

无线自组网簇间网关支配集优化策略

吴迪^{1,2}, 梁辉¹, 王光兴³

(1. 大连理工大学电子与信息工程学院, 大连 116024; 2. 中航一集团沈阳飞机设计研究所, 沈阳 110035;

3. 东北大学网络与通信中心, 沈阳 110004)

摘要: 无线自组网的网关负责簇间信息的转发。逻辑上能和其他簇内节点通信的节点都可以做网关, 这些节点相对于簇首节点称为网关支配集。为了减少网关支配集中的冗余网关, 给出一种以节点唯一标识权值比较实现优化网关支配集的策略, 可以消除簇间的冗余网关, 使相交簇间仅存在一个网关, 而相邻簇间仅存在一对网关。仿真结果表明, 在保证网络连通的情况下, 该策略可以有效地减少重播包的比率和广播延时。

关键词: 无线自组网; 网关; 网关支配集

Cluster Gateway Dominating Set Optimization Strategy in Wireless Ad Hoc Network

WU Di^{1,2}, LIANG Hui¹, WANG Guang-xing³

(1. School of Electronic and Information Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024;

2. Shenyang Aircraft Design & Research Institute, China Aviation Industry Corporation I, Shenyang 110035;

3. Research Center for Network & Communication, Northeastern University, Shenyang 110004)

【Abstract】 In the Ad hoc network cluster, the gateway is responsible for forwarding message. The node that can logically communicate with the nodes in other clusters has the ability to be gateway, and the set of these nodes is defined as gateway dominating set relative to cluster-head. In order to reduce the redundant gateways in the set, this paper presents a strategy of optimizing gateway dominating set by comparing the exclusive id of each node. However, there is only one gateway in the intersecting cluster and there is a couple of gateways in the neighborhood clusters. Simulation results show that the method can save the broadcast packets and reduce broadcast delay effectively in the case of guaranteeing the network connectivity.

【Key words】 wireless ad hoc network; gateway; gateway dominating set

1 相关背景介绍

无线自组网是一种多跳自组织网络, 可以用无向图 $G=(V, E)$ 来表示, V 是节点的集合, E 是边的集合, 这里假设 G 是连通的。由于无线自组网自身存在能量和带宽上的限制, 为了提高网络性能, 一种办法就是将网络划分为簇。在有簇首的分簇结构中, 簇由簇首、网关和成员节点组成。簇首作为簇存在标志, 负责协调和管理簇内成员间的通信; 网关是能连接多个簇的节点, 负责簇间的信息转发。

在分簇结构下, 簇间的相对位置存在 3 种情况(只考虑 1 跳簇的情况): (1) 相交, 两簇的簇首间 2 跳可达, 如图 1 中簇 B 和簇 C ; (2) 相邻, 两簇的簇首间 3 跳可达, 如图 1 中簇 A 和簇 B ; (3) 其他, 这种情况下两簇需要经过中继簇来通信, 这里不作考虑, 所有簇间的相对位置仅指前 2 种情况。逻辑上能够和其他簇内节点通信的节点都可以做网关, 而任意 2 个相交或相邻簇间只需要一个或一对网关即可保证簇间是连通的。在保证簇间连通的前提下, 网关的数量越少, 参与广播的节点数就越少, 广播量和广播等待时间就相对减少^[1]。对于相交簇, 网关可以从簇间重叠区域内选择, 文献[2]中给出此情况下网关的选举策略: 两相交簇的所有候选网关内, 节点标识是 2 跳邻居中最小的节点做网关, 但其没有考虑簇间的相邻情况。相邻时, 此方法将不再适用, 如图 1 中, 节点 a

和节点 b 是连接簇 A 和簇 B 的网关中标识最小的, 但 a, b 间是不能连接通信的。在文献[3-5]中提出了用分布式网关的形成来实现连接, 但是这种方式选择的网关数量较难确定, 存在冗余网关。

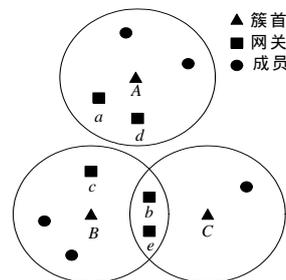


图1 簇间的相对位置

本文给出一种网关支配集优化策略, 消除簇间的冗余网关, 使相交簇间仅存在一个网关, 而相邻簇间仅存在一对网

基金项目: 国家“863”计划基金资助项目(2005AA726025)

作者简介: 吴迪(1972-), 男, 副教授、博士后, 主研方向: 计算机网络和网络管理; 梁辉, 硕士研究生; 王光兴, 教授、博士生导师

收稿日期: 2006-12-25 **E-mail:** wudi@dlut.edu.cn

关。为了突出研究的重点，文中讨论的内容均以下述假设为前提：网络是连通的；不管节点采用何种链路接入方式^[6]，网络连接总是有效的^[7]；簇内节点间总是可以通信的，簇间可以通过网关进行通信；节点的通信范围都为 r ，即不存在单向链路；簇由现有分簇算法^[8]产生。

2 网关支配集优化算法

无向连通图 $G=(V, E)$ 在划分为簇后，可表示为加权无向连通图 $G=(C, E, F)$ ，如图 2 所示。 C 为簇的集合，分别由簇首集合 CH 、网关集合 GW 和成员节点集合 MB 组成，即 $C=CH \cup GW \cup MB$ ； E 为边的集合，表示为

$$E = \{(v_i, v_j) | v_i, v_j \in C, d(v_i, v_j) \leq r\}$$

其中， $d(v_i, v_j)$ 为节点 v_i, v_j 间的距离。 F 是定义域为 C 的函数， $F=f(c)$ ， $c \in C$ ，作用是使每个节点具有 3 个属性：节点标识 id ，状态 $state$ 和所属簇标识 cid (用簇首 id 来表示)。 $id \in ID$ ， $ID = \{id | 0 < id < |V| \wedge id \text{ 唯一}\}$ ， $state \in STATE$ ， $STATE = \{ch, gw, mb\}$ 。加权后的各节点表示为 $state_{id}^{cid}$ 。本文研究的是簇首和网关间的关系，即图 $G=(C, E, F)$ 的子图 $G'=(C', E', F')$ ， $C'=CH \cup GW$ 中各节点间的关系，如图 3 所示。

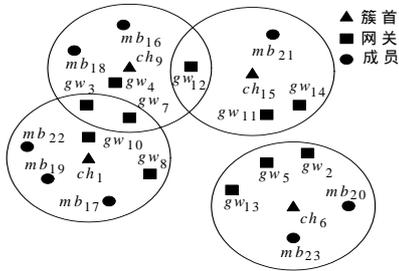


图 2 簇拓扑图

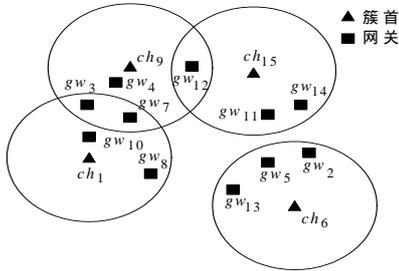


图 3 由簇首和网关组成的子图

定义 1 网关节点的集合可以表示为

$$GW = \{state_i^j | \exists state_m^n \in V \setminus (n \neq j) \text{ st. } (state_i^j, state_m^n) \in E'\}$$

定义 2 在定义 1 中，若 $state_m^n \in CH$ ，则称 $state_i^j$ 和 $state_m^n$ 相交连接， $state_i^j$ 为相交连接方式网关；若 $state_m^n \in GW$ ，则称 $state_i^j$ 和 $state_m^n$ 相邻连接， $state_i^j$ 为相邻连接方式网关。

根据定义 1 和定义 2，相对于不同的 2 个簇，网关节点连接方式会不同，如图 1 中的网关 b 。在簇 B 和簇 C 中，网关 b 为相交连接方式，在簇 A 和簇 B 中，网关 b 为相邻连接方式。

定义 3 相交连接方式的网关和与其连接的 2 个簇首组成的连通分支称为相交连接分支，表示为 $(ch_i, gw_{id}^{(i,j)}, ch_j)$ ；相邻连接方式的网关和与其连接的簇首与网关组成的连通分支称为相邻连接分支，表示为 $(ch_i, gw_{id}^i, gw_k^j)$ 。

定义 4 在图 $G'=(C', E', F')$ 中， $GW \subset C'$ ，对于任意 $ch_i \in C' - GW$ ，存在 $gw_j \in GW$ 使得 $(ch_i, gw_j) \in E'$ ， GW 满足支配集的定义，称 GW 为网关支配集 $GWDS$ 。

C' 是图 G 的一个连通支配集，当 C' 为最小连通支配集时广播开销最小，但在一般的图中求解最小连通支配集是一个 NP 完全问题^[9]。在簇形成后 CH 中的节点个数是确定的，因此，在保证 C' 连通的情况下，使 GW 中节点数越少，即可达到优化连通支配集、减少广播开销的目的。这里给出一种对节点加权，通过节点的标识权值比较来优化网关支配集的算法，保证在任意两相交或相邻簇间存在网关连接的前提下，集合 $GWDS$ 是最小的。

2.1 过程描述

(1) 初始 GW 中的节点都已获取 2 跳邻居节点的节点属性和连接分支， $GWDS = \emptyset$ 。

(2) GW 中的节点 gw_{id} 在本地执行如下比较：

1) 当 gw_{id} 含有相交连接分支 $(ch_i, gw_{id}^{(i,j)}, ch_j)$ 时，若在 gw_{id} 的 2 跳邻居节点内， gw_{id} 是连接 ch_i 和 ch_j 的所有节点中 id 值最大的，将 gw_{id} 加入 $GWDS$ ，结束比较；否则，继续 2)。

2) 当 gw_{id} 含有相邻连接分支 $(ch_i, gw_{id}^i, gw_k^j)$ 时，若在 gw_{id} 的 2 跳邻居节点内， gw_{id} 的 $id+k$ 值是连接簇 i 和簇 j 的所有节点中最大的，结束比较。当存在另一网关的相邻连接分支 (ch_i, gw_m^i, gw_l^j) 的 $m+l$ 值与 $id+k$ 相等、同为最大值时，若 $id \times k$ 大于 $m \times l$ ，将 gw_{id} 加入 $GWDS$ ，结束比较。

(3) 在结合 GW 中消去不在 $GWDS$ 集合内的网关节点。

图 3 中各网关节点在执行算法后的结果如图 4 所示。网关 gw_7 含有相交连接分支，其 id 是 2 跳邻居内最大的， gw_7 被保留；在相邻连接分支 $(ch_6, gw_5^6, gw_{11}^{15})$ 和 $(ch_6, gw_2^6, gw_{14}^{15})$ 中，由于 gw_5^6 和 gw_{11}^{15} 的 id 加和与 gw_2^6 和 gw_{14}^{15} 的 id 加和相等，因此需要进一步比较 id 乘积，最终 gw_5^6 和 gw_{11}^{15} 被保留。

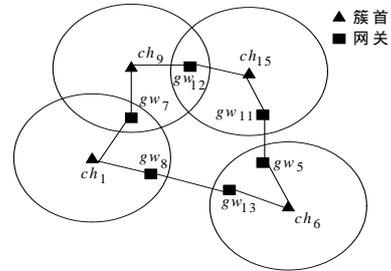


图 4 算法完成后网络拓扑结构

2.2 相关定理

定理 1 算法完成后，两相交簇间仅存在唯一网关，两相邻簇间存在唯一一对网关。

证明：(1) 因为簇内任意节点是 2 跳可达的，所以任意簇内任意两网关间必然存在 id 值的比较，由于 id 值是唯一的，因此产生的网关也是唯一的。(2) 假设两相邻簇 A, B 间存在 2 对网关 (a, b) 和 (c, d) ，网关 a 、网关 c 属于簇 A ，网关 b 、网关 d 属于簇 B 。同簇内的节点会进行 id 比较，首先进行 $a+b$ 和 $c+d$ 的比较，若两值不相等，必然要消去一个，与题设矛盾。若两值相等，要继续比较 $a \times b$ 和 $c \times d$ 。假设：

$$a \times b = c \times d$$

将 $a = c + d - b$ 带入上式得 $(d-b) \times b = (d-b) \times c$ ，因为节点 id 的唯一性，所以消去 $(d-b)$ 得 $b = c$ ，矛盾。因此， $a \times b$ 和 $c \times d$ 唯一确定一对网关。综上，得证。

定理 2 由上述算法优化后网关能够保证簇是连通的。

证明：由定理 1，算法完成后，连通图内任意两簇间总是存在网关来进行连接的，即总是存在簇间的通路，因此，簇是连通的。

定理 3 在保证任意两相交或相邻簇间存在网关连接的前提下，集合 $GWDS$ 是最小的。

证明：由定理 1 得知在图 $G'=(C',E',F)$ 中对于任意簇首节点，集合 $GWDS$ 中总是存在网关与其连接，而且在任意两相交或相邻簇间， $GWDS$ 中存在的网关是唯一的，即在保证任意两相交或相邻簇间存在网关连接的情况下 $GWDS$ 的元素个数是最少的，此时 $GWDS$ 是最小的。

3 算法的实施

无线自组网采用分簇结构后，为了提高信道利用率，簇间常采用不同信道。网关作为簇间的中继节点，工作在不同的信道上。当网关处于多个簇的相交区域内时，如图 5 中的 a，网关的负载和数据收发延时都将增大，反而降低了网络性能^[10]。因此，仅选择一个(对)网关连接一对簇，在图中显示为网关 a 只连接簇首 B 和簇首 C。

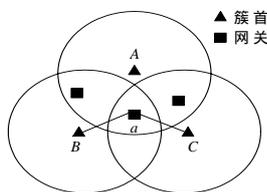


图 5 多簇相交

在分簇算法执行过程中，节点间需要邻居节点信息的交换。上述网关优化算法所需要的 2 跳邻居信息在分簇过程中进行收集。网关节点需要选择所要连接的簇，这种选择可以是随机的，并将选择后的结果以邻居信息发送给邻近节点。为了减少数据传输量，节点只发送自己的最大连接分支信息和相关邻居信息。网关节点在收到 2 跳邻居信息后，本地执行算法。

节点间交换邻居信息可以采用 2 种方式：以单独数据包的形式按一定时间间隔发送，或作为一个网络子层，把邻居信息嵌入其他数据包中发送。

4 仿真

仿真内容包括 2 个方面：(1)考察网关优化算法产生的网关数量；(2)网关优化后对于网络数据广播的影响。仿真环境配置为：地理范围 500 m×500 m，运行时间 120 s，节点传输范围半径为 100 m，移动速度 0 m/s ~10 m/s，采用随机移动模型，分簇算法采用最小 ID 算法，采样节点个数分别为 100, 150, 200。

图 6 为是否采用网关优化算法的比较，优化前网关为簇相交区域内的节点，不考虑簇相邻的情况。图 6 表明，优化后簇间网关的数量明显减少，即使增加了相邻簇间的网关，总的网关数依然较优化前有明显下降。

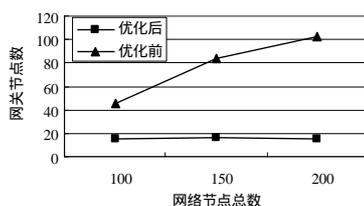


图 6 网关个数比较

图 7 是优化后簇首和网关的个数比较，可知，仿真中簇

首和网关的个数关系在理论上基本一致。图 8 是广播包的节省率 $SFR=(f-s)/f$ (其中， f 是接收到广播分组的节点数； s 是实际发送分组的数量)在网关优化前后的比较。可知，优化后减少了冗余网关和实际发送分组的节点数，节省了广播包。

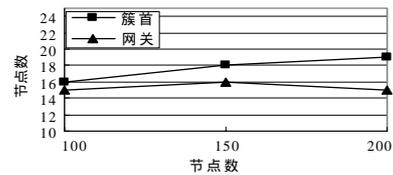


图 7 簇首网关个数比较

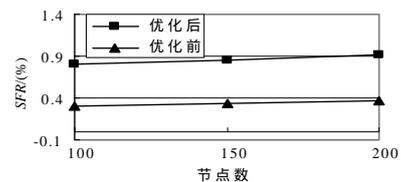


图 8 广播包的节省率比较

图 9 是网关优化前后广播延时。网关优化后，减少了不必要的网关间信道竞争和收发延时；同时增加了相邻簇间的网关后，增加了簇间连通路径，减少了相邻簇间通信的延时。图 9 也说明了优化后广播等待时间有所减少。

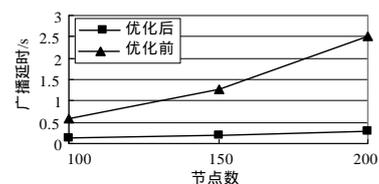


图 9 广播延时比较

5 结束语

通过分析分簇结构下簇间相对位置，本文提出了通过节点的唯一标识权值比较来优化网关支配集的算法，保证在任意两相交或相邻簇间存在网关连接的前提下，网关支配集是最小的。优化后两相交簇间仅存在唯一网关，两相邻簇间存在唯一一对网关。并对此结论进行了理论证明。仿真结果表明，在保证网络连通的情况下，该方法可以有效地减少重播包的比率和广播延时。

参考文献

- [1] Ni S, Tseng Y, Chen Y, et al. The Broadcast Storm Problem in a Mobile Ad Hoc Network[C]//Proceedings of the 5th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking. Seattle, Washington, United States: [s. n.], 1999.
- [2] 赵春晓, 王光兴. 稠密自组网的网关选举策略[J]. 计算机学报, 2005, 28(2): 192-200.
- [3] Gerla M, Kwon T, Pei G. On-demand Routing in Large Ad Hoc Wireless Networks with Passive Clustering[C]//Proc. of Wireless Communications and Networking Conference. Chicago, IL, USA: [s. n.], 2000: 100-105.
- [4] Kwon T J, Gerla M. Efficient Flooding with Passive Clustering (PC) in Ad Hoc Networks[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2002, 32(1): 44-56.
- [5] Gerla M, Tsai J T. Multicluster, Mobile, Multimedia Radio Network[J]. Wireless Networks, 1995, 1(3): 255-265.
- [6] Ephremides A, Wieselthier J E, Baker D J. A Design Concept for Reliable Mobile Radio Networks with Frequency Hopping

(下转第 135 页)