

# 能量均衡的最小 2-连通 2-支配集的分布式算法<sup>①</sup>

吴振华, 米 凡, 谭波峰

(南昌航空大学 软件学院, 南昌 330063)

**摘 要:** 在无线传感器网络中, 一般通过构造连通支配集形成虚拟骨干网来分层路由. 现有算法通常只考虑如何获得规模较小的支配集, 忽略网络自身的不稳定性, 使得节点失效或链路失败经常发生. 针对连通支配集的容错能力, 结合节点度与能量因素, 提出一种能量均衡的最小 2-连通 2-支配集的分布式算法(DA-EBM). Omnet 仿真实验表明, DA-EBM 算法构造的容错连通支配集能有效均衡能量消耗, 延长网络生命周期.

**关键词:** 无线传感器网络; 能量均衡; 分布式算法; 2-连通 2-支配集

## Distributed Algorithm for Energy-Balance Minimum 2- Connected 2-Dominating Set

WU Zhen-Hua, MI Fan, TAN Bo-Feng

(Software College, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

**Abstract:** In wireless sensor networks (WSN), connected dominating set (CDS) is constructed to form the virtual backbone for hierarchical routing. Existing algorithms usually only consider how to obtain a smaller dominating sets, which ignore the instability of network itself and result to the node failure or link failure. Combining the node degrees and power factor, this paper proposes a Distributed Algorithm for Energy-Balance Minimum 2-Connected 2-Dominating Set (DA-EBM) based on the tolerance of the connected dominating set. By the simulation results of Omnet, the fault-tolerant connected dominating set constructed DA-EBM balanced energy consuming of network effectively and extend the network life cycle compared with existing algorithms.

**Key words:** wireless sensor networks; energy balance; distributed algorithm; 2-Connected 2-Dominating Set

无线传感器网络(Wireless Sensor Networks, WSN)是由部署在监测区域内大量低成本、低功耗、多功能的微型传感器节点通过无线通信而形成的一个多跳自组织网络系统, 在军事国防、环境监测、医疗健康、反恐救灾等诸多领域都具广阔的应用前景<sup>[1,2]</sup>. 为提高广播效率, 避免泛洪(flooding)算法引起的广播风暴, 通常采用图论中连通支配集(Connected Dominating Set, CDS)构造虚拟主干网进行分层路由.

由于采用连通支配集路由使得节点可能因能量耗尽失效, WSN 的不稳定性特点决定了节点和链路失效经常发生, 因此必须考虑它的容错能力. 构造一个容错性好的连通支配集使其尽可能减少网络开销, 并在支配节点或链路失败时仍能正常工作以延长网络生命周期, 是一个很重要的研究课题.

## 1 相关研究

近年来有关 MCDS 的求解已经有较为深入的研究, 而大多数算法很少考虑骨干节点失效或链路失败等情况, 对于有关容错连通支配集问题的研究主要在文献[3-7]中. 容错 CDS, 通常是在 MCDS 中加入若干节点构造 k-连通 m-支配集. Dai 等<sup>[3]</sup>较早提出 k-Gossip 概率、k-覆盖条件和混合的 CBCC 方法三种本地化方法将 MCDS 转化为 k-连通 k-支配集. Wang F 等<sup>[4]</sup>给出常数近似算法 CDSA 构造 2-连通虚拟骨干网. 该算法先构造 CDS, 然后计算割点并加入中间节点形成 2-连通. 但是算法仅考虑了  $k = 2, m = 1$  的特殊情况. Thai 等人<sup>[5]</sup>提出一种集中式算法, 首先构造 1-连通的 m-支配集  $C1m$ , 然后将  $C1m$  扩张成 k-连通 m-支配集, 但算法从计算复杂不易实现. 郑婵等<sup>[6]</sup>通过两跳内节点信息

<sup>①</sup> 收稿时间:2013-12-19;收到修改稿时间:2014-02-24

先构造  $k$ -支配集, 然后构造连通  $k$ -支配集, 最后扩充形成 2-连通. 文献[7]给出一种分布式构造 2-连通 2-支配集算法, 从任一节点出发, 先形成一个局部回路, 并以此回路不断扩充回路, 直到不在回路中节点均 2-支配为止. 但是该算法采用分布式串行方法, 时间和消息复杂度都很高, 对网络要求较高.

综上所述, 以上各文献算法均未考虑有关节点能量对网络生命周期的影响, 本文结合文献[8]中提出的能量全权值公式, 综合考虑节点自身能量、节点度、剩余能量与能量阈值之间的关系, 以  $k = 2$  为例, 提出了一种能量均衡的最小 2-连通 2-支配集的分布式算法 (distributed parallel algorithm for Minimum 2-connected 2-dominating set, DA-EBM). 该算法在中等规模的无线传感器网络中可产生更少的 2-支配点个数, 具有更好的算法性能比率, 从而更好的节省了节点的能量消耗和整个网络的通信开销.

## 2 相关定义和符号说明

在图论中, 通常把无线传感器网络可抽象单位圆盘图  $G$ , 即  $G=(V,E)$ , 其中  $V$  代表网络中节点集合,  $E$  代表网络中的节点能相互通信的边集. 本文只考虑连通的单位圆盘图  $G$ .

### 定义 1. 连通支配集

在图  $G=(V,E)$  中, 若存在非空子集  $D$ , 若对于所有  $G$  中节点要么是在  $D$  中, 要么至少与  $D$  中的一个节点是相邻的, 则称  $D$  为  $G$  的支配集 (Dominating Set, DS). 则  $DS$  中节点为支配点, 其他节点成为被支配点. 若由  $D$  导出的子图是连通的, 则称  $D$  为连通支配集 CDS.

### 定义 2. $k$ -连通

图  $G=(V, E)$  中存在非空子集  $D$ , 若  $D$  中任一对节点间至少存在  $k$  条独立不同的路径, 即在虚拟骨干网中任意  $k-1$  个支配点出错, 骨干网依然是连通的, 则称图  $D$  是  $k$ -连通的.

### 定义 3. $m$ -支配集

图  $G=(V,E)$  中存在一个非空子集  $D$ , 若对于  $\forall u \in V-D$ ,  $D$  中都至少被  $m$  个节点支配, 则称  $D$  为  $G$  的  $m$ -支配集.

### 定义 4. 2-连通 2-支配集

设图  $G=(V,E)$  中存在一个非空子集  $D$ , 若  $D$  导出的子图 2-连通, 且  $D$  是  $G$  的 2-支配集, 则称  $D$  为图  $G$  的 2-连通 2-支配集 (2-connected 2-dominating set).

本算法运行过程中, 节点状态、颜色等均会发生变化, 为方便算法描述, 以节点  $u$  为例, 定义如下符号:

S0: 初始状态, 节点着为白色;

S: 支配点状态, 节点着色为黑色;

S1: 被 1 支配状态,  $u$  的邻节点中只有一个支配点;

S2: 为被 2 支配状态, 节点着色为灰色; 即  $u$  的邻节点中有两个或以上支配点.

## 3 DA-EBM 算法构造

### 3.1 算法主要思想

本文算法采用分布式, 主要分两个部分: 构造阶段和优化阶段. 首先在算法构造阶段, 开始时所有节点均为初始状态, 当一个节点确定为支配点后, 主要工作就是如何选取下一支配点, 然后收敛整个网络. 算法下一支配点的选取策略是支配点通过发送消息收集其 2 跳范围内所有初始状态节点的信息后, 首先将 2 跳范围内权值最大的初始状态节点置为支配点, 然后将 1 跳范围内与新置支配点相邻的权值最大的节点置为支配点, 新置的支配点将其 1 跳邻接初始状态节点置为被支配点, 一直到整个网络节点全部置为支配点或被支配点时结束, 所有支配点构成连通支配集. 其次在算法优化阶段, 通过第一部分形成的支配集存在冗余节点, 可以根据算法优化规则进行剪枝, 从而得到能量均衡的最小 2-连通 2-支配集.

### 3.2 节点权值公式的选取

在无线传感器网络中, 节点状态一般为静态或准静态, 因此节点选取主要受到两个因素影响, 即节点度和节点剩余能量. 因此尽可能选取较优的节点作为支配点显得尤为重要.

由于支配节点承担着与非支配点间的信息传输, 为了最大程度地减少网络风暴, 骨干网节点要尽可能的少, 这就需要考虑节点度  $d(u)$  因素; 另一方面节点可能会因能量消耗过多而失效, 这就需要选择剩余能量多的节点, 因此设置阈值  $E_{th}$ , 使低于阈值的节点选为支配点的几率较低. 综合考虑, 寻求最佳策略来有效提高网络生命周期. 选取的最佳权值公式如下<sup>[8]</sup>:

$$W(u) = \begin{cases} \alpha \cdot e^{-|d(u)-N|} + \beta \cdot e^{-\frac{E_{thr}}{E_u + \delta}} & E_u \geq E_{thr} \\ \gamma \cdot \left( \alpha \cdot e^{-|d(u)-N|} + \beta \cdot e^{-\frac{E_{thr}}{E_u + \delta}} \right) & E_u < E_{thr} \end{cases}$$

其中  $d(u)$  为节点  $u$  的度;  $N$  为一个支配点可支配的理想数目, 其取值与网络密度和通信距离有关;  $\delta$  是恒大于零的常数, 通常取 0.01, 是为防止造成分母无意义;  $E_u$  是节点剩余能量;  $E_{thr}$  是节点剩余能量阈值;  $\alpha$  和  $\beta$  为常数,  $\alpha + \beta = 1$ ,  $\alpha$  和  $\beta$  的取值一般由网络对节点度和剩余能量侧重程度决定. 如果一个网络侧重于构造尽可能小的容错 CDS, 则可以将  $\alpha$  值偏大; 如果网络优先考虑生命周期的最大化, 则  $\beta$  值偏大.  $\gamma$  为恒大于零的无穷小数, 若剩余能量小于阈值, 保证选择该节点的可能性极小. 该权值公式中,  $W(u)$  值越大则节点被选为支配点的概率越高.

### 3.3 构造 2-连通 2-支配集的算法描述

算法开始, 节点初始化为白色, 每个节点和周围邻居节点交换信息, 当一个节点被确定为支配点, 该节点着为黑色, 并向它的邻接点发送它是支配点的消息. 而一个节点收到邻接点是支配点的消息时, 将自己标记为 1 支配状态, 表示为  $S_1$ ; 若第二次(或以上)收到邻接点是支配点消息时, 将自己标记为 2 支配状态, 并着为灰色, 表示为  $S_2$ . 当一个节点的状态改变时向周围邻接点发布它状态改变的消息. 直到网络只剩下黑色或灰色节点, 则构造完成. 具体步骤如下:

1) 每个节点在其一跳闭集中选择权值最高(若权值最高且相等, 则  $id$  较小者优先)节点为支配点, 将其着为黑色, 并广播 Dominator 消息宣布自己为支配点.

2) 如果白色节点收到两个或两个以上不同黑色节点发来的 Dominator 消息, 则将自己着为灰色, 并广播 Dominatee 消息, 宣布自己被 2-支配.

3) 收到 Dominatee 消息的白色节点返回 return 消息.

4) 收到 return 消息的灰色节点, 将自己着为黑色, 并发送 Dominator 消息.

5) 收到 Dominator 消息的白色节点, 如果节点为度为 2 的 1 支配点, 则将自己着为黑色, 发送 Dominated

消息.

6) 如果一个黑色节点只收到一个节点发来的 Dominator 消息, 则在邻居中分别选择权值最高和权值仅小于最高权值的两个非黑色节点, 并分别发送 Dominated 消息.

7) 收到 Dominated 消息的节点, 将自己着为黑色, 并发送 Dominator 消息.

当整个网络只剩下黑色节点和灰色节点, 则 2-连通 2-支配集构造完成. 由于采用分布式算法, 信息传输只存在相邻节点中, 构造的连通支配集会存在一定冗余, 并不是最小连通支配集. 而图论中构造最小连通支配集是 NP 难问题, 因此为了得到较小的连通支配集, 考虑采用相关策略删除冗余节点.

### 3.4 算法优化规则

对于算法构造阶段生成的连通支配集中任意黑色节点  $u$ , 用  $N(u)$  代表节点  $u$  的所有黑色邻居节点. 用  $N_1(u)$  代表  $N(u)$  中权值比  $u$  大的所有黑色节点构成的集合;  $N_2(u)$  代表  $N(u)$  中权值比  $u$  小的所有黑色节点构成的集合. 通过如下的算法规则进行优化:

1) 若比  $u$  的权值大的邻居集  $N_1(u)$  不为空;

2) 若  $N_2(u)$  中的节点, 其邻居要么是  $N_1(u)$  节点的邻居, 要么与  $N_1(u)$  节点的邻居相连.

3) 若  $u$  的  $N_1(u)$  与  $N_2(u)$  节点不直接连通, 但能通过他们共有的一个邻接点  $w$  连通(有且至少有一个), 且节点  $w$  的权值小于节点  $u$  的权值;

4) 若节点  $u$  的灰色邻居除了  $u$  以外仍有两个或以上的黑色节点邻居;

若上述规则均成立, 则节点  $u$  变为被支配节点, 不是支配点, 并将节点  $u$  着为灰色.

通过算法构造和优化两步形成的连通支配集, 不仅规模较小, 更能有效的节省整个网络能量消耗和通信开销.

### 3.5 图例

以图 1 为例, 采用本文算法构造最小 2-连通 2-支配集的执行步骤, 由于节点权值随自身能量和度的影响而变化, 为方便算法描述, 假定各节点自身编号为节点此刻的权值大小.

由算法第一步, 每个节点找出各自一跳闭集权值最大节点, 即节点 11、14、15、16 着为黑色, 如图 1(a) 所示; 由算法步骤 2, 符合条件的节点着为灰色, 如图 1(b) 所示; 由步骤 3 和 4, 节点 6、12、13 由灰变

为黑色,如图 1(c)所示;根据步骤 5,节点 5 为度为 2 的 1 支配,节点 5 变黑,如图 1(d)所示;再根据算法步骤 6,分别将节点 4,10 节点变黑,如图 1(e)所示;从而得到一个 2-连通 2-支配集 {4,5,6,9,10,11,12,13,14,15,16}。再利用剪枝规则优化可知,节点 5、9 冗余,将 5、9 变为灰色节点,如图 1(f)所示。从而得到最小 2-连通 2-支配集 {4,6,10,11,12,13,14,15,16}。

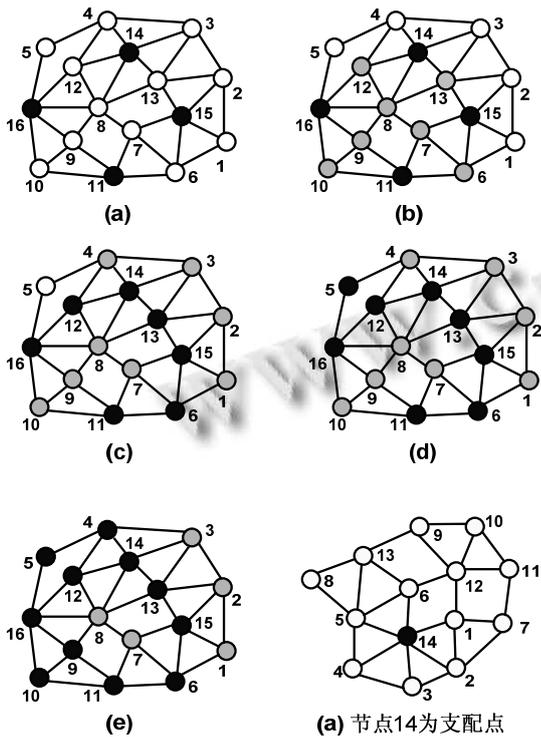


图 1

### 3.6 算法性能分析

**定理** 在图  $G=(V,E)$  中,本文算法所产生的节点集合是一个最小的 2-连通 2-支配集。

**证明** 根据本算法的执行过程可知,所有的初始白色节点最终都着色为黑色或者灰色。白色节点成为支配点是将自身着为黑色,并发送 Dominator 消息。而白色节点只有在收到至少两个不同黑色节点发送的 Dominator 消息后,才将自身着为灰色,所以任意灰色节点都至少与两个黑色节点相邻,即每个灰色节点都必然是被 2 支配的。又因为 2-连通的定义是每对节点间至少存在 2 条独立不同的路径。根据文献[6]中定理 4 可知,在连通扩充步骤中,每次最大加入了个节点形成连通。再由算法步骤 6 可知,每一个黑色节点的加

入,均保证该节点至少有两个以上的黑色支配点邻居,即得到的黑色节点集是 2 连通集。然后再根据第二步算法优化规则删除冗余的支配点,所以黑色节点集是一个最小 2-连通 2-支配集。

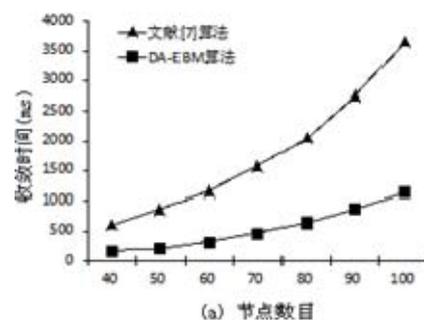
## 4 模拟仿真与结果分析

这一小节采用 omnet++4.1 平台进行模拟仿真实验,验证本文算法构造的 2-连通 2-支配集的性能,并与文献[7]中的方法进行比较。仿真参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数列表

参数名称	取值
网络区域大小	100*100
节点个数	40,50, ..., 100
通信半径 R	50m
初始能量 E	2J
能量阈值 Eth	0.5J
收、发消息能耗	10-6J/bit
数据包大小	512bits
$\alpha, \beta, \gamma, \delta$	0.5,0.5,0.01,0.01

仿真实验是在  $100m \times 100m$  区域随机产生一定数量的传感器节点,假设每个节点拥有相同的通信半径和初始能量,若两节点距离小于 R,则代表两节点连通,即两节点间存在一条边。实验时区域内节点的随机图必须保证能至少 2 连通(非 2 连通图无法构造)。通信半径  $R=50m$  固定,节点数按步长 10 由 40 个变化到 100 个。算法运行时间越短,权值大节点所占比例越高,证明网络生命周期越长,性能越好。实验结果如图 2 所示。



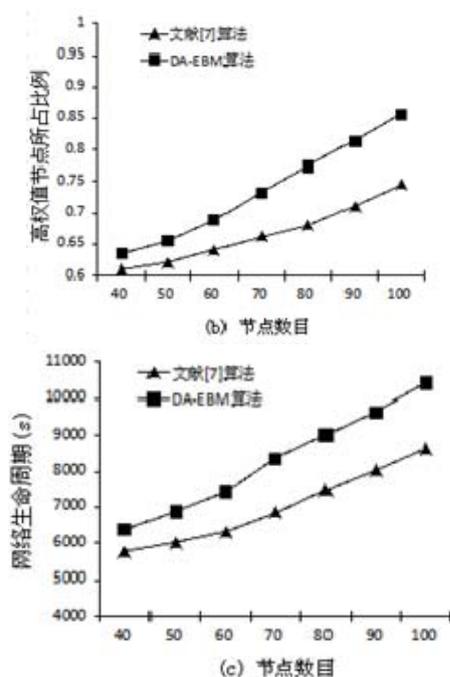


图 2

由图 2(a), 两算法随节点数增多都为上升趋势, 即两算法 CDS 运行时间都随节点数增多而延长. 然而随节点数增加, DA-EBM 算法的优势更为明显, 由于文献[7]算法是采用分布式串行方法, 使得算法在某个时刻只能判断一个节点的状态. DA-EBM 算法采用分布式并行策略, 每个节点可以互不干扰的进行自己的算法规则判断, 从而很大程度缩短构造时间.

由图 2(b), 由于 DA-EBM 算法采用权值公式优先选择剩余能量高节点数为支配点, 因此高权值比例一直较高, 并随节点数增加而不断提高; 文献[7]算法, 根据节点度来选择支配点, 虽然高权值所占比例仍有所提高, 但却不能保证能持续选择高权值节点作为支配点. 因此在构造支配集时仍会有能量低节点加入, 一定程度上降低了高权值在整个网络的比例.

由图 2(c), DA-EBM 算法明显比文献[7]算法具有更长的网络生命周期, 且随节点数增多而更明显. 文献[7]算法花费过多时间来构造支配集, 从而也消耗了较多的节点能量, 导致网络运行时间随之缩短.

DA-EBM 算法运行时保证尽量选择能量高节点为支配点, 使得支配集中高权值节点最大化, 并采用并行算法能快速收敛网络, 最大限度均衡网络能耗, 因此可有效延长网络寿命.

## 5 总结

本文算法通过考虑剩余能量和节点度等因素引入权值公式, 算法主要包括支配集构造及优化冗余两部分, 提出一种能量均衡的最小 2-连通 2-支配集的分布式算法 DA-EBM. 同时通过仿真比较, 本文算法的采用高权值节点作为支配点, 能够较好的实现能量均衡, 从而有效延长网络生命周期.

## 参考文献

- 1 Min MK, et al. Improving construction for connected dominating set with Steiner tree in wireless sensor networks. *Journal of Global Optimization*, 2006, 35(1): 111-119.
- 2 Das B, Bharghavan V. Routing in ad-hoc networks using minimum connected dominating sets. *IEEE International Conference on Communications - Towards the Knowledge Millennium*, Montreal. 1997.
- 3 Dai F, Wu J. On Constructing k-Connected k-Dominating Set in Wireless Networks. *19th International Parallel and Distributed Processing Symposium (IPDPS)*. 2005.
- 4 Wang F, Thai MT, Du DZ. 2-connected Virtual Backbone in Wireless Network. Accepted by *IEEE Trans. on Wireless Communications*, 2007.
- 5 Thai MT, et al., On approximation algorithms of k-connected m-dominating sets in disk graphs. *Theoretical Computer Science*, 2007, 385(1-3): 49-59.
- 6 郑婵,尹令,孙世新.无线传感器网络中 2-连通 k-支配的容错连通支配集构造. *控制与决策*, 2013, 28(5): 650-656.
- 7 王雪瑜,山炳强,马艳.无线传感器网络中 2-连通 2-支配集的分布式构造算法. *青岛大学学报*, 2008, 23(2): 22-27.
- 8 凌飞, 吴振华. 能量均衡的最小连通支配集分布式算法. *传感器学报*, 2012, 25(9): 1316-1321.