112)、国家自然科学基金重大国际合作项目 (No. 61120106010)、国家杰出青年科学基金项目 (No. 60925011)、北京市教育委员会共建项目专项基金资助

收稿日期: 2012-02-13; 修回日期: 2013-06-20

作者简介 王强 (通讯作者) 男, 1986 年生, 博士研究生, 主要研究方向为多智能体系统、拓扑结构控制. E-mail: deef2002@163.com. 陈杰, 男, 1965 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为复杂系统智能控制与优化. 方浩, 男, 1973 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为移动机器人控制、并联机器人、多智能体系统.

1 引 言

多智能体系统分布式运动协同控制与应用受到日益广泛的关注,成为自动化、工程控制等学科领域研究的一个焦点问题。各智能体利用局部信息交互,发挥分布式资源的优势,实现整体规划,解决局部冲突,从而达到预期的整体目标。多智能体系统的研究作为一门综合性交叉学科,在工业和军事等领域均具有重要的理论研究价值和广泛的应用前景。

针对某些特定的具体应用,从功能层面上来看,网络化多智能体系统有时可被视为是一个移动传感器网络,有时也可被视为执行器网络。为完成既定的目标任务,每个智能体需通过自身所配备的通信设备进行相互间的信息交互,因而从信息流通的角度上来看,整个多智能体系统又可被视为一个通信互联网络。因此具有一个灵活、可靠、抗毁的通信网络拓扑结构是多智能体系统顺利进行分布式协同控制的重要保障。

文献[1]~文献[4]从连通性保持的角度出发研究多智能体系统网络的可靠性,通过控制个体间的间距来实现网络的连通性控制。Zavlanos 等^[1]讨论群体保持连通的重要性,提出采用一类势能场函数来保持个体之间的连通性,用以解决群集控制问题。进一步 Zavlanos 等^[2]将连通性约束转化成单个智能体的可微分的运动约束,利用 Laplacian 矩阵谱特性并结合光滑势场梯度方法实现连通性保持,给出的控制律可实现多智能体系统的避碰和跟踪控制。文献[3]通过定义基于 Laplacian 矩阵的势能函数,使系统的代数连通度 $\lambda_2(t)$ 恒为正常来实现连通性保持。文献[4]通过分布式次梯度优化的方法使系统对应的代数连通度最大化,从而增加系统的连通性。

尽管许多学者从不同方面提出保证网络连通的方法,但网络仍非常脆弱。连通的网络很有可能由于某些节点无法正常工作或某些邻接节点间的通信发生故障而发生网络分割现象。因此, Basu 等^[5]在无线自组网中提出通过移动节点的位置来增强网络抗毁性的方法。Das 等^[6]提出一种分布式的控制策略,只利用节点局部信息,通过移动网络中的某些节点,将一个初始连通的网络构建成为一个具有抗毁功能的连通网络。Milner 等^[7]提出一种抗毁性网络拓扑结构,通过控制无人机系统的移动,构建一个覆盖地面作战单元的通信骨干网络,实现地面作战单元的无缝链接。

传统的网络化多智能体系统,只是单纯通过网

络的方式将各个智能体连接起来,未考虑到系统某些特定应用环境的复杂和恶劣,忽略网络中某些节点失效所造成的影响。因此,本文从图论的角度出发,研究基于簇的双连通网络拓扑控制机制,采用基于权重的分簇算法,提取系统网络的虚拟骨干网。通过部署与控制载有无线通信设备的中继节点,构建一个具有较强抗毁性的双连通网络拓扑结构,从而形成一个适应性和抗毁性较强的网络化多智能体系统。

2 基于簇的层次型拓扑结构构建算法

分簇是无线网络中常用的拓扑控制机制。它可按照系统要求设计某种控制机制,将整个网络划分为相互连通且全局覆盖的若干个簇。每个簇由一个簇首节点、网关节点及多个成员节点组成。簇首节点与网关节点形成高一级的骨干网络,从而生成网络的层次型分级结构。基于分簇拓扑控制的层次型网络拓扑结构,能最大化利用无线网络中的有限能量和资源。在网络分簇的初始阶段,网络中的各个节点通过收发广播探测消息来获得整个网络的拓扑结构,当网络的拓扑结构实时发生变化时,各个节点通过更新自身的邻居信息表,调整已发生变化的部分,实时更新簇结构以维护网络的正常运行。

探测消息包括节点的唯一 ID 号和当前时刻的权值信息^[8],其格式为

$$HELLO_i = (ID_i | Weight_{v_i}(t)). \quad (1)$$

权值的设定考虑 3 方面的内容。

1) 节点的度(Degree)。节点的度即节点的可达邻居节点数 $|N_i|$,可在网络分簇初始阶段的探测消息中获得。由于无线网络中节点为 6~8 时网络性能最好,所以

$$Deg_{v_i}' = \frac{|N_i|}{7}. \quad (2)$$

2) 节点的通信质量(Quality)。节点通过自身搭载的无线电波接收机测量电路得到接收机捕获的平均信号强度,这个信号强度即接收信号强度(Received Signal Strength Indicator, RSSI)。在此使用接收到的信号强度来评估一个节点的通信质量 Qua_{v_i} :

$$Qua_{v_i} = \frac{1}{|N_i|} \sum_{j \in N_i} Qua_{v_i \leftrightarrow v_j}, \quad (3)$$

$$Qua_{v_i \leftrightarrow v_j} = \min(RSSI(v_{ij}), RSSI(v_{ji})), \quad (4)$$

其中 s 为接收灵敏度 $Qua_{v_i \leftrightarrow v_j}$ 为两相邻节点 v_i 和 v_j 之间的链路通信质量 $RSSI(v_{ij})$ 、 $RSSI(v_{ji})$ 分别表示两相邻节点彼此检测到的信号强度.

3) 节点的移动性 (Mobility). 接收信号强度可粗略估计节点之间的距离, 进而可用来表示两节点之间的相对运动状态, 即两相邻节点彼此靠近或远离. 若节点 v_i 检测到节点 v_j 在 t 时刻和 $t-1$ 时刻的信号强度分别为 $RSSI_{v_{ij}}^t$ 和 $RSSI_{v_{ij}}^{t-1}$, 那么两相邻节点之间的相对运动状态 $Mob_{v_{ij}}$ 表示为

$$Mob_{v_{ij}} = \ln \left(\frac{RSSI_{v_{ij}}^t}{RSSI_{v_{ij}}^{t-1}} \right). \quad (5)$$

显然, 由 $Mob_{v_{ij}}$ 的符号状态可得到两相邻节点之间的相对运动状态. 任一节点的移动性是其相对于所有邻居节点的平均运动状态:

$$Mob_{v_i} = \frac{1}{|N_i|} \sum_{j \in N_i} \frac{1}{|Mob_{v_{ij}}|}, \quad (6)$$

若 Mob_{v_i} 越大, 表示节点 v_i 自身运动程度越小; 反之, 节点 v_i 自身运动程度越大.

权值的设置如下:

$$Weight_{v_i} = \omega_1 Deg_{v_i}' + \omega_2 Qua_{v_i} + \omega_3 Mob_{v_i}, \quad (7)$$

其中参数 ω_1 、 ω_2 、 ω_3 为归一化权重因子.

分簇算法步骤如下.

算法 1 基于权值的分簇算法

step 1 分簇算法开始, 各个处于状态未定的节点周期性地交互探测消息. 簇初始化过程中, 各个节点可确定其邻居节点数, 即节点的度 $Deg_{v_i} = |N_i|$ 并收到来自其邻居节点最近时刻探测消息的信号强度.

step 2 各个节点 v_i 计算其节点度与最佳节点度 (本文中最佳节点度为 7) 之商 Deg_{v_i}' .

step 3 各个节点 v_i 根据式 (3) 和式 (4) 计算其通信质量 Qua_{v_i} .

step 4 各个节点 v_i 根据式 (5) 和式 (6) 计算其移动性 $Mob_{v_{ij}}$.

step 5 依据权值计算式 (7) 计算节点 v_i 的组合同权重, 其中

$$\begin{aligned} \omega_1 + \omega_2 + \omega_3 &= 1, \\ \omega_1 &= 0.5 \quad \omega_2 = 0.2 \quad \omega_3 = 0.3, \end{aligned}$$

然后节点通过探测消息广播自己的权值信息.

step 6 将相邻节点中具有最大权值 $Weight_{v_i}$ 的节点作为簇首. 当权值 $Weight_{v_i}$ 相同时, 选择 ID 较小的节点作为簇首. 若相邻节点首次收到簇首广播消息, 则宣称自己是该簇的成员节点.

step 7 重复 step 2 ~ step 6, 其他节点再选择

权值 $Weight_{v_i}$ 最大的作为簇首, 直到网络中所有节点都成为某个簇的成员.

step 8 相邻的簇选择网关节点. 当两个相邻簇交叠并具有多个可与两个簇首直接通信的节点时, 选择权值 $Weight_{v_i}$ 最小的一个节点作为网关节点; 如果两个簇相邻但不交叠, 则从两个簇中分别选取一个节点来构成分布式网关, 此时按照两节点权值之和最小的原则选择. 以上两种情况下如果权值都相同, 则选择 ID 最小的节点或随机选择节点.

在该权值分簇算法中, 使用接收信号强度来推算节点之间的相对距离, 不仅免去使用 GPS 设备测量节点间距离所产生的计算开销, 而且还能避免计算距离时产生的误差, 更加准确描述节点间的链路状态. 同时从簇结构的稳定性角度考虑, 使用节点相对其邻居节点的平均运动状态, 可较好适用于节点移动性较高的场合.

基于权值分簇算法的分级结构有利于均衡网络能量消耗, 与平面结构网络相比, 扩展性好、网络通信开销低、控制负载低, 并在移动管理和资源分配方面具有重要作用, 可较好适用于多智能体系统网络的构建^[9].

3 双连通网络控制策略

多智能体系统网络的拓扑结构通常用无向图 $G = (V, E)$ 表示. 该无向图是由顶点集合

$$V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$$

和边集合

$$E = \{(v_i, v_j) \in V \times V\}$$

构成. 在无向图中, 如果一个图的任意两个节点之间有且只有一条简单路径, 那么称这个图是单连通的. 在无向连通图中, 如果删除该图的任一节点都不会改变该图的连通性, 则该图是双连通的无向图.

初始成簇阶段所形成的网络是单连通的, 为增强网络在复杂、恶劣和对抗环境下的抗毁性, 本文以基于簇的层次型拓扑结构为基础, 在关节点算法的指引下, 通过部署与控制载有无线通信设备的中继节点, 无需移动网络中任意节点, 实现网络的双连通, 保证不会由于某一节点的失效而导致整个网络的瘫痪, 提高系统拓扑结构的可靠性和稳定性.

关节点的判断是构建双连通网络的基础和关键^[6]. 在一个初始连通的网络中, 如果删除网络中的某个节点及其附属边, 网络变得不连通, 那么该节点就是网络中的关节点. 显然, 一个双连通的网络是

没有关节点的,而网络中非关节点的链路失效不会影响网络的连通性.因此,首先需找出网络中的关节点,然后使所有的关节点变为非关节点,从而将一个初始连通或不连通的网络构成为双连通的网络.

本文从图论的角度,通过 Tarjan 算法^[10]对图进行深度优先搜索(Depth-First Search,DFS),从而判断关节点.对任意无向图,从图中任一点出发深度优先遍历得到优先生成树.对于树中任一节点 a 而言,其子节点为相邻节点,由深度优先生成树可得到两类节点的特性.1)若生成树的根有两棵或两棵以上的子树,则此根节点必为关节点,因为图中不存在连接不同子树节点的边.若删除此节点,则树便成为森林.2)若生成树中某个非叶子节点 a ,其某棵子树与 a 的祖先节点无连接,则节点 a 为关节点,因为删除节点 a 则其子树和图的其他部分被分割开来.利用以上特性,关节点判断算法具体描述如下.

定义 $DFS(a)$ 为节点 a 在搜索树中被遍历的次序号,定义 $Low(a)$ 为节点 a 或 a 的子树中能通过非父子边追溯到的最早节点,即 DFS 序号最小的节点.根据定义,则有

$$Low(a) = \min \left\{ \begin{array}{l} DFS(a) \\ DFS(b) \quad \begin{array}{l} (a,b) \text{ 为后向边} \\ \text{等价于 } DFS(b) < DFS(a) \\ \text{且 } b \text{ 不为 } a \text{ 的父节点} \end{array} \\ Low(b) \quad (a,b) \text{ 为树枝边} \end{array} \right.$$

一个节点 a 是关节点,当且仅当满足如下条件之一:

- 1) a 为树根,且 a 有多于一个子树;
- 2) a 不为树根,且满足存在 (a,b) 为树枝边,即 a 为 b 在搜索树中的父节点,使得

$$DFS(a) \leq Low(b).$$

在分簇网络关节点判断的基础上,考虑到网络中节点移动性差等特点,同时为不影响网络的初始构建,通过部署与控制移动性较强的中继节点运动到关节点的周围,产生新的通信链路,使网络中所有的关节点逐步成为非关节点,从而实现网络的双连通.双连通网络控制算法描述如下.

算法 2 双连通网络构建算法

step 1 采用基于权值的分簇算法,得到初始化的簇网络.

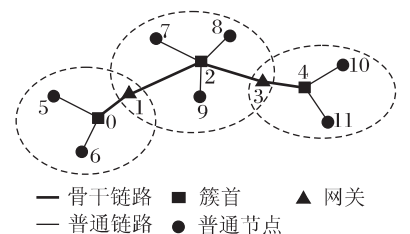
step 2 关节点判断算法,找出网络中的关节点,将网络中的关节点分为簇内关节点和簇间关

节点.

step 3 对于每个簇内关节点,将中继节点部署到其周围,使其同时与关节点和簇内普通节点互连,从而使簇内关节点变为非关节点,形成双连通簇.

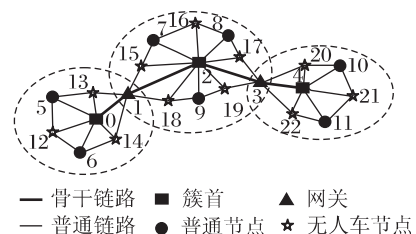
step 4 移动与簇间关节点相连的中继节点,使不同簇相邻的中继节点互连,使簇间关节点变为非关节点.

双连通网络控制策略实例如图 1 所示.



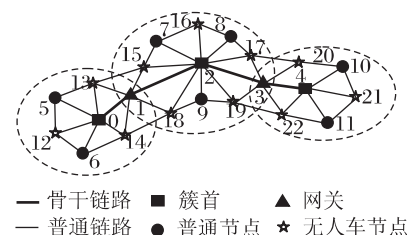
(a) 初始成簇单连通网络

(a) Initial clustering connected network



(b) 中继节点部署

(b) Deployment of the relay nodes



(c) 中继节点移动

(c) Movement of the relay nodes

图 1 双连通网络控制实例

Fig. 1 Example of bi-connected network control

图 1(a) 是初始成簇阶段形成的单连通网络,网络分为 3 个簇.通过关节点判断算法得到节点 0,1,2,3,4 为关节点.首先,各簇控制中继节点运动,使自身的簇形成一个双连通的簇网络.以节点 0 为簇首的簇为例,关节点 0 控制中继节点 12,13,14 运动到其周围,使得节点 12 能同时与节点 5,6,0 互连,节

点 13 能同时与节点 5、10 互连,节点 14 能同时与节点 6、10 互连.类似的,以节点 2 和节点 4 为簇首的簇也形成一个双连通的簇网络.经过第一个阶段,节点 0、2、4 不再是关节点(如图 1(b)所示).在下个阶段,节点 1 分别告知节点 13、15 和节点 14、18 移动互连,节点 3 告知节点 17、20 和节点 19、22 移动互连.至此,节点 1 和节点 3 也不再是关节点,从而使整个网络成为一个双连通网络(如图 1(c)所示).

基于多智能体网络系统骨干网提取和层次型结构,采用基于邻居节点信息的多点中继分布式策略,通过关节点的判断和中继节点运动控制相结合的分布式算法,使网络中的所有节点均变为非关节点,构建一个双连通的网络,从而增强整个网络系统的灵活性、抗毁性和容错能力.

4 本文方法在野战防空网络化火控系统中的应用

野战防空网络化火控系统分级体系结构如图 2 所示^[11].从图中可看出,网络分为指挥层网络和执行层网络,所有指控中心构成指挥层网络,所有的火控作战单元构成执行层网络,执行层网络又分为多个子网络,各个子网络通过其各自的网络化指控中心连接起来.

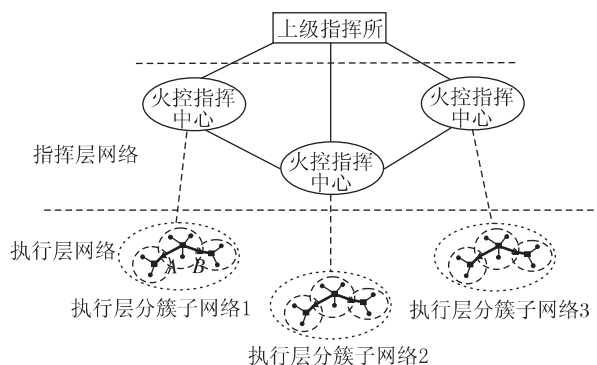


图2 野战防空网络化火控系统体系结构

Fig.2 Architecture of networked fire-control for field antiaircraft

指控中心是网络中的指挥控制节点,是系统的中枢单元.指控中心既要作为指挥控制层,掌握整体态势信息,确定原则和任务分配;又要作为火力控制层对网络内火控作战单元分配任务.

执行层子网络由各个火控作战单元通过无线链路自组织形成一个无线多跳移动网络,根据具体任务需求按照最优节点部署方案部署在一定的区域

内,彼此间可信息交互.执行层子网络采用基于簇的层次型结构和双连通构建策略,将便携型无人设备作为中继节点,在不影响火控系统的火力分配基础上,构建一个灵活、可靠、抗毁的防空网络化火控系统.

这是一个完全开放式的分级体系结构,同一区域内的火控作战单元可直接或间接相互通讯,而不同区域内的火控作战单元需通过指控中心通讯.这种分级体系结构,不仅从系统功能上分为指挥层和执行层,使整个作战体系指挥层次明确;而且在系统执行层网络上采用层次型结构,同级作战单元之间协作使作战决策任务分布在各个不同的子网中,避免系统对集中指挥的依赖,从而整体上提高系统效率和抗毁能力.

5 仿真实验及结果分析

仿真平台选用 ns-2.28,运行操作系统为 red-hat release 9.对本文方法模拟并分析其性能,将其与不分簇的网络性能和 Lowest-ID 分簇算法^[12]对比. Lowest-ID 是经典的最小 ID 算法,算法中将节点周围节点中 ID 最小的节点选举为簇首.实验所使用的一些基本仿真参数如下:仿真时间 600 s,仿真区域 500 m × 500 m,信号覆盖距离 250 m,信道频率 10 MHz,路由协议 AODV,MAC 协议 802.11b,无线传播模型 TwoRayGround,运动模型为参考点组移动模型(Reference Point Group Mobility, RPGM)^[13],CBR 负载 64 B, CBR 传输率 4 packet/s.

根据多智能体系统典型应用的特性和野战防空作战特性,网络化火控系统中节点的移动具有成组特性,因此,采用 RPGM 较适合于描述战场环境中各个分队按指定方向行进的移动模式.

簇的平均生存时间是整个过程中各个簇生存时间的平均值,该指标从整体的角度上反映分簇算法的稳定性.在节点密度不同的网络环境下对比分析本文提出基于权重的分簇算法和 Lowest-ID,得到节点密度与簇平均生存时间关系如图 3 所示.

从图 3 可看出,随着节点密度的增加,基于权重的分簇算法的平均生存时间是递增的,Lowest-ID 由于节点密度增加的影响而略有下降.这是因为基于权重的分簇算法在分簇过程中考虑 3 种因素,使簇头和网关节点的选择更合理.簇头的选择是按需自适应选择,并且簇头可根据系统需要选择理想的节点度数,延长簇的生成时间,增强簇的稳定性.通过模拟分析可看出,基于权重的分簇算法在网络规模

变化的情况下,簇结构的稳定性均明显优于 Lowest-ID.

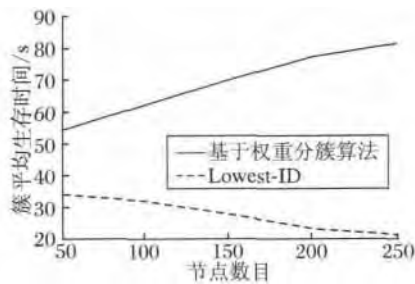


图3 簇平均生存时间与节点密度关系图

Fig. 3 Relationship between average survival time of the cluster and node density

路由协议开销 (Overhead) 是指网络中所有节点发送的路由控制分组占分组总数的比例。在不分簇网络与分簇双连通网络前后 AODV 路由协议的开销对比如图 4 所示。从图 4 可看出,在两种网络中 AODV 路由协议的开销都随节点数目的增加而增加。两者相比而言,在分簇网络中 AODV 路由协议的开销整体上更小。这正是基于簇的层次性拓扑结构的优势所在。同时,在双连通网络前后, AODV 路由协议的开销也随着节点数目的增加而增加。这是由于网络中的簇头和网关节点需和中继节点信息交互,控制中继节点的移动。但是分簇双连通网络后的 AODV 路由协议开销也比不分簇的平面型网络路由开销更小。从以上两个性能指标可看出,基于权重的分簇算法优于一般的 Lowest-ID,并且还可通过调节权重因子来改变不同因素的重要性以适应不同的系统环境 and 应用需求,适合为多智能体系统网络建立层次型拓扑结构。

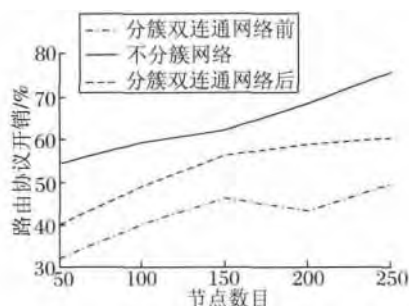


图4 不分簇网络与分簇双连通网络前后 AODV 路由协议开销

Fig. 4 AODV routing overhead between planar network and bi-connected network before and after clustering

同时,在节点密度不同的网络环境下对基于簇

的网络双连通控制策略成功率进行仿真分析,得到节点密度与双连通算法成功率的关系如图 5 所示。

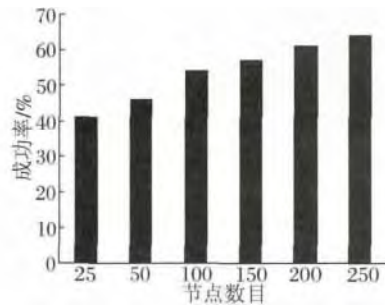


图5 双连通算法成功率

Fig. 5 Success rate of biconnectivity algorithm

从图 5 中可看出,随着节点密度的增加,双连通算法成功率是递增的。这是由于节点密度越大,部署的中继节点更易与周围节点互连互通。但在节点数目只有 25 的稀疏网络环境中,双连通算法的成功率只有 41%。

综合以上实验结果可看出,与一般的网络化系统相比,本文的基于簇的层次型双连通网络拓扑结构具有层次明确、通信量少、扩展性高和安全性强等特点,适用于多智能体系统,特别是野战防空网络化火控系统。

6 结 束 语

随着网络化控制和通信技术的不断发展,多智能体系统分布式协同控制完成既定目标任务的优势和重要性越来越明显。本文针对复杂、困难、恶劣、对抗环境下多智能体系统的拓扑结构的抗毁性问题,借助复杂网络的骨干子网抽取的概念,研究系统拓扑结构抗毁性问题及其在网络化火控系统中的应用。实验结果表明,本文的基于簇的层次型双连通网络拓扑结构,能增强系统的灵活性与可靠性。本文提出的概念和方法为网络化和无人化作战理论付诸实践奠定良好基础。

参 考 文 献

- [1] Zavlanos M M, Pappas G J. Potential Fields for Maintaining Connectivity of Mobile Networks. IEEE Trans on Robotics, 2007, 23 (4): 812-816
- [2] Zavlanos M M, Jadbabaie A, Pappas G J. Flocking While Preserving Network Connectivity // Proc of the IEEE Conference on Decision and Control. New Orleans, USA, 2007: 2919-2924

- [3] Savla K, Notarstefano G, Bullo F. Maintaining Limited-Range Connectivity among Second-Order Agents. *SIAM Journal on Control and Optimization*, 2009, 48(1): 187–205
- [4] Zavlanos M M, Tahbaz-Salehi A, Jadbabaie A, *et al.* Distributed Topology Control of Dynamic Networks // *Proc of the American Control Conference*. Seattle, USA, 2008: 2660–2665
- [5] Basu P, Redi J. Movement Control Algorithms for Realization of Fault-Tolerant AD HOC Robot Networks. *IEEE Network*, 2004, 18(4): 36–44
- [6] Das S, Liu H, Nayak A, *et al.* A Localized Algorithm for Bi-connectivity of Connected Mobile Robots. *Telecommunication Systems*, 2009, 40(3/4): 129–140
- [7] Milner S D, Llorca J, Davis C C. Autonomous Reconfiguration and Control in Directional Mobile ad HOC Networks. *Circuits and Systems Magazine*, 2009, 9(2): 10–26
- [8] Zou L, Zhang Q, Liu J. An Improved Weight-Based Clustering Algorithm in MANETs // *Proc of the 4th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing*. Dalian, China, 2008: 1–4
- [9] Abbasi A A, Younis M. A Survey on Clustering Algorithms for Wireless Sensor Networks. *Computer Communications*, 2007, 30(14/15): 2826–2841
- [10] Tarjan R E. Depth-First Search and Linear Graph Algorithms. *SIAM Journal on Computing*, 1972, 1(2): 146–160
- [11] Chen C, Chen J, Zhang J, *et al.* Research on Architecture of Networked Air Defense Fire Control System. *Acta Armamentarii*, 2009, 30(9): 1253–1258 (in Chinese)
(陈晨, 陈杰, 张娟, 等. 网络化防空火控系统体系结构研究. *兵工学报*, 2009, 30(9): 1253–1258)
- [12] Ephremides A, Wieselthier J E, Baker D J. A Design Concept for Reliable Mobile Radio Networks with Frequency Hopping Signaling. *Proc of the IEEE*, 1987, 75(1): 56–73
- [13] Roy R R. *Handbook of Mobile AD HOC Networks for Mobility Models*. New York, USA: Springer, 2011

(上接第 326 页)

一、征文范围(但不限于)

• 模式识别基础理论

统计与结构模式识别 神经网络、核方法 多分类器系统 特征提取、降维与特征选择
无监督学习、聚类 模型选择与适应 半监督学习等

• 图像与视频处理

图像处理与增强 图像与视频分割 图像特征提取 基于内容的图像/视频检索
信息隐藏与数字水印等

• 计算机视觉

视觉感知模型 场景分析 摄像机标定、三维视觉 目标检测与识别
运动目标检测与跟踪 行为分析与识别 视频内容语义理解等

• 语音语言、多媒体与应用

语音识别与说话人识别 文本分析与检索 文字识别与文档分析 医学图像分析
遥感图像分析 生物特征识别 多模态人机交互 多媒体分析与检索
工业应用等

(下转第 377 页)