

# 分布式无线网络中的自适应控制协议

刘 凯,李建东

(西安电子科技大学综合业务网国家重点实验室信息科学研究所,陕西西安 710071)

**摘 要:** 本文提出了一种新颖的移动分群算法和分群保持策略,它可以用较少的控制开销快速获得网络的分群控制结构并能适应拓扑结构的变化.采用重叠群方案简单可靠地实现了分群大小的优化,将节点密度高的区域灵活地划分成多个节点数较少的群,增大了每个节点的通信容量.提出了网关智能控制协议,该协议缓解了网关成为多信道分群间通信的瓶颈.

**关键词:** 分布式无线网络;移动分群协议;移动性支持;多跳网络结构;分群大小优化;智能网关控制

**中图分类号:** TN915.02 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2001)07-0877-04

## Adaptive Control Protocols in Wireless Ad Hoc Networks

L IU Kai ,L I Jian-dong

(National Key Lab. of ISN and Information Science Institute, Xidian University, Xi'an, Shanxi 710071, China)

**Abstract:** A novel adaptive clustering protocol, called the mobile clustering protocol, is presented firstly. It acquires network control architecture rapidly and adapts to topological changes with less control overhead than those proposed so far. It also supports node mobility and maintains the stability and robustness of the network architecture. The new method to adopt overlapping clusters for cluster size optimization is proposed secondly. The area with high node density is divided into clusters with a small number of nodes, so that the maximum throughput of each node can be increased. The intelligent control protocol is proposed finally to prevent gateways from becoming communication bottlenecks among clusters with different channels and avoid missing packets on their non-sensing channels. Simulation and numerical results are shown in the paper.

**Key words:** wireless ad hoc network; mobile clustering protocol; mobility support; multihop network architecture; cluster size optimization; intelligent gateway control

### 1 引言

分布式无线网络是一种不需要固定基础设施支撑的、由若干移动节点组成的自组织无线网络<sup>[1~5]</sup>,它主要应用于办公环境、抢险、抗灾、救援、探险、军事行动和临时的重大活动中.分布式无线网络是一个移动和多跳的网络,要实现整个网络的快速部署以及拓扑结构变化后网络的动态重建的最有效方法是采用分群协议.分群协议可以有效地使用多信道,提高系统容量<sup>[1,2,4]</sup>;减少控制信息的交换开销,增强节点的控制和管理能力<sup>[1,2,4,5]</sup>;很容易实现网络的局部同步<sup>[4,6]</sup>;为多媒体业务提供具有服务质量(QoS)保证的路由<sup>[2,4,6]</sup>;支持拥有大规模节点的无线网络<sup>[5]</sup>.

本文提出了一种新颖的移动分群算法和分群保持策略来实现无线网络的快速部署和自适应跟踪拓扑变化,利用重叠群方案实现了分群大小优化、增大每个节点的最大通信容量,提出了智能网关控制协议来提高网络的信道利用率.

### 2 分布式无线网络的分群模型

#### 2.1 网络模型

无线通信网络的拓扑可以由无向图  $G=(V, E)$  表示,  $V$  代表无线通信节点的集合,  $E$  表示网络中链路的集合.对于任意节点  $u$  和  $v \in V$ , 如果它们不是相邻节点且可以通过一个公共的相邻节点转发而进行通信,则称节点  $v$  是节点  $u$  的两跳节点.通常假定在通信半径范围内的两个节点可以相互通信,并且节点之间建立的是双向通信链路.每个节点仅有一部收发信机,工作在半双工模式.节点有不同的本征号(ID),节点通过收发预定的控制分组来获得周邻节点以及整个网络的拓扑连通情况和变化情况.

#### 2.2 分群结构

在分群结构中需将网络分为若干个群,在每个群内可以采用集中式控制(需选举一个群首),也可采用全分布式控制(无群首).有群首的分群结构可以采用由群首控制的无冲突

多址协议,如时分多址(TDMA)<sup>[1]</sup>或采用群首对群内节点进行轮询发送和中转控制<sup>[7]</sup>,这种做法很容易控制实时通信、减少普通节点的路由存贮和交换路由的开销。无群首的分群结构在群内采用全分布式控制,可避免在群首方案中由于群首参与过多的控制而成为群内业务流的瓶颈,还可以避免由于群首失效所带来的严重影响。本文的移动分群协议采用无群首的分群结构。

### 3 智能网关控制协议

在分群无线网络中,群内各节点使用同一个信道,不同群使用不同的信道。在不同群间指定一个或多个节点作为网关,用来中转群间的业务。当网关中转业务时,网关使用接收节点所在群的信道发送。由于网关要与多个群通信,它只拥有一半双工方式工作的收发信机,所以它需要以顺序或随机方式在多个信道上工作,这会造成在监听一个信道时漏收在其它信道上向它发送的分组。因此,网关将成为群间通信的瓶颈。最直接的解决方法是使用多部接收机,仿真结果表明,每个网关使用两部接收机时的性价比最好<sup>[8]</sup>,但由于网关是从各节点中动态选择的,这就要求所有的节点必须配有两部接收机,从而使得整个网络的成本大大增加,所以在实际应用中不采用这种方法。

为了解决这个问题,本文提出了一种网关控制方案,即智能网关控制(IGC)协议。当网关切换到某个信道上并监听到这个信道空闲时,它立即发送一个短的控制消息来表明它开始在该信道上接收;当网关离开这个信道时,它就会发送一短控制分组说明它的离去。这样避免了由于网关没有监听该信道而造成的向它发送的分组丢失。在 IGC 协议中,若两个群之间有多个节点可作为独立的网关,选择其中两个作为双网关。当其中一个网关在某群的信道上进行收发时,另一个网关将切换到另一个群的信道上进行收发。而且,如果一个群中的节点不知道某个网关已经切换到另外一个群的信道上而向该网关发送分组时,另一个正在监测该信道的网关将自动承担这个任务并向其他群中转该业务。因此这种方案在不增加节点设备的情况下可以达到网关拥有两部接收机情况下的网络性能,从而完全避免了由于一个网关不能同时监测相邻群的两个信道而造成的分组丢失。采用双网关的通信过程如图 1 所示,图中表示了节点 3 和节点 8、节点 1 和节点 5、节点 7 和节点 3、节点 8 和节点 6 通信的情况,其中,网关  $m$  正在监测群  $C_1$  的信道、网关  $n$  正在监测群  $C_5$  的信道。

## 4 移动分群协议

### 4.1 移动分群算法

衡量一个分群算法的好坏在于它能否以很少的控制开销快速部署整个网络,目前常用的分群算法是最小 ID 分群算法和最高连通性分群算法<sup>[1]</sup>。最小 ID 分群算法仅用两帧(即每个节点发送两次控制消息)的组网时间,而最高连通性分群算法需要三轮控制消息发送的组网时间,因此它并不是快速部署的。本文提出了基于最小 ID 分群算法的移动分群算法。首先,全网节点以任意次序发送一轮控制分组,这样各节点就

道了邻节点的情况,然后执行算法如下:

(1)若本节点的 ID 号为所有邻节点中的最小 ID 号,则宣布成立新群,群号即为本节点 ID;否则执行(2)。

(2)一直等待直至收到邻节点中有宣布成立新群的控制消息时,加入此群并广播这一消息。

(3)在(2)中,倘若发现邻节点中比自己 ID 号小的节点都已经宣布加入其他群中,而自己又未被包括在这些群中,则宣布自己成立新群。

(4)为了避免控制消息由于碰撞而未被正确接收,经过一定的延时,若本节点没有收到任何一个尚未发送第二轮控制消息的邻节点的控制消息,则继续执行(1)~(3)中适合本节点情况的步骤;对于收到冗余的控制消息,若其中已标明本节点的情况,则不需进一步的发送。

按照上述(1)~(3)的情况,仅用一轮控制消息就能快速部署网络的分群结构,(4)保证了只对未收到控制消息的节点再进行确认,消除了由于分组碰撞而造成控制消息丢失的影响。图 2 表明了移动分群算法的实现过程。

### 4.2 移动分群保持

移动性支持是分布式无线网络主要考虑的因素之一。通常从两方面来考虑对移动性的支持,即分群和路由保持。本文仅对前者进行讨论。对于分群保持的要求主要有两点:(1)拓扑变化所引起的分群结构的变化最小,并且用很小的控制开销恢复稳定的通信结构;(2)分群变化后分群保持策略引起的变化最低。文献[4]采用最高连通性作为分群保持的依据,这种方法有以下缺陷:(1)由于两跳节点的连通性需要三轮控制分组的交换才能得知,这造成各节点交换这些信息需要很长时间,并且以前所获得的信息很容易过时,从而造成各节点的分群结果不相同,导致各节点必须交换更多的消息后才能正常通信;(2)节点移动后,群中最高连通性的节点往往由某个网关变成,与之相距两跳的其它群内节点都要重建新群,并且很容易导致邻群的连锁重组变化;(3)具有最高连通性的节点极易变化,很容易造成交换的信息跟不上最高连通性节点的变化。由上可知,最高连通性分群保持并不能最大限度地满足分群保持的两点要求。另外,最小 ID 号分群保持策略本质上只需要两轮控制信息的交换,但是当群内 ID 最小的节点移动到另一个群时,整个网络的分群就有个较大变化,因而不稳定。

本文提出了灵活的移动分群保持策略。仅当节点不属于任何一个群时才成立新群,否则仅改变所在群而不改变群结构。如果群内节点有较大的移动变化,则以原群大部分节点为主体保留原群结构。它的具体做法是:若节点发现本群内节点出现三跳,则开始实行分群保持策略。此时,断定谁该离开原群的方法(即出局问题)是根据自己在本群的一跳邻节点数和三跳节点数的大小判断,有以下三种情况:(1)若节点  $i$  在本群中的一跳邻节点数小于在该群的三跳节点数,则节点  $i$  出群(由于若它不出群,则要包括它在内的群必将使所有在本群的三跳节点出群)。(2)若节点  $i$  在本群中的一跳邻节点数大于在该群的三跳节点数,则节点  $i$  不出群。(3)若二者相等,则比较节点  $i$  和它在群中的邻节点、三跳节点的 ID 大小,将最

小 ID 的节点及邻节点保留在原群中,其余出局. 这种方法是对称、唯一的,并且当节点发现自己与本群的某些节点相距三

跳时它所有作出判断所需的信息是最新获得的,因此可以准确保证群的绝大多数节点仍在原群.

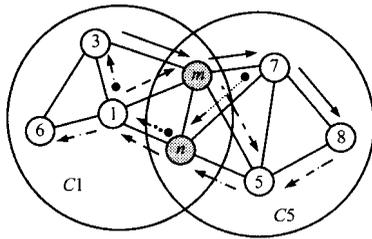


图 1 利用双网关实现群间通信

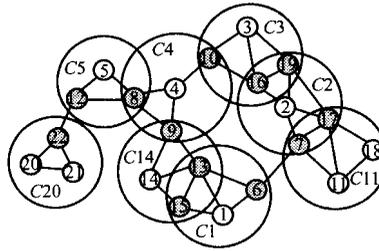


图 2 移动分群算法的实现

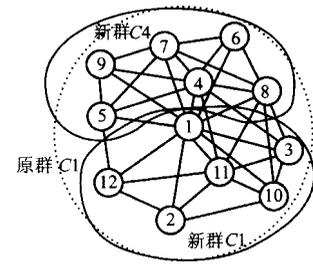


图 3 运用重叠群实现分群大小的优化

### 4.3 分群大小的优化

群的大小关系到每个节点究竟具有多少通信能力的问题. 通常群的大小可由功率控制改变节点之间的通信链接状态来实现. 群大小的优化就是控制群内节点数, 以便使每个节点乃至整个网络达到最高的通信容量. 文献[3]利用功率控制和 Delaunay 三角网来保证每个节点的邻节点数最多不超过某一值, 在全分布式单信道情况下, 这一值为 6 时吞吐率性能最好. 本文提出了另一种方式实现群大小的优化, 即重叠群法. 假定节点发射功率一定, 若一个群的节点数过多, 则可以将原群分成两个或更多个群. 由于采用每个群使用不同信道, 所以各个群的每个节点都能占用更高的通信资源并使整个网络达到很高的信道利用率. 运用重叠群优化分群大小的情况如图 3 所示, 拥有 12 个节点的原群  $C_1$  分为两个拥有 6 个节点的群  $C_1$  和  $C_4$ . 本文在后面比较了使用 IEEE 802.11 RTS/CTS 接入方式的吞吐率性能, 从而得到群的最佳大小为 6~8 个节点. 传统有群首分群的方案避免出现群首之间相距一跳的情况, 当两个群首由于移动而能相互通信, 需要重新开始分群<sup>[7]</sup>或在周期性自组织时重新分群<sup>[11]</sup>. 采用重叠群方案则不需要考虑这一点(对于无群首分群也一样适用), 它只需要在

群首或位于群中心的节点的协调下进行简单的合并或划分.

## 5 网络性能

### 5.1 最优群大小

对同一节点数  $N$ 、通信半径  $R$  下, 网络节点在区域  $100 \times 100$  中随机分布, 将 100 种连通网络拓扑的端到端吞吐量的平均值作为网络的性能(具体分析见文献[9]), 通过改变  $R$  来获得不同的平均群大小(CS). 图 4 和图 5 比较了  $N=25$  和 100 的情况下, 每个群使用 IEEE 802.11 RTS/CTS 接入方式<sup>[10]</sup>时端到端吞吐量随总业务量和 CS 变化的网络性能. 其中, 归一化的数据分组发送时间为 1, RTS、CTS 和应答分组的发送时间为 0.1, 分布式帧间隔时间(DIFS)为 0.05, 短帧间隔时间(SIFS)为 0.02, 发送时延(包括信号传播时延、收发信机转换时间和载波监测时延)为 0.01. 从各图中可以看出, 当  $N=25$  时最佳群的大小大致为 6~8, 若再增大群大小后网络性能的降低也不大, 这是由于各节点之间路由的平均跳数大大减少的缘故, 比如, 当  $CS=6$  时平均跳数为 2.758, 而当  $CS=9$  时平均跳数为 1.968. 当  $N=100$  时最佳群大小为 6~8, 最重要的是群大小在这个范围时可以允许群内每个节点占用较多的信道资源.

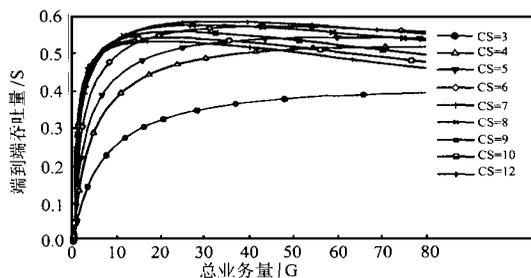


图 4  $N=25$  时 RTS/CTS 协议的网络性能

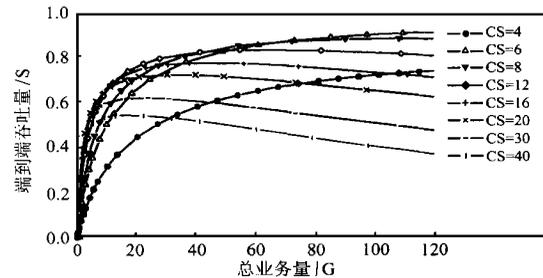


图 5  $N=100$  时 RTS/CTS 协议的网络性能

### 5.2 分群协议对节点移动的适应程度

考察 50 个节点随机均匀分布在  $100 \times 100$  单位长度区域的情况, 通信范围  $R$  为 25 个单位长度, 节点移动的方向为在  $(0, 2\pi)$  中均匀分布, 节点的移动速度由 0 至 5 单位长度/单位时间变化, 每隔单位时间拓扑变化一次. 为了反映各分群协议适应节点移动和拓扑变化的能力, 我们考察在移动情况下整个网络为了完成适应拓扑变化, 保持分群结构而在每次拓扑变化中需要处理的节点变化数目, 这也决定了在其后所要

交换的相关控制开销大小. 图 6 表示了在一定节点移动速度下每次拓扑变化时使用最小 ID 分群协议(LIDCP)、最高连通性分群协议(HCCP)和移动分群协议(MCP)需要处理的节点变化数目, 其中, 在 LIDCP 和 HCCP 中包括有无群首(CH)两种. 有趣的是这种变化近乎线性, 这是由大量统计所造成的. 从图中可以看出, 在节点移动情况下链路的变化数目是最高的, 有群首的分群协议比无群首的分群协议要处理更多的节点变化, 从而也要交换更多的控制开销. 由于链路变化往往与

具有最高连通性的节点相关,所以最高连通性分群协议要比其他协议处理更多的节点变化,而移动分群协议只对最少的节点变化进行处理。

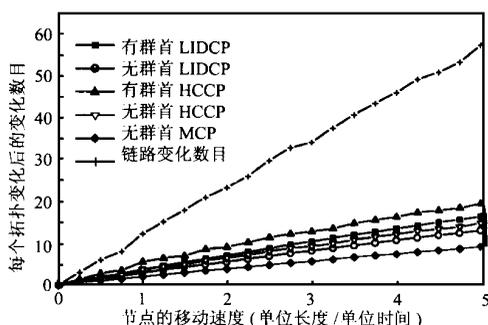


图 6 各分群协议在移动情况下需要处理的节点变化数目

### 5.3 群的生存时间

为了考察各分群协议的顽健性和稳定性,我们以每个群的生存时间作为衡量标准。所谓群的生存时间,就是每个群从产生开始到合并、消失的时间间隔。拓扑每隔 0.01 个单位时间变化一次,其余条件同前所述。图 7 表示了各分群协议的群生存时间,从图中可以看出,无群首分群协议的群生存时间要比有群首分群协议的长,这是由于无群首方案中不考虑群首改变而造成群消亡的情况。在有群首分群协议中,最高连通性分群协议的结果不如最小 ID 分群协议的,而在无群首分群协议中,最高连通性分群协议的结果要比最小 ID 分群协议的强,这是因为以最高连通性选出的群首将由于节点移动、拓扑变化而较为频繁改变,若不考虑群首的影响,而只以最大连通性节点保持分群,则会较好的保证分群稳定。移动分群协议在节点低速运动时的群生存时间远远高于其它分群协议的,在节点高速运动时它的群生存时间大大下降,但仍高于其他分群协议的。

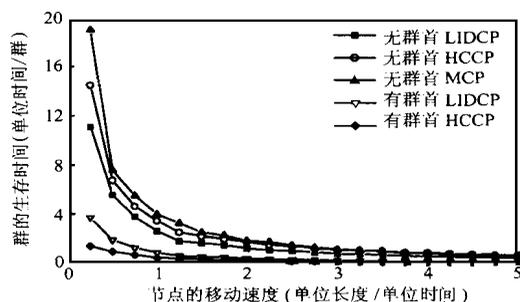


图 7 各分群协议的群生存时间

## 6 结论

本文提出了移动分群算法和移动分群保持策略,可以很好地支持分布式无线网络的多跳结构和移动性,具有快速部署、所用控制开销少、较强顽健性的特点。网关的智能控制方案缓解了网关成为多信道分群之间通信的瓶颈,双网关可以使网关达到两部接收机的性能,并且消除了网关随机切换到分群各信道时引起在非监听信道上漏收分组的现象。采用重

叠群方案可以简单、快速地完成分群大小的优化,最大限度地增大每个节点的通信容量和整个网络的端到端吞吐量。

### 参考文献:

- [1] M Gerla, T C Tsai. Multicluster, mobile, multimedia radio network [J]. ACM/Baltzer J. Wireless Networks, 1995, 1(3): 255 - 265.
- [2] A B McDonald, T F Znati. A mobility-based framework for adaptive clustering in wireless ad hoc networks [J]. IEEE J. Select. Areas Commun., 1999, 17(8): 1466 - 1487.
- [3] L Hu. Topology control for multihop packet radio networks [J]. IEEE Trans. Commun., 1993, 41(10): 1474 - 1481.
- [4] C R Lin, M Gerla. Adaptive clustering for mobile wireless networks [J]. IEEE J. Select. Areas Commun., 1997, 15(7): 1265 - 1275.
- [5] W Chen, N Jain, S Singh. ANMP: ad hoc network management protocol [J]. IEEE J. Select. Areas Commun., 1999, 17(8): 1506 - 1531.
- [6] C R Lin, M Gerla. Real-time support in multihop wireless network [J]. ACM/Baltzer J. Wireless Networks, 1999, 5(2): 125 - 135.
- [7] C -C Chiang, H - K Wu, W Liu, M Gerla. Routing in clustered multihop, mobile wireless network with fading channel [A]. Proc. IEEE SICON '97 [C], Singapore, 1997: 197 - 211.
- [8] 刘凯, 李建东. 使用并行接收的多跳自组织无线网络协议 [J]. 电子学报, 2000, 28(5): 138 - 141.
- [9] 刘凯, 李建东, 章欣. 多跳移动分组无线网络的吞吐率分析 [J]. 西安电子科技大学学报, 2000, 27(1): 70 - 75.
- [10] IEEE Standard for Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications [S]. IEEE Standard 802.11, 1997.

### 作者简介:



刘凯 男, 1973 年生于山西孝义县, 分别于 1994 年和 1997 年在西安电子科技大学获得工学学士和工学硕士学位, 现在该校攻读通信与信息系统博士学位, IEEE 学生会员, 主要的研究领域包括无线个人通信、移动通信网、分组无线网络、无线局域网、分布式无线网络。Email: luck.luke@usa.net



李建东 男, 1962 年生, 西安电子科技大学教授、博士生导师、通信工程学院院长、中国通信学会会士、中国电子学会高级会员、IEEE 高级会员、第一届和第四届 863 个人通信技术专业专家组成员。主要的研究领域包括个人通信、移动通信、分组无线网络、分布式无线网络、软件无线电和移动 IP 等方面。