

自组网中一种多层无中心分级结构

吴 静¹ 顾国昌¹ 侯国照² 孙 亭^{3,4}

(哈尔滨工程大学计算机科学与技术学院 哈尔滨 150001)¹

(中国人民解放军陆军航空兵学院 北京 101123)²

(中国电子科技集团公司二十八研究所 南京 210007)³ (中兴软件技术(南昌)有限公司 南昌 330096)⁴

摘 要 为了能更好地解决自组网的可扩展问题,在一层分级结构的基础上引入了多层分级结构。针对多层分级结构中存在的结构稳定性差和结构维护开销大等问题,提出一种多层无中心分级结构。它采用无中心策略,结构依赖于一些相对稳定的群,以提高结构的稳定性;它采用一种新型编址方案,可以避免群首轮换引起的节点分级地址的频繁变更,这有利于降低结构维护开销。从理论和仿真两方面对两种结构的性能进行了比较分析,结论表明多层无中心分级结构在结构稳定性和结构维护开销等性能指标上都优于目前的多层分级结构。

关键词 自组网,分级结构,多层分级结构,稳定性,编址方案

中图法分类号 TP393 **文献标识码** A

Multi-layer Centerless Hierarchical Structure in Ad Hoc Networks

WU Jing¹ GU Guo-chang¹ HOU Guo-zhao² SUN Ting^{3,4}

(College of Computer Science and Technology, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)¹

(Army Aviation Institution of PLA, Beijing 101123, China)²

(No. 28 Research Institute, China Electronics Technology Group Corporation, Nanjing 210007, China)³

(ZTE Software Technology (Nanchang) Ltd, Nanchang 330096, China)⁴

Abstract Based on the one-layer hierarchical structure, a multi-layer hierarchical structure was introduced to solve the scalability problem in ad hoc networks better. Aiming at the problems in this structure such as poor structure stability and large structure maintenance overheads, a multi-layer centerless hierarchical structure was proposed. It adopts a centerless scheme, and the structure depends on some relatively stable clusters, which will make the structure stabler. To reduce structure maintenance overheads, a new addressing scheme was adopted, which can avoid the frequent alterations of a node's hierarchical ID caused by a clusterhead's change. Both theoretical analysis and simulative analysis were made to compare the two structures' performance. The conclusion shows that multi-layer centerless hierarchical structure outperforms the current multi-layer hierarchical structure on structure stability and structure maintenance overheads.

Keywords Ad hoc networks, Hierarchical structure, Multi-layer hierarchical structure, Stability, Addressing scheme

1 引言

目前,分级结构^[1]已经成为自组网可扩展问题的解决方案,它包括一层分级结构^[1-4]和多层分级结构^[5-7]。一层分级结构在群间采用的平面结构仍存在可扩展问题,故引入了多层分级结构。

由于多层分级结构是依赖于各层群首的,故本文将它称为多层有中心分级结构 MCHS(Multi-layer Center Hierarchical Structure)。为了更好地描述群结构,本文研究的 MCHS 需要满足两个条件:(a)对于群中的任意两节点之间的距离 d

$(i, j) \leq 2$; (b) $C_i \cap C_j = \Phi (i \neq j)$, 即群之间是不交叠的。在 MCHS 中,底层选出的群首成为高一层群的成员,高一层群的成员又选出新的群首,成为新的群。如此反复,形成一个如图 1 所示的 MCHS。在 MCHS 中,每个节点都具有一个动态的分级地址 HID(Hierarchical ID)。HID 反映节点的层次拓扑信息,它是指从次高层群首到节点本身的层次化路径上的节点 ID(MAC 地址)序列。各个群首之间协调动态维护整个网络的层次结构,从上层看来,更低层群的拓扑信息被其群首所隐藏。由于区域内的节点信息交换不会扩展到整体网络中,局部的拓扑变化也不会影响整体网络,这在很大程度上简

到稿日期:2009-05-06 返修日期:2009-07-20 本文受国家发改委支持中国下一代网络示范工程(engi-04-17-2a)项目资助。

吴 静(1980-),女,博士生,主要研究方向为移动自组网,E-mail:99061632@163.com;顾国昌(1946-),男,教授,博士生导师,主要研究方向为移动自组网、嵌入式系统等;侯国照(1980-),男,讲师,主要研究方向为移动计算技术、移动自组网;孙 亭(1980-),博士,主要研究方向为传感器网络。

在这两个事件中所有节点 HID 总体变更的次数分别为 χ_4 和 χ_5 , 则在这两个事件中所有节点 HID 总体变更的频率分别为 $\psi_4 = \chi_4/T$ 和 $\psi_5 = \chi_5/T$, 在这两个事件中每个节点 HID 变更的平均频率分别为 $\psi_4' = \psi_4/N$ 和 $\psi_5' = \psi_5/N$, 在所有事件中每个节点 HID 变更的平均频率 $\psi'_{TOTAL-MCLHS}$ 可表示为

$$\psi'_{TOTAL-MCLHS} = \psi_4' + \psi_5' \quad (2)$$

在同样的场景中, 按照同样的结构维护策略, MCLHS 和 MCHS 的隶属关系变更和局部重新分群的情况是相同的, 故存在如下关系:

$$\psi_4' = \psi_1' \quad (3)$$

$$\psi_5' = \psi_2' \quad (4)$$

由式(1)~式(4)可得出

$$\psi'_{TOTAL-MCHS} - \psi'_{TOTAL-MCLHS} = (\psi_1' + \psi_2' + \psi_3') - (\psi_4' + \psi_5') = \psi_3' \quad (5)$$

由式(5)可知 $\psi'_{TOTAL-MCHS} - \psi'_{TOTAL-MCLHS} > 0$, 即 $\psi'_{TOTAL-MCHS} > \psi'_{TOTAL-MCLHS}$ 。

由上述结论可知, MCHS 比 MCLHS 的节点 HID 变更的平均频率高, 这说明 MCLHS 比 MCHS 的稳定性高。

至此, 已经完成对 MCHS 与 MCLHS 稳定性的比较分析。下面提出了一种定量计算 ψ_3' 的方法, 具体描述如定理 1 所述。

定理 1 在 MCHS 的群首轮换事件中, 每个节点 HID 变更的平均频率等于除最高层之外所有层的群首变更的平均频率之和。

证明: 首先, 设置一个算子 Θ , 它的含义描述如定义 1 所示。

定义 1(算子 Θ) $g(x) = \Theta(f(x))$ 表示 $\exists a > 0, \exists b > 0, \exists x_0$, 对于 $\forall x > x_0$, 满足 $0 \leq a \cdot f(x) \leq g(x) \leq b \cdot f(x)$ 。

在 MCHS 中, 设网络节点总数为 N , 分级结构为 H 层, 则平均群大小 $s' = \Theta(\sqrt[H]{N})$ 。由此可知, 第 i 层每个群首影响的平均节点数目 $n'_i = (s')^i = (\Theta(\sqrt[H]{N}))^i$, 第 i 层的平均群首数目 $m'_i = N/n'_i = N/(\Theta(\sqrt[H]{N}))^i$ 。设第 i 层每个群首变更的平均频率为 f'_i , 则在时间范围 T 内, 在这群首轮换事件中所有节点 HID 总体变更的次数 χ_3 可以表示为

$$\begin{aligned} \chi_3 &= \sum_{i=1}^{H-1} (n'_i \cdot f'_i \cdot T \cdot m'_i) = \sum_{i=1}^{H-1} [(\Theta(\sqrt[H]{N}))^i \cdot f'_i \cdot T \\ &\quad \cdot \frac{N}{(\Theta(\sqrt[H]{N}))^i}] \\ &= \sum_{i=1}^{H-1} (f'_i \cdot T \cdot N) = T \cdot N \cdot \sum_{i=1}^{H-1} f'_i \end{aligned} \quad (6)$$

由式(6)可推导出 ψ_3' 的表达式为

$$\begin{aligned} \psi_3' &= \chi_3/T = (\sum_{i=1}^{H-1} f'_i \cdot T \cdot N) / T = \sum_{i=1}^{H-1} f'_i \cdot N \\ &= \sum_{i=1}^{H-1} f'_i \end{aligned} \quad (7)$$

由式(7)可知 ψ_3' 等于除最高层外所有层的群首变更的平均频率之和。至此定理 1 证毕。

3.2 结构维护开销的比较分析

本文的结构维护开销指的是结构构建和维护的总体开销。在时间范围 T 内, 设 MCHS 网络的结构构建和维护开销分别为 ϕ_{C-MCHS} 和 ϕ_{M-MCHS} , 则其总体开销为 $\phi_{T-MCHS} = \phi_{C-MCHS} + \phi_{M-MCHS}$; 设 MCLHS 网络的结构构建和维护开销分别为 $\phi_{C-MCLHS}$ 和 $\phi_{M-MCLHS}$, 则其总体开销为 $\phi_{T-MCLHS} = \phi_{C-MCLHS} + \phi_{M-MCLHS}$ 。

ϕ_{M-MCHS} 由链路信息交换开销、群首选举相关开销、隶属关系变更开销和局部重新建群开销组成^[8]。设这 4 种事件在第 i 层上执行一次的平均开销分别为 $\phi_{i1}', \phi_{i2}', \phi_{i3}', \phi_{i4}'$, 在时间范围 T 内, 设这 4 种事件在第 i 层上执行次数分别为 $n_{i1}, n_{i2}, n_{i3}, n_{i4}$, 则 ϕ_{M-MCHS} 可表示为

$$\phi_{M-MCHS} = \sum_{i=1}^H (n_{i1} \phi_{i1}' + n_{i2} \phi_{i2}' + n_{i3} \phi_{i3}' + n_{i4} \phi_{i4}') \quad (8)$$

$\phi_{M-MCLHS}$ 由链路信息交换开销、群代表选举相关开销、隶属关系变更开销和局部重新建群开销组成。设这 4 种事件在第 i 层上执行一次的平均开销分别为 $\phi_{i5}', \phi_{i6}', \phi_{i7}', \phi_{i8}'$, 在时间范围 T 内, 设这 4 种事件在第 i 层上执行次数分别为 $n_{i5}, n_{i6}, n_{i7}, n_{i8}$, 则 $\phi_{M-MCLHS}$ 可表示为

$$\phi_{M-MCLHS} = \sum_{i=1}^H (n_{i5} \phi_{i5}' + n_{i6} \phi_{i6}' + n_{i7} \phi_{i7}' + n_{i8} \phi_{i8}') \quad (9)$$

下面将 ϕ_{M-MCHS} 和 $\phi_{M-MCLHS}$ 的相应项进行逐一比较。

3.2.1 链接信息交换开销的比较

在 MCHS 中, 链接信息交换开销是指底层群成员之间和邻群网关之间交换的物理链路信息开销, 以及高层群的节点成员之间和高层邻群网关之间交换的虚拟链路信息开销。

在 MCLHS 中, 链接信息交换开销是指底层群成员之间和邻群网关之间交换的物理链路信息开销, 以及高层群的群成员代表之间和高层邻群的网关群代表之间交换的虚拟链路信息开销。

因为两种结构链路信息交换情况近似, 故可知 $n_{i1} \approx n_{i5}$; 又因为 MCLHS 比 MCHS 的编址稍长, 故可知 $\phi_{i1}' < \phi_{i5}'$ 。由上述分析可知 $n_{i1} \phi_{i1}' < n_{i5} \phi_{i5}'$ 。

3.2.2 群首选举与群代表选举相关开销的比较

群首选举的相关开销 $P1$ 包括群首选举开销 $a1$ 、通知相关节点变更 HID 的开销 $b1$ 和节点通知移动管理代理更新节点定位信息的开销 $c1$; 群代表选举的相关开销 $P2$ 包括群代表选举开销 $a2$ 以及通知底层群内节点成员或高层群成员代表更新群代表信息的开销 $b2$ 。因为 $a1 \approx a2, b1 > b2$, 由此可知 $P1 > P2$, 进而可知 $\phi_{i2}' > \phi_{i6}'$ 。又因为 $n_{i2} \approx n_{i6}$, 故可得 $n_{i2} \phi_{i2}' > n_{i6} \phi_{i6}'$ 。

3.2.3 隶属关系变更开销的比较

在同样的场景中, 按照同样的结构维护策略, MCLHS 和 MCHS 的隶属关系变更的情况是相同的, 因此可知 $n_{i3} = n_{i7}$ 。又因为 $\phi_{i3}' < \phi_{i7}'$, 故可得 $n_{i3} \phi_{i3}' < n_{i7} \phi_{i7}'$ 。

3.2.4 局部重新建群开销的比较

在同样的场景中, MCLHS 和 MCHS 的局部重新建群的情况是相同的, 故可知 $n_{i4} = n_{i8}$ 。又因为 $\phi_{i4}' < \phi_{i8}'$, 所以可得 $n_{i4} \phi_{i4}' < n_{i8} \phi_{i8}'$ 。

结合式(8)、式(9)和上述逐项比较的结果可知,

$$\begin{aligned} \phi_{M-MCHS} - \phi_{M-MCLHS} &= \sum_{i=1}^H n_{i2} (\phi_{i2}' - \phi_{i6}') - \sum_{i=1}^H n_{i1} (\phi_{i5}' - \phi_{i1}') - \\ &\quad \sum_{i=1}^H n_{i3} (\phi_{i7}' - \phi_{i3}') - \sum_{i=1}^H n_{i4} (\phi_{i8}' - \phi_{i4}') \end{aligned} \quad (10)$$

由于 MCHS 和 MCLHS 的构建开销 ϕ_{C-MCHS} 和 $\phi_{C-MCLHS}$ 可以分别表示为 ϕ_{H4}' 和 ϕ_{H8}' , 故结合式(10)可得出 MCHS 与 MCLHS 的结构维护开销差为

$$\begin{aligned} \phi_{T-MCHS} - \phi_{T-MCLHS} &= (\phi_{M-MCHS} - \phi_{M-MCLHS}) + (\phi_{C-MCHS} - \\ &\quad \phi_{C-MCLHS}) \\ &= \sum_{i=1}^H n_{i2} (\phi_{i2}' - \phi_{i6}') - \sum_{i=1}^H n_{i1} (\phi_{i5}' - \phi_{i1}') - \end{aligned}$$

$$\sum_{i=1}^H n_{i3} (\phi_{i7}' - \phi_{i3}') - \sum_{i=1}^H n_{i4} (\phi_{i8}' - \phi_{i4}') - (\phi_{H8}' - \phi_{H4}') \quad (11)$$

在高层群中,群成员间相互连接的概率大,群间拓扑比较稳定。由此可知,链路信息更新频率、隶属关系变更频率和局部重新分群频率在高层群中都比较低。由于群首和群代表负载过重,能量消耗过快,因此群首和高层群代表轮换频率相当高。由上述分析可知存在关系 $n_{i2} \gg n_{i1}, n_{i2} \gg n_{i3}, n_{i2} \gg n_{i4}$ 。又因为 $\phi_{i2}' - \phi_{i6}'$ 比 $\phi_{i5}' - \phi_{i1}'$, $\phi_{i7}' - \phi_{i3}'$ 和 $\phi_{i8}' - \phi_{i4}'$ 都大,故结合式(11)可得 $\phi_{T-MCHS} - \phi_{T-MCLHS} > 0$, 即 $\phi_{T-MCHS} > \phi_{T-MCLHS}$ 。

4 结构性能的仿真比较分析

本文采用 OPNET10.0 仿真软件分析 MHS 和 SMHS 的稳定性和维护开销等性能指标,用节点 HID 变更的平均频率来评测结构的稳定性。仿真所用参数描述如下:物理区域为 $1000 \times 1000m^2$, 仿真时间为 600s, 传输范围分别取 150, 160, 170, 180, 190, 200m, 移动模型为 Random Way Point 模型, 暂停时间为 5s, 最小速度为 0, 最大速度分别取 1, 5, 10, 15, 20, 25 m/s, 网络节点数目为 100 个, MAC 协议为 IEEE802.11。

在保持网络环境的其它参数不变的情况下,通过改变节点最大速度(此时传输范围取 150m)来分别评测节点 HID 变更的平均频率和结构维护开销的仿真结果分别如图 3 和图 4 所示,通过改变传输范围(此时最大速度取 10m/s)来分别评测节点 HID 变更的平均频率和结构维护开销的仿真结果分别如图 5 和图 6 所示。

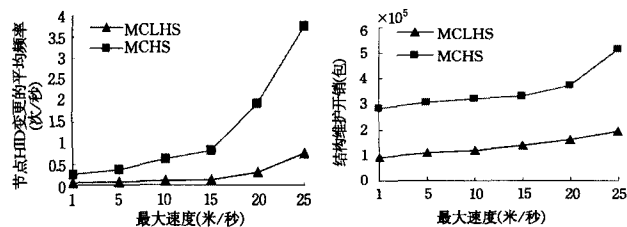


图 3 最大速度对节点 HID 变更的平均频率的影响

图 4 最大速度对结构维护开销的影响

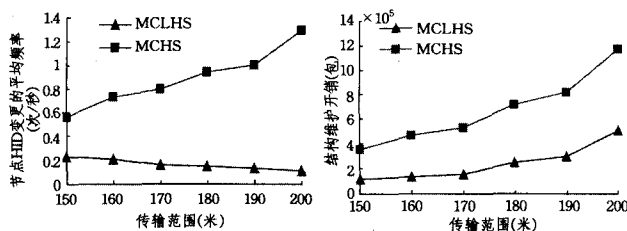


图 5 传输范围对节点 HID 变更的平均频率的影响

图 6 传输范围对结构维护开销的影响

从图 3 和图 5 可以看出, MCLHS 比 MCHS 的节点 HID 变更的平均频率低, 这是因为: 由于 MCHS 的隶属关系变更、群首轮换和局部重新分群等事件都会引起节点 HID 的变更, 而 MCLHS 的隶属关系变更和局部重新分群等事件会引起节

点 HID 变更, 而且 MCLHS 与 MCHS 的隶属关系变更和局部重新分群的情况相同, 因此 MCLHS 的节点 HID 变更的平均频率比 MCHS 的低。

从图 4 和图 6 可以看出, MCLHS 比 MCHS 的结构维护开销低, 这是因为: 虽然 MCLHS 的节点编址稍长, 会增加一些结构维护开销, 但是 MCLHS 的群代表轮换不会改变节点 HID, 可以避免 MCHS 中群首轮换引起的节点 HID 变更的相关开销。相比而言, MCLHS 节省的开销要远大于它所增加的开销, 所以 MCLHS 比 MCHS 的结构维护开销低。

由仿真结果可知, MCLHS 比 MCHS 具有更高的结构稳定性和较低的结构维护开销, 这与理论分析的结果是一致的。

结束语 本文针对 MCHS 存在的结构稳定性差和结构维护开销大等问题, 提出一种采用无中心策略的 MCLHS。MCHS 依赖一些易于变化的中心节点, 而 MCLHS 依赖一些相对稳定的群, 这增强了结构的稳定性; MCHS 的节点 HID 随着各层群首的轮换而频繁地变更, 而 MCLHS 采用一种新型编址方案, 其节点 HID 不会随着各层群代表的轮换而变更, 这降低了结构维护开销。本文从理论和仿真上对两种结构的性能进行了分析, 结果表明 MCLHS 比 MCHS 具有较高的结构稳定性和较低的结构维护开销。总体来说, MCLHS 的结构性能优于 MCHS。

参考文献

- [1] 郑全全, 等. 无线自组网技术实用教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 116-118, 123-132
- [2] Mahdy A M, Deogun J S. Stable and Fair MANETs: A Scalable Multi-measure Clustering Framework[C] // Seventh International Conference on Networking, 2008: 131-136
- [3] Zou Likun, Zhang Qishan, Liu Jianwei. An Improved Weight-based Clustering Algorithm in MANETs[J]. Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, 2008: 1-4
- [4] Rangaswamy A, Pung Hung Keng. Enhancement of Passive Cluster based Routing Protocol for Mobile Ad hoc Networks[C] // Eleventh International Conference on Computer Communications and Networks Proceedings, 2002: 376-381
- [5] Pei Guangyu, Gerla M, Hong Xiaoyan, et al. A Wireless Hierarchical Routing Protocol with Group Mobility[C] // IEEE Wireless Communication and Networking Conference, 1999, 3: 1538-1542
- [6] Pang Kong Ling, Qin Yang. The comparison study of flat routing and hierarchical routing in ad hoc wireless networks[C] // 14th IEEE International Conference on Networks, 2006, 1: 1-6
- [7] 于宏毅, 等. 无线移动自组织网[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2005: 216-220
- [8] Sucec J, Marsic I. Hierarchical Routing Overhead in Mobile Ad Hoc Networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2004, 3(1): 46-56