

文章编号:1001-9081(2007)08-1839-03

能量高效的传感器网络虚拟骨干网构造算法

赵仕俊¹, 陈琳², 李晓东²

(1. 北京科技大学 信息工程学院, 北京 100083;

2. 中国石油大学(华东) 石油仪器仪表研究所, 山东 东营 257061)

(chenlin_83@sina.com)

摘 要:提出一种新的可用于无线自组传感器网络路由中的能量高效的虚拟骨干网构造算法。该算法将网络中的节点按照地理距离最近的原则划分为若干簇,簇头与簇成员的距离为 k-hop,增大了簇的规模,减少了通信开销;利用最小连通支配集理论优化簇内结构,选择新的参数作为权值,在保证骨干网规模的同时,优先选择剩余能量高的节点担任骨干节点,均衡了网络的能量消耗,从而延长了网络寿命。仿真结果表明,该算法构造的虚拟骨干网规模较小,对降低路由复杂度、延长传感器网络寿命有较好的效果。

关键词:无线传感器网络;虚拟骨干网;分簇;连通支配集

中图分类号: TP393.02 **文献标志码:** A

Energy-efficient algorithm for virtual backbone construction in wireless sensor network

ZHAO Shi-jun¹, CHEN Lin², LI Xiao-dong²

(1. School of Information Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

2. Institute of Petroleum Instrument, University of Petroleum, Dongying Shandong 257061, China)

Abstract: An energy-efficient algorithm for virtual backbone construction that could be used for Wireless Sensor Network (WSN) routing was proposed. The network nodes were divided into a number of clusters according to the geographical distance between them, the distance of the cluster head and members was k-hop. While the size of cluster was increased, the cost of communication was reduced. Using the smallest connected dominating set theory to optimize within the cluster structure, choosing a new parameter value as a right, making the nodes with higher energy be key nodes while guarantee the size of the network backbone, the energy consumption was balanced, and the life of the network was prolonged. Simulation results show that the algorithm can reduce the network scale and routing complexity, and extend the life of WSN.

Key words: Wireless Sensor Network (WSN); virtual backbone; clustering; connected dominating set

0 引言

无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)是由部署在监测区域内大量的廉价微型传感器节点组成,通过无线通信方式形成的一个多跳的、自组织的网络系统,其目的是协作地感知、采集和处理网络覆盖区域中感知对象的信息,在环境与军事监控、地震与气候预测、地下、深水以及外层空间探索等许多方面都具有广泛的应用前景。

无线传感器网络与传统层次结构的无线网络存在着显著不同。由于无中心控制,这种网络最初的结构是平面式的,在节点数目增多时路由开销很大,可扩展性较差,因此平面式结构不适合无线传感器网络,从而使构造层次型拓扑结构成为必要。而且传感器节点在空闲状态的能量消耗与在接受状态的能量消耗相当,制定恰当的管理策略使网络中的冗余节点从空闲模式转换为睡眠模式将能明显节约能量。在无线传感器网络中,考虑依据一定机制选择某些节点作为骨干网节点,打开其通信模块,并关闭非骨干节点的通信模块,由骨干节点构建一个连通网络来负责数据的路由转发。这样既能保证原

有覆盖范围内的通信,也能在很大程度上节省能量。对于大规模无线多跳的自组织网络,如何求解其虚拟骨干网是目前学术界的一个热点问题。

目前,主要有两种途径从数目众多的节点中选择关键点构造虚拟骨干网:分层选取(即通过分簇算法,在网络中建立分层拓扑结构)和连通支配集选取。研究人员已经提出了大量基于节点 ID、连通度等多种参考因素的分簇算法^[1]。网络使用分簇结构,数据在簇头节点(Cluster Head, CH)进行融合,可以避免大量不必要的重复信息传递,进一步节约能量开销,延长网络寿命。分簇式的拓扑结构有利于分布式算法的应用,适合大规模部署的网络。但是目前提出的分簇算法大多存在以下缺点:由于簇头消耗的能量远大于其他传感器节点,簇头节点的能量会被很快耗尽,所以只有频繁的更换簇头来维持网络连接,加重了网络的负担。多数分簇算法中,簇成员(Cluster Member, CM)都必须与簇头直接通信,这样既限制了簇的规模,又加重了簇头负担,更加快了簇头节点的死亡^[2]。

本文提出一种新的可用于传感器网络路由的能量高效的

收稿日期:2007-02-07;修回日期:2007-04-03。

作者简介:赵仕俊(1957-),男,四川南部人,高级工程师,主要研究方向:自动化装置与智能控制系统、故障诊断与处理; 陈琳(1983-),女,山东广饶人,硕士研究生,主要研究方向:传感器网络; 李晓东(1962-),男,山东东营人,高级工程师,主要研究方向:电子技术应用。

虚拟骨干网构造算法,在分簇的基础上,通过求解连通支配集的方法优化簇内结构。仿真结果表明该算法具有良好的性能,可以有效提高能量的利用。

1 虚拟骨干网系统构造

1.1 系统模型设计

设传感器网络由两类节点组成:1)数据采集节点,负责数据采集,采用普通的传感器节点,能量较小;2)数据传送节点,具有较大的能量和较强的计算与控制功能,负责收集节点采集的数据并将数据融合后传送到基站。

如图1所示,在网络中,传感器节点划分为若干簇,由能力较强、电量充足的数据传送节点担任簇头节点,管理簇内成员节点。簇内成员节点是普通的传感器节点,能量受限、发射距离较小,负责采集监测区域内数据。簇头节点是基站的服务代理,当基站发出任务查询命令,由各个簇头节点向每个簇内成员节点转发查询命令。簇内成员节点接收到来自簇头的查询命令,将采集的数据通过簇内骨干网转发给簇头,由簇头节点对采集的数据进行簇级的数据融合。簇头节点的能量受限小,可以进行长距离通信,经过处理的监测数据,由簇头节点直接传输给基站,在基站进行系统级的数据融合,从而得到整个监测区域的情况^[3]。

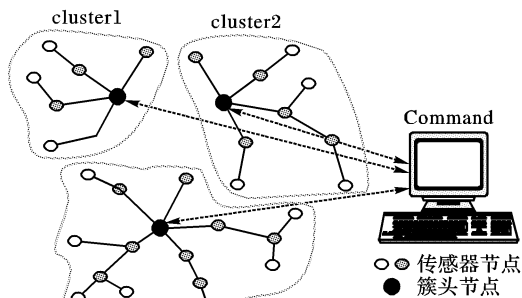


图1 基于虚拟骨干网的无线传感器网络系统结构

1.2 符号描述

文献[4]中从集合论的观点描述了网络簇组织结构问题的定义、性质和基本问题域,本文沿用这种描述方法并进一步扩展,对本文提出的虚拟骨干网网络结构进行了符号描述。

定义1 无线传感器网络可以用一个连通图 $G = (V, E)$ 表示,其中: V 是一组节点的集合,每个节点表示一个传感器节点; E 是一组边的集合, $R(s_i)$ 表示节点 s_i 的传输半径,每条边 $e = (s_i, s_j) \in E$ (其中, $s_i, s_j \in V$) 表示 $d(s_i, s_j) \leq R(s_i)$ 。

定义2 定义 H 为簇头节点集合,记簇头为 $h_i, h_i \in H, H \subset V$ 。定义 $h(s_i)$ 为节点 s_i 的簇头, $\forall s_j \in \{V - H\}, \exists h_i \in H$, 使得 $h(s_j) = h_i$ 。

定义3 定义 h_i 的簇成员集合为 $M(h_i), \cup_{h_i \in H} M(h_i) = V - H$ 。对于 $s_j \in \{V - H\}$, 如果 $d(s_j, h_i)$ 小于 s_j 到其他簇头的距离,则 $s_j \in M(h_i)$ 。

定义4 定义 $C(h_i) = \{h_i, M(h_i)\}$ 为簇头 h_i 所在簇中所有节点的集合, $\cup_{h_i \in H} C(h_i) = V$ 。

定义5 定义 $N(s_i) = \{s_j \mid d(s_i, s_j) \leq R(s_i), s_j \in C(h(s_j)), i \neq j\}$ 为节点 s_i 的邻居节点的集合。

定义6 在任意一个簇 $C(h_i)$ 中,存在一个节点集合 $D(h_i)$,使得 $\forall s_k \in \{C(h_i) - D(h_i)\}, \exists s_j \in D(h_i)$, 使 $s_j \in N(s_k)$, 则 $D(h_i)$ 定义为 $C(h_i)$ 的支配集。

定义7 定义 VB 为骨干节点集合, $VB = \cup_{h_i \in H} D(h_i)$ 。

定义8 定义 $G_{h_i}' = G[D(h_i)]$ 为 $D(h_i)$ 诱导的子图, G_{h_i}' 是连通图。

在上述定义的基础上,我们定义本文算法得到的骨干网的基本问题域如下:

定义9 $\forall C(h_i), \exists h_i \in C(h_i)$ 且唯一,即对于任何一个簇,其簇首唯一。

定义10 $\forall s_j$, 有且仅有一个 $C(h_i)$, 使 $s_j \in C(h_i)$, 即任何一个节点属于且仅属于一个簇。

定义11 $\forall h_i, \exists D(h_i)$, 使 $h_i \in D(h_i)$ 。

2 算法的详细描述

本算法分为三个阶段:1)分簇算法主要负责将网络拓扑划分为若干簇,由能量受限小的数据传送节点担任簇头节点,其他普通节点按照欧氏距离最短原则选择簇头,加入簇头所在的簇;2)调整簇头的发射半径,减轻簇头的负担;3)在每个簇内应用连通支配集算法,以簇头为源节点构造连通支配集。

2.1 分簇算法

分簇算法的具体步骤如下:

1)声明簇头。由于数据传送节点有较大的能量,它们充当簇头可以维持较长的时间,避免重复替换,有利于网络拓扑结构的稳定性。因此,在初始阶段,所有数据传送节点向网络中各数据采集节点以泛洪的方式广播一个请求帧,其中包括它的 id 和位置信息(在该算法中,假定每个节点的位置已由 GPS 或其他方法获得),声明成为簇头节点。在每个数据采集节点中,存有一张拓扑结构表,用来记录与节点相关的拓扑结构,包括节点的位置、簇头的位置列表、网络中簇头的个数、节点与簇头的距离、节点所属簇头的 id、簇成员的 id 列表等。各数据采集节点接收到声明簇头信息并将其存储在拓扑结构表中。

2)簇的形成。各数据采集节点收到请求帧后利用位置信息计算其与该簇头间的距离,并与自己的拓扑结构表中的距离进行比较,如果小于拓扑结构表中的距离,则将该簇头替换成为自己的新簇头。在节点收到请求帧的同时,记录下接收到的帧的个数,当其与网络中的簇头数相等时,节点向簇头发送一个确认帧,其中包括它的 id 和位置等信息,并停止接收请求帧。簇头收到确认帧后将其对应的节点列为它的簇成员函数,并将它的位置和 id 保存在成员列表中。经过一段时间 T , 簇头停止广播,每一个传感器节点都加入到一个簇中。距离的计算可采用公式:

$$d = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (1)$$

2.2 簇头节点的功率控制

担任簇头节点的数据采集节点具有较大的传输距离,可以直接与簇内的所有节点进行通信。但如果直接与所有节点进行通信,会给自身造成较重的负担,而且由于簇头节点与成员节点的相异性,会产生部分非对称链路。因此,在簇结构形成后,对簇头节点进行功率控制,消除非对称链路,使网络达到双向连通。我们用符号表示,如果 $\exists (h_i, s_j)$, 且 $\neg \exists (s_j, h_i)$, 则进行操作 $\text{delete}(h_i, s_j)$ 。

定理1 删除非对称链路后,图 G_{h_i}' 的连通性保持不变。

证明 已知图 G_{h_i}' 是图 G 的连通子图,则 $\exists s_j \in C(h_i)$, $h_i \leftrightarrow s_j$, 即 h_i 与 s_j 之间互相可达。假设 $d(h_i, s_j) < R(h_i)$ 且 $d(h_i, s_j) > R(s_j)$, 则在 s_j 与 h_i 之间存在一条有向路径 $l = s_j \rightarrow s_1 \rightarrow \dots \rightarrow s_k \rightarrow h_i$ 。由于成员节点的同质性, $s_i \rightarrow s_j \leftrightarrow s_j \rightarrow s_i$, 所

以 $s_k \rightarrow s_1 \rightarrow \dots \rightarrow s_j$ 。由于 $R(h_i) \geq R(s_k)$, $s_k \rightarrow h_i \Rightarrow h_i \rightarrow s_k$ 。因此,可得到 $h_i \rightarrow s_k \rightarrow s_1 \rightarrow \dots \rightarrow s_j$ 。即使删除有向边 (h_i, s_j) ,也不影响 h_i 与 s_j 之间的双向连通性。证毕。

簇头节点调整发射半径的具体步骤如下:当网络形成簇结构后,各簇头节点以最大发射功率向簇内成员节点发送一个请求帧,接收到该请求帧的成员节点向簇头发送一个确认帧,其中包括该节点与簇头的距离信息,簇头比较所有接收到的距离信息,将簇头节点的发射半径调整为到最远簇内成员节点的距离。

2.3 连通支配集算法

网络应用分簇算法后,得到若干规模较大的簇,簇内成员节点到簇头之间的距离是 k -hop。簇的数目越少,规模越大,通信开销就会随之减少。但是,在 k -cluster 中必须解决簇内通信的路由问题,也就是在簇内选出尽可能少的能量较高的若干节点担任骨干节点,构造连通的骨干网,将感知数据直接或间接的转发到数据采集节点进行数据的融合。这个问题可以抽象为图论中求解无向图的最小连通支配集 (Minimum Connected Dominating Set, MCDS) 问题。

有关连通支配集问题,国内外已经提出了许多算法,主要有 S. Guga and S. Khuller 算法^[5]、Das 算法^[6,7]、Wu and Li 算法^[8]、Stojmenovic 算法^[9]、Alzoubi and Wan 算法^[10]等。Alzoubi and Wan 算法需要先构建图的最大独立子集 (Maximum Independent Set, MIS),之后构建连接的主节点树。该算法只需利用 1-hop 内的邻节点信息,时间、消息复杂度都较低,得到的连通支配集 (Connected Dominating Set, CDS) 近似系数为 8~12。X. Cheng 等对 Alzoubi 算法做了改进,在构建 CDS 时按照费率优先原则选择支配节点^[11,13]。但是 Cheng 的算法是针对 Ad hoc 网络提出的,它没有考虑节点的剩余能量状况以及节点的度数,不适用于节点数目巨大且能量受限的传感器网络。本文在基于 Alzoubi 和 Cheng 的算法的思路,将节点的剩余能量和度数作为选择支配节点的依据,这样形成的连通支配集综合了能量和规模的考虑,尽可能选择剩余能量高的节点充当骨干节点,保持了簇内网络拓扑的相对稳定性。

在所有簇中分别应用连通支配集算法,算法的具体步骤如下:

1) 在每个簇中,所有的簇成员节点采用广播的方式构造邻节点记录。簇内成员节点广播 Hello 信令,其中包括自身以及所在簇簇头的 id,每个成员节点收到广播信息后将消息中的簇头 id 与自己所属的簇头 id 相比较,若相同,则将发送节点加到自己的邻节点列表中。这样节点 s_i 得到它的邻居节点集 $N(s_i)$ 。

2) 初始状态时,所有节点的颜色标记为 white,状态为 non-active。

3) 从簇节点开始,节点按照以下规则确定自身的状态:

(1) 簇头节点为 leader 节点,颜色标记为 black,直接成为支配节点。

(2) 一个颜色为 white 的节点,如果它的邻节点中有一个成为支配节点,则该节点颜色标记为 gray,成为被支配节点。

(3) 一个状态为 non-active 的 white 节点,如果它的邻节点中有一个成为支配节点,则该节点的状态转换为 active,颜色保持不变。

(4) 一个 white 节点,如果状态为 active,则比较该节点与其所有状态为 active 的邻居节点的权重,若最大,则该节点变

为支配节点,颜色标记为 black。它的颜色为 grey、权重最大的父节点也将变成支配节点。该算法引入新的权重计算公式为:

$$\text{weight}(s_i) = \text{energy}(s_i) \cdot \sqrt{\text{degree}(s_i)} \quad (2)$$

(5) 当图中不存在 white 节点时,所有作为叶子节点的 black 节点颜色变为 gray。

经过上述步骤,所有颜色为 black 的节点组成了连通支配集,每个簇内形成了以簇头节点为源节点的虚拟骨干网结构。

3 算法性能评估及仿真分析

测试用的场景通过以下方法产生:根据给定的有效通信距离 R 在一个长度 $L = 100\text{m}$,宽度 $W = 100\text{m}$ 的正方形区域内随机抛撒数目为 N 的节点,如果节点 s_i 在节点 s_j 的通信半径内,则 s_i 到 s_j 之间存在一条有向边,若产生的随机图不连通,则重新抛撒直至连通。这时产生了测试用的 WSN 拓扑。

为了验证本文算法的有效性进行了一组仿真。在 100×100 的区域内布置 500~1000 个节点,其中有 10 个数据传送节点,剩下的都是数据采集节点,节点数以步长为 100 的幅度增加。对于不同的节点数,随机生成 500 个拓扑,对每一个拓扑运行本文算法,计算节点平均消耗能量及生成的虚拟骨干网的规模,仿真结果如图 2、3 所示。

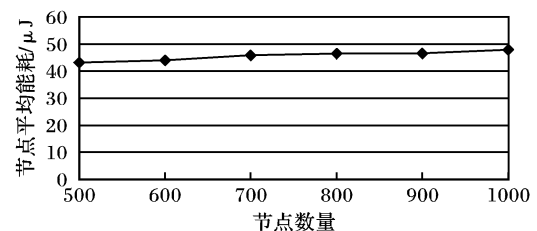


图2 网络中单位节点的平均能量消耗

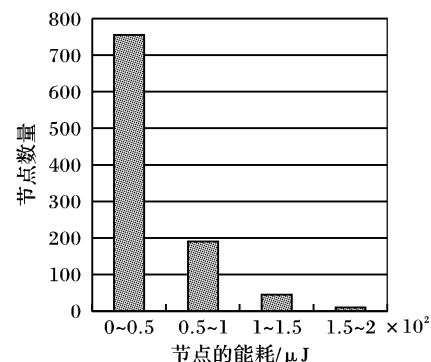


图3 $N = 1000$ 的网络中节点能量消耗的分布情况

从图2可以看出,在节点数目众多的时候,节点的平均能量消耗始终保持着一个较低的水平,并且随着节点数目的增长,节点的能量消耗没有急剧增长,算法具有较好的可扩展性。从图3可以看出,能量消耗较低的节点占了总节点数的70%以上。

4 结语

提出了一个计算传感器网络虚拟骨干网的分布式算法,阐述了算法原理,并进行了仿真实验。算法在分簇基础上,利用连通支配集优化了簇内结构,并引入了新的权重计算公式作为选举支配点的参考系数,使能量较高的节点在构造的骨干网中保持较高比例。仿真结果表明,该算法构造的虚拟骨

(下转第1845页)

表2 四种典型的 P-Re 和 Re 的命中率比较

C-S/kB	P-LRU/%	LRU/%	P-LFU/%	LFU/%	P-GDS/%	GDS/%	P-GDSF/%	GDSF/%
128	35.32	33.31	37.6	35.34	40.26	35.87	41.7	38.15
256	40.79	37.43	41.55	39.67	44.7	40.39	45.95	42.72
512	45.29	41.18	45.65	43.34	48.68	44.66	49.95	47.18
1024	48.71	44.33	49	46.41	52	48.24	52.91	50.13
2048	51.39	47.85	52.11	50.78	55.08	52.5	56.02	54.68

表3 四种典型的 P-Re 和 Re 的字节命中率比较

C-S/kB	P-LRU/%	LRU/%	P-LFU/%	LFU/%	P-GDS/%	GDS/%	P-GDSF/%	GDSF/%
128	23.14	20.93	24.18	20.96	23.58	19.08	24.35	20.36
256	28.12	25.62	27.7	25.33	27.22	23.19	28.03	24.41
512	32.85	29.46	31.48	29.27	31.23	27.77	32.1	30.07
1024	36.72	32.54	35.59	33.35	34.78	31.77	35.71	33.57
2048	39.98	35.86	38.88	37.64	39.24	36.3	40.05	39

5 结语

Web 缓存的本质是延迟容忍技术,是影响网络性能的关键因素。在缓存替换算法的基础上加入预测机制,提出了基于预测的 Web 替换策略 P-Re。经过预测使缓存中保留用户在最近的将来可能会访问的对象,进一步改善现有替换算法的性能。仿真结果表明,相比常用的缓存替换算法 Re,基于 PPM 预测的替换算法 P-Re 具有较高的缓存命中率和字节命中率。

参考文献:

- [1] SHI L, DING X G, WEI L, *et al.* An adaptive PPM prediction model[J]. *Journal of Computational Information Systems*, 2006, 2(2): 633 - 638.
- [2] PALPANAS T, MENDELZON A. Web prefetching using partial

match prediction, CSRG-376[R]. Toronto, Ontario, CA: University of Toronto, 1998.

- [3] XU J L, LIU J C, LI B, *et al.* Caching and prefetching for web content distribution[J]. *Computing in Science and Engineering*, 2004, 6(4): 54 - 59.
- [4] BRIAN D. Davison's web caching and content delivery resources [EB/OL]. [2006 - 12 - 24]. <http://www.web-caching.com/>.
- [5] 贺琛, 陈肇雄, 黄河燕. Web 缓存技术综述[J]. *小型微型计算机系统*, 2004, 25(5): 836 - 842.
- [6] SHI L, GU Z M, PEI Y X, *et al.* A PPM prediction model based on web objects' popularity[C]// *Proceedings of Fuzzy Systems and Knowledge Discovery*, LNCS 3614. Berlin: Springer, 2005: 110 - 119.
- [7] 郝沁汾, 祝明发, 郝继升. 一种新的代理缓存替换算法[J]. *计算机研究与发展*, 2002, 39(10): 1710 - 1715.

(上接第 1841 页)

干网规模较小,对降低路由复杂度、延长传感器网络寿命有较好的效果。

参考文献:

- [1] 胡光明, 蒋杰, 龚正虎. 移动自组网络分簇算法综述[J]. *计算机工程与科学*, 2005, 27(1): 48 - 50.
- [2] 祝颖, 徐红兵, 肖俊. 能量高效的异类无线传感器网络分簇算法研究[C]// 仇洪冰. 中国通信学会通信理论与信号处理专业委员会. 通信理论与信号处理新进展: 2005 年通信理论与信号处理年会论文集. 北京: 电子工业出版社, 2005: 500 - 504.
- [3] YOUNIS M, YOUSSEF M, ARISHA K. Energy-aware management in cluster-based sensor networks[J]. *The International Journal on Computer Networks*, 2003, 43(5): 649 - 668.
- [4] 滑楠, 史浩山, 吴健, 等. 无线传感器网络动态簇组织算法研究[J]. *计算机应用研究*, 2006, 23(2): 26 - 30.
- [5] GUHA S, KHULLER S. Approximation algorithms for connected dominating sets[J]. *Algorithmica*, 1998, 20(4): 374 - 387.
- [6] DAS B, SIVAKUMAR R, BHARGHAVAN V. Routing in Ad hoc networks using a spine[C]// *International Conference on Computers and Communications Networks*, Las Vegas. [S. l]: IEEE Press, 1997: 376 - 380.
- [7] DAS B, BHARGHAVAN V. Routing in Ad - hoc networks using minimum connected dominating sets[C]// *International Conference on Communications*, Montreal, Canada. [S. l]: IEEE Press, 1997: 376 - 380.

- [8] WU J, LI H L. On calculating connected dominating set for efficient routing in Ad hoc wireless networks[C]// *Proceedings of the 3rd International Workshop on Discrete Algorithms and Methods for Mobile Computing and Communications*, Seattle. New York: ACM Press, 1999: 7 - 14.
- [9] STOJMENOVIC I, SEDDIGH M, ZUNIC J. Dominating sets and neighbor elimination based broadcasting algorithms in wireless networks[J]. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2002, 13(1): 14 - 25.
- [10] ALZOUBI K M, WAN P J, FRIEDER O. Distributed heuristics for connected dominating sets in wireless Ad hoc networks[J]. *Journal of Communications and Networks*, 2002, 4(1): 15 - 19.
- [11] BUTENKO S, CHENG X, DU D Z, *et al.* On the construction of virtual backbone for Ad hoc wireless networks[M]// BUTENKO S, MURPHEY R, PARDALOS P M. *Cooperative Control: Models, Applications and Algorithms*. [S. l]: Kluwer Academic Publishers, 2003: 43 - 54.
- [12] CADEI M, CHENG X, DU D Z. Connected domination in Ad hoc wireless networks[C]// *Proceedings of 6th International Conference on Computer Science and Informatics*. North Carolina: IEEE Press, 2002: 105 - 110.
- [13] CHENG X, DING M, DU D H, *et al.* On the construction of connected dominating set in Ad hoc wireless networks[D]. Twin Cities: University of Minnesota, Department of Computer Science, 2002.