

无线传感器网络中一种能量均衡的 基于连通支配集的数据收集算法

奎晓燕¹, 杜华坤², 梁俊斌³

(1. 中南大学信息科学与工程学院, 湖南长沙 410083; 2. 中南大学地球科学与信息物理学院, 湖南长沙 410083;
3. 广西大学计算机与电子信息学院, 广西南宁 530004)

摘要: 采用连通支配集来构建虚拟骨干可以减轻无线传感器网络的广播风暴问题. 目前已有大量工作通过构造最小连通支配集形成网络虚拟骨干来进行高效数据收集. 然而, 最小连通支配集并不能有效均衡节点的能量耗费, 导致网络生命周期较短. 提出了一种能量均衡的基于连通支配集的分布式算法 EBCDS 来进行数据收集, 通过选择能量水平和度均比较大的节点组成连通支配集, 支配集中的节点组成一个规模不大但具有较高能量水平的网络骨干. 网络中的所有数据沿骨干在较小的寻路空间中转发, 能够节省节点能量, 使骨干节点不会因为能量不足而过早死亡. 理论分析表明, EBCDS 能以 $O(n \log n)$ 的消息复杂度构造连通支配集, 仿真实验表明, EBCDS 能有效节省节点能耗并延长网络生命周期.

关键词: 能量均衡; 连通支配集; 数据收集; 无线传感器网络

中图分类号: TP393.17 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2013) 08-1521-08

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2013.08.011

An Energy-Balanced Connected Dominating Sets for Data Gathering in Wireless Sensor Networks

KUI Xiao-yan¹, DU Hua-kun², LIANG Jun-bin³

(1. School of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China;
2. School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China;
3. School of Computer and Electronic Information, Guangxi University, Nanning, Guangxi 530004, China)

Abstract: Connected Dominating Sets (CDS) has been proposed as the virtual backbone to alleviate the broadcasting storm problem and perform some other tasks such as data gathering in wireless sensor networks. Many previous researches mainly focus on how to construct a small virtual backbone for high efficient data gathering, which is modeled as the Minimum Connected Dominating Set (MCDS) problem. However, the MCDS cannot balance the energy consumptions among nodes, which shorten the network lifetime. Therefore, it is desirable to construct an energy-balanced CDS. In this paper, a novel distributed schema, called EBCDS (Energy-Balanced Connected Dominating Sets) algorithm is proposed to balance the energy consumption of the network and enlarge the network lifetime. In EBCDS, each node in the CDS has high energy and large degree, and these nodes form a virtual backbone in the network. By transmitting data through the backbone with small routing space, each node can preserve its energy effectively. Moreover, the nodes in the backbone would not die quickly because of lacking of energy. Theoretical analyses show that EBCDS can construct a CDS with $O(n \log n)$ message complexity, and simulations results prove the efficiency of the proposed algorithm in terms of energy consumption and network lifetime.

Key words: energy-balanced; connected dominating sets; data gathering; wireless sensor networks

1 引言

无线传感器网络 (Wireless Sensor Networks) 是一种特殊的 ad hoc 网络, 节点不具有移动性且只有较少的能量

水平. 此外, 节点的计算、通信能力均比较弱. 无线传感器网络通常部署于有线网络很难应用的区域, 如: 战场和原始森林等^[1,2]. 数据收集是无线传感器网络中最基础的应用之一, 它是指网络中的所有节点将数据传送

到 Sink 节点的过程. 其中, Sink 节点是一种特殊的节点, 它一般是静止的并且具有充足的能量.

如何有效地保存节点能量以延长网络生命周期是数据收集算法的关键问题. 为使网络能长时间工作, 必须在数据收集过程中有效地保存节点的能量. 通信能耗是节点最主要的能耗, 而在计算、感知等方面的能耗通常可以忽略不计, 因此必须有效地减少节点通信(包括数据接收和发送)过程中的能量耗费. 目前很多研究工作采用基于连通支配集方法来实现这个目的.

所谓支配集, 是指网络中一个节点子集 V' , 对于网络中的任意一个节点, 它若不属于 V' , 则就是 V' 的邻居. 连通支配集是指 V' 中的节点相互之间均能连通的支配集. 在网络中构造连通支配集, 可以在网络中形成一个虚拟骨干. 通过这个虚拟骨干, 所有节点均可以传送自己的数据到 Sink 节点. 此外, 虚拟骨干的规模(组成骨干的节点数量)较小, 能有效减小广播风暴问题, 减少了节点通信的次数和能耗.

本文提出了一种能量均衡的基于连通支配集的数据收集算法 EBCDS(Energy-Balanced Connected Dominating Sets Data Gathering Algorithm), 通过选择能量水平较高且度较大的节点组成连通支配集, 普通节点则把数据传送给连通支配集中的节点. 算法使得网络中的所有数据沿骨干在较小的寻路空间转发, 能够节省节点能量, 使骨干节点不会因为能量不足而过早死亡. EBCDS 能生成规模较小的连通支配集, 而且能承担更多轮次的数据收集, 进而有效延长了网络生命周期.

2 相关工作

目前, 有大量的工作研究如何利用连通支配集来进行数据收集, 根据优化目标的不同, 可将现有工作分为减少能耗的算法和保证可靠性的算法两类. 减少能耗的算法目标侧重于尽量减少能量耗费使得网络能长时间工作; 保证可靠性的算法则侧重于保证网络的可靠性(有节点死亡后能保证数据仍能传送到 Sink 节点).

(1) 减少能耗的算法

CDS-BD-D^[3] 研究如何构造直径受限的最小连通支配集, 直径是指支配集中任意两个节点间最短路径的最大值. 限制连通支配集, 可以在规定的延迟内完成数据收集. 在 CDS-BD-D 中, Sink 作为根节点首先多跳地广播一个消息给网络中的所有节点, 节点根据这个消息可以知道自己距离 Sink 的跳数. 接着, 节点如果发现自己的度大于所有邻居的度, 则该节点成为支配节点(连通支配集中的节点). 每个支配节点如果发现自己的邻居中没有离 Sink 更近的支配节点, 则发出一个 Connect 消息给一个以 Sink 为根的最短路径树上的非支配节点的邻居. 该邻居收到 Connect 消息后, 将自己的状

态改为支配节点, 接着继续以上操作. 最后, 所有支配节点将组成一个以 Sink 为根的连通支配集.

GOC-MCDS-D^[4] 指出 CDS-BD-D 虽然能构造直径和规模均较小的连通支配集, 但不能有效减少节点的能量消耗. 因为在网络中可能有很多条路径能让节点传送数据到 Sink, 而规模较小的连通支配集则限制了节点传送数据到 Sink 节点的路径数量. 这样, 会使得某些节点不得不放弃最优的数据传送路径. 因此, GOC-MCDS-D 提出选择节点进入连通支配集时应考虑节点把数据转发到 Sink 节点的路由代价, 使构造出的连通支配集能包含尽可能多的节点通向 Sink 的最佳数据传送路径.

Wu_h^[5] 主要研究在网络中构造最小连通支配集, 而不考虑限制连通支配集的直径, 这样可以获得规模更小的连通支配集. 首先, 每个节点为自身计算一个权值, 该权值等于节点的 2 跳邻居与 1 跳邻居的数量之差. 如果节点发现自身的权值比所有邻居节点的权值都小(或者节点的权值等于邻居节点的最小权值并且节点 ID 号小于这些邻居节点的 ID 号), 则该节点成为支配节点并把消息广播给自己的邻居. 接着, 每个非支配节点判断自己邻居的各个支配节点间是否存在通路, 如果没有通路便转变为支配节点. 最后, 所有支配节点将组成一个连通支配集.

mr-CDS^[6] 改进了 Wu_h 构造的连通支配集不考虑节点能量水平从而导致能量低的节点在虚拟骨干中容易耗尽能量而过早死亡的缺点. 在 mr-CDS 中, 能量高于邻居节点的那部分节点首先成为支配节点, 并向邻居广播自己的支配信息. 通过接收支配节点的信息, 每个非支配节点可以获知邻居中支配节点的数量. 接着, 每个非支配节点将自己邻居的支配节点集广播出去, 使得支配节点的 2 跳邻居也能获知支配节点的信息. 通过对比 2 跳范围内的邻居集合, 每个非支配节点可以判断出自己邻居的各个支配节点间是否存在通路. 如果没有通路该节点便转变为支配节点. 最后, 所有支配节点组成一个连通支配集. 但是, 非支配节点在转变为支配节点时没有考虑能量因素. 此外, 每个非支配节点分布式地自主决定转变为支配节点, 可能会导致过多非支配节点同时转变为支配节点, 造成节点需要继续执行能耗较大的剪枝算法以减少连通支配集中节点数量.

(2) 保证可靠性的算法

LDA^[7] 研究如何构造 k -连通、 m -支配的连通支配集. k -连通是指连通支配集中任意 2 个支配节点间都有 k 条路径, 而 m -支配是指任意非支配节点的邻居中都有 m 个支配节点. 首先, 采用 CDS-BD-D 构造一个 1-连通、 m -支配的连通支配集. 然后, 每个支配节点根据邻居信息构造一个局部 k 节点连通子图(local k vertex-

connected subgraph).最后,每个支配节点通知该子图中的非支配节点加入连通支配集.

FT-CDS-CA^[8]是一个具有常数近似率的 3-连通、 m -支配的连通支配集构造算法.首先,采用文献[9]中的算法构造一个 2-连通、3-支配的连通支配集.然后,节点根据邻居的连通情况进行角色变换,将该连通支配集转变为 3-连通、3-支配的连通支配集.最后,每个非支配节点根据邻居中支配节点的数量,选择 m 减去 3 个非支配节点成为支配节点.

SSC^[10]是第一个研究 r -跳、 m -支配的连通支配集算法,每个节点的 r 跳范围内均有 m 个支配节点.首先,在网络中随机产生 t 个支配节点,其中 t 的值由网络中节点的分布和数量来决定, t 足够大以保证每个节点的 r 跳范围内均有 m 个支配节点.然后,每个支配节点将自己的状态消息广播给自己的 r -跳邻居.最后,每个支配节点再根据 r -跳范围内其他支配节点的数量,以概率决定是否转变为非支配节点,最终保证连通支配集具有较小的规模.

3 系统模型和问题描述

3.1 网络模型

假设网络部署在一个面积为 $M \times M$ 平方米的正方形区域,区域中随机散布了 n 个节点,每个传感器节点有一个唯一的 ID 号,即: $v_i, i = 1, 2, \dots, n$. 在网络中固定部署一个 Sink 节点,它的 ID 号是 v_0 . 所有传感器节点和 Sink 节点组成一个连通的网络,节点的集合用 V 表示, V 的大小用 $|V|$ 表示,因此, $|V| = n + 1$. 为了使算法具有可扩展性,节点没有安装定位装置,不知道自己的地理位置,不需要地理信息的支持,可以适用于环境恶劣,以致很难获取地理信息的环境;每个节点只知道自己的邻居信息,不知道自己通信半径以外其它节点的信息.节点只与自己的邻居通信,无须耗费大量能量来获取邻居以外的其它信息.此外,网络具有以下性质:(1)节点是静止的,位置不会发生移动;(2)节点的初始能量可以不相同.

其中,性质 1 说明节点的造价较低,无须增加复杂而价格较贵的移动装置,有利于降低整个网络的部署成本;性质 2 说明节点的类型可以有多种,节点装备的电池能量可以不相同.

3.2 通信模型和数据汇聚模型

假设算法按轮运行,每一轮节点的活动分为 2 个阶段:骨干生成阶段和数据传输阶段.在骨干生成阶段,节点通过相互之间的消息通信,以自组织的方式产生一个连通支配集作为网络骨干.为了有效保存能量,非骨干节点发送自己的数据给骨干上的节点,然后自己进入睡眠状态,而骨干上的节点负责接收其他节点发

送来的数据并转发.骨干节点需要发送数据时,将选择离 Sink 更近的骨干节点作为下一跳.

在实际应用中,对于不同节点产生的数据,网络可以根据它们之间的相关性在传输过程中选择进行完全汇聚或完全不汇聚.本文假设不同节点产生的数据具有完全相关性,不同节点的数据可以完全汇聚为一个大小固定的数据包.节点的通信半径为 r ,节点在发送数据时耗费的能量 $E_t(k, r)$ 满足自由空间的能量衰减模型,即:

$$E_t(k, r) = kE_{\text{elec}} + k\epsilon_{fs}r^2 \quad (1)$$

这里, k 指节点发送的数据量, E_{elec} 代表发射电路消耗的能量, ϵ_{fs} 表示自由空间模型中功率放大所需的能量.每个节点接收 k bits 数据需要耗费的能量为:

$$E_r(k) = kE_{\text{elec}} \quad (2)$$

3.3 相关定义

为了更好地描述本文的算法,给出以下几个定义:

定义 1 轮(Round)是指节点产生一次数据到 Sink 节点接收到网络中所有节点发送来数据的时间间隔.

定义 2 网络生命周期是指网络中第一个节点耗尽能量死亡的时间.

定义 3 节点 v_i 的邻居是指与 v_i 之间的距离小于 r 的那部分节点, v_i 的邻居集合用 $N(v_i)$ 表示.

定义 4 支配节点(dominator)指支配集中的节点.

定义 5 被支配节点(dominatee)是指不属于支配集的节点.

定义 6 连接节点(connector)是指能将 2 个原来不相连的支配节点连通的节点.所有的支配节点和连接节点组成一个连通支配集.

定义 7 节点 v_i 的未支配邻居是指 v_i 的邻居中没有成为支配节点、被支配节点或连接节点之一的那部分节点,节点 v_i 的未支配邻居集合用 $P(v_i)$ 表示.

定义 8 独立集是指网络中两两互不相邻的节点构成的集合.

定义 9 最大独立集是指网络中包含节点数量最多的独立集.

3.4 问题描述

本文主要研究如何在网络中构造一个连通支配集作为网络骨干来进行数据收集.从第 2 节的相关工作中可以看到,目前的研究普遍是构造规模较小的连通支配集来作为网络骨干,优化的目标是减少网络中节点总的能量耗费.但是,减少网络中总的能量耗费并不意味着可以延长网络生命周期.详细分析如下:

对于网络生命周期,如果要使其最大化,可建模为:

$$\text{Max } L = \text{Max } \text{Min} \{L_i | v_i \in V\} \quad (3)$$

其中, L 是网络生命周期,而 L_i 是节点 v_i 的生命周期.

节点的生命周期,主要由节点的能量和节点在每轮中的能量耗费来决定,即:节点的能量越高且节点在每轮中的能量耗费越少,则节点的生命周期越大.这里,节点的能量是可以预知的,但是节点在每轮中的能量耗费则是无法预知的,因为这是由节点在每轮需要接收和转发的数据量决定.因此,节点的生命周期无法精确地表达.

为了能刻画出节点生命周期的数学模型,我们引入一个变量 Avg_i 来代表节点 v_i 在每轮中的平均能耗.这样,节点 v_i 的生命周期可以表示为:

$$L_i = E_i / Avg_i \quad (4)$$

其中, E_i 是节点 v_i 的能量.将式(4)代入式(3),则式(3)可转换为:

$$\text{Max } L = \text{Max } \text{Min} \{ E_i / Avg_i \mid v_i \in V \} \quad (5)$$

由式(5)可以看到,最大化生命周期是个能量均衡的问题,能量大的节点需要消耗的平均能量要多些,而能量少的节点需要消耗的平均能量则要少些.因此,为了最大化网络生命周期,在网络中构造的连通支配集必须是能量均衡的.

4 能量均衡的连通支配集的构建

4.1 基本思想

对于能量均衡的连通支配集,应该具有以下2个特点:(1)构造的连通支配集应该是一个近似最小的连通支配集,这样数据通信可以集中在数量较少的节点中进行,避免相互干扰造成冲突和重传.此外,更多的非骨干节点可以在发送数据后转入休眠状态以保存能量;(2)构造的连通支配集中的节点应该具有较高的能量水平,这样才能承担更多次的的数据转发任务.

然而,以上2个特点存在相互制约的地方.一方面,若构造的连通支配集近似最小,则需要选择度(或邻居数量)较大的节点作为骨干.但是,选出的节点却不一定具有较高的能量.另一方面,若选择能量水平高的节点组成连通支配集,而这部分节点的度却不一定大,这样构造出来的连通支配集的规模会比较小.

为了平衡以上两点,我们给每个节点定义一个权值 $W_i = E_i \text{Degree}_i$, 让权值大的节点有更高的优先级成为骨干.其中, Degree_i 是节点 v_i 的度.这样,就能使能量水平高而且度较大的节点优先成为骨干.

4.2 算法描述

根据以上分析,本文提出一种分布式的算法 EBCDS 来构造能量均衡的连通支配集.首先产生支配节点,然后选择合适的节点成为连接节点,最后,所有的支配节点和连接节点形成一个连通支配集.在 EBCDS 中,每个节点具有一个 color 属性,初始时每个节点的

color 属性的值为“White”.EBCDS 在每个节点上分布式地运行,算法由两个阶段组成:

(1)第一个阶段进行权值对比,产生支配节点.首先,网络中的节点与自己的邻居进行权值比较,权值最大的节点成为支配节点.如果存在多个节点具有最大权值的情况,则 ID 号最小的节点成为支配节点.然后,成为支配节点的节点将自己的 color 属性的值设为“Black”,而支配节点的邻居(即被支配节点)则将自己的 color 属性的值改为“Gray”.

(2)第二个阶段支配节点根据邻居的能量水平以及邻居与其他支配节点的连接情况,选择合适的邻居成为连接节点,形成连通支配集.成为连接节点的节点也将自己 color 属性的值设为“Black”.最后,所有的支配节点和连接节点形成一个连通支配集.

EBCDS 算法在第一个阶段的详细描述如下:

步骤 1 当第一个阶段开始时,节点 v_i 的未支配邻居集合 $P(v_i)$ 等于其邻居集合 $N(v_i)$.此时,网络中全部节点的 color 属性都是“White”,表示节点还没有加入支配集或没有被支配.当一个节点 v_i 经过比较发现自己的权值 W_i 比邻居权值都大(或者 W_i 等于其邻居中的最大权值 W_j 且 v_i 的 ID 号小于 v_j 的 ID 号,即 $v_i < v_j$),则 v_i 成为支配节点.此时, v_i 将自己的 color 属性改为“Black”,然后广播一个 dominator(v_i)消息通知自己的邻居.

步骤 2 如果节点 v_i 接收到一个 dominator(v_j) 消息,首先查看自己的 color 属性.如果 v_i .color = “White”,则 v_i 成为被支配节点(被 v_j 支配).此时, v_i 将自己的 color 属性改为“Gray”,并广播一个 dominee(v_i) 消息通知自己的邻居.

步骤 3 如果节点 v_i 接收到一个 dominee(v_j) 消息,首先查看自己的 color 属性.如果 v_i .color = “White”,则说明 v_i 还没有加入支配集或还没有被支配集中的节点支配.因此, v_i 首先需要决定是否加入支配集(成为支配节点).它先将 v_j 从 $P(v_i)$ 中删除,然后再在 $P(v_i)$ 中进行权值对比.如果节点 v_i 发现自己的权值 W_i 比 $P(v_i)$ 中节点的权值都大(或者 W_i 等于 $P(v_i)$ 中节点的最大权值 W_j 且 v_i 的 ID 号小于 v_j 的 ID 号,即 $v_i < v_j$),则 v_i 成为支配节点.此时, v_i 将自己的 color 属性改为“Black”,并广播一个 dominator(v_i) 消息通知自己的邻居.

EBCDS 算法在第二个阶段的详细描述如下:

步骤 1 当第二个阶段开始时,如果一个节点 v_i 的 color 属性值为“Gray”,则节点 v_i 为每个属于其邻居的支配节点 v_k 广播一个 dominee1(v_i, v_k) 消息,使 v_i 的邻居知道 v_k 的存在.

步骤 2 如果一个节点 v_i 接收到一个 dominee1

(v_j, v_k) 消息,首先查看自己的 color 属性,如果 v_i .color == "Gray",则说明 v_i 的 1 跳邻居里有一个支配节点 v_m 并且其 2 跳邻居中还有一个支配节点 v_k . 如果 $v_m < v_k$, 则 v_i 广播一个 $\text{dominatee2}(v_i, v_j, v_k)$ 消息通知 v_m 通向 v_k 的路径. 这里,要求 $v_m < v_k$ 是因为算法规定由 ID 号小的节点来决定是否与 ID 号大的节点连通. 如果 v_i .color == "Black" 且 $v_i < v_k$, 则 v_i 需要决定是否与 v_k 连通. 由于 v_i 目前只知道可以通过 v_j 连通 v_k , 并不知道是否存在其它更优的路径(由能量更高的节点组成的路径), 因此 v_i 先将 $[v_j, v_k]$ 作为一个记录存入表 List1 中. 如果表 List1 已经存放有通往 v_k 的路径记录 $[v_l, v_k]$, 则比较 v_l 和 v_j 的能量, 这里 v_l 为任意节点且 $v_l \neq v_i$. 如果 v_l 的能量 E_l 小于 v_j 的能量 E_j , 则将记录 $[v_l, v_k]$ 删除, 增加记录 $[v_j, v_k]$. 如果 v_i 是第一次接收到 dominatee1 消息(表现为表 List1 为空)且计时器 Timer 未启动, 则启动 Timer 等待 Δ 秒, 继续接收其他节点发来的 dominatee1 和 dominatee2 消息. 其中, Δ 秒是能保证节点接收完所有邻居发送来的 dominatee1 和 dominatee2 消息的时间间隔.

步骤 3 如果节点 v_i 接收到一个 $\text{dominatee2}(v_n, v_j, v_k)$ 消息, 首先查看自己的 color 属性. 如果 v_i .color == "Black" 并且 $v_i < v_k$, 则 v_i 需要决定是否与 2 跳以外的支配节点 v_k 连通. 为了选择连通 v_k 的能量均衡路径, v_i 先将 $[v_n, v_j, v_k]$ 作为一个记录存入一个表 List2 中. 如果表 List2 已经存放有其它通往 v_k 的路径记录 $[v_m, v_l, v_k]$, 则比较这 2 条路径的最小能量. 如果 $\min\{E_m, E_l\} < \min\{E_n, E_j\}$, 则将记录 $[v_m, v_l, v_k]$ 删除, 增加记录 $[v_n, v_j, v_k]$. 如果 v_i 是第一次接收到 dominatee2 消息(表现为表 List2 为空)且计时器 Timer 未启动, 则启动 Timer 等待 Δ 秒, 继续接收其他节点发来的 dominatee1 和 dominatee2 消息.

步骤 4 当 Timer 结束时, 节点 v_i 需要从表 List1 和表 List2 中确定连通其它支配节点的连接节点. 对于表 List1 中的每条记录 $[v_l, v_k]$, 将 v_l 加入一个集合 A 中. 由于 v_i 可以通过 v_l 与 v_k 连通, 则删除表 List2 中的记录 $[v_n, v_j, v_k]$. 对于表 List2 中的每条记录 $[v_n, v_j, v_k]$, 将 v_n, v_j 加入集合 A 中. 最后, 将 A 放入一个消息 $\text{connector}(A, 2)$ 中广播出去. 其中, connector 消息的第 2 个参数 "2" 代表 connector 消息将会被广播 2 次, 以使 v_i 的 2 跳邻居可以接收到这个消息. 如果节点 v_i 接收到一个 $\text{connector}(A, a)$ 消息, 先将 a 减 1. 如果 v_i 属于 A 并且 v_i .color == "Gray", 则 v_i 将从被支配节点转变为连接节点. 此时, v_i 把自己的 color 属性改为 "Black". 如果 $a \geq 1$, 则 v_i 继续广播消息 $\text{connector}(A, a)$.

4.3 性能分析

下面, 本节将对 EBCDS 算法的性能进行分析.

定理 1 EBCDS 第一个阶段结束时, 网络中的支配节点集合是一个最大独立集.

证明 根据 4.2 中 EBCDS 第一个阶段的算法描述可知, 当第一个阶段开始时, 每个节点 v_i 将与自己的邻居进行权值大小的比较. 如果节点 v_i 的权值 W_i 比邻居的权值都大(或者 W_i 等于邻居中的最大权值 W_j 且 $v_i < v_j$), 则节点 v_i 成为支配节点.

如果一个节点 v_i 成为支配节点, 则它的邻居将全部变为被支配节点. 因此, 任意 2 个支配节点不可能直接相连. 由此可以推断, 所有支配节点组成的集合是一个独立集. 对于网络中的所有节点, 如果不是支配节点, 则肯定是被支配节点. 对于任意一个被支配节点, 其邻居中肯定存在至少一个支配节点. 因此, 任意一个被支配节点变为支配节点, 会使得当前所有支配节点组成的独立集被破坏(产生了 2 个支配节点可以直接相连的情况). 因此, 所有支配节点组成的集合是一个最大独立集. 得证.

定理 2 假设 d 代表任意一个支配节点与离它最近的另一个支配节点之间的跳距, 则有 $2 \leq d \leq 3$.

证明 假设 S 是所有支配节点组成的集合. 根据定理 1 可知, S 是一个最大独立集. 对于 S 中的任意 2 个支配节点 v_i 和 v_j , 它们之间肯定不存在边. 因此, 有 $2 \leq d$. 对于任意一个支配节点, 最极端的情况是其 2 跳邻居内都没有其它支配节点, 而其 3 跳邻居内存在至少 1 个其它支配节点. 这是因为每个支配节点只能支配其 1 跳邻居, 如果其 2 跳邻居内都没有其它支配节点, 则 2 跳邻居肯定会被 3 跳邻居中的某个支配节点所支配. 因此, 有 $d \leq 3$. 得证.

定理 3 EBCDS 运行结束时, 所有的支配节点和连接节点组成一个连通支配集.

证明 根据定理 1, EBCDS 第一个阶段结束时, 网络中所有的支配节点组成一个最大独立集. 根据图论, 一个最大独立集肯定是一个支配集. 因此, 网络中所有的支配节点构成了一个支配集. 再根据定理 2, 任意一个支配节点与离它最近的另一个支配节点之间的跳距大于等于 2 而小于等于 3. 在 EBCDS 的第二个阶段, 任意一对 3 跳距离以内的支配节点, 由 ID 号小的支配节点来选择合适的非支配节点成为连接节点. 因此, 在 EBCDS 运行结束后, 所有的支配节点和连接节点将组成一个连通支配集. 得证.

定理 4 EBCDS 的消息复杂度为 $O(n \log n)$.

证明 为了保证网络连通, 节点的通信半径必须满足 $r \geq \frac{\sqrt{2}}{2} M \sqrt{\frac{1}{n} \log\left(\frac{n}{\delta}\right)}$ [11], 其中, δ 代表网络无法连通的概率. 由此, 可以得到节点的邻居数量为:

$$N_{\text{neighborhood}} \approx n\pi r^2 / M^2 \geq \frac{\pi}{2} \log\left(\frac{n}{\delta}\right) = O(\log n) \quad (6)$$

根据 4.2 中 EBCDS 在第一个阶段和第二个阶段的算法描述可知,对于每个节点 v_i ,如果它是支配节点,则会发送 2 次消息(一次声明自己为支配节点,一次将连接节点集合广播出去);如果它是被支配节点,则最多发送 $O(\log n)$ 次消息,其中广播 $\text{dominatee}(v_i)$ 消息 1 次,广播 $\text{dominatee1}(v_i, v_j)$ 消息 $O(\log n)$ 次(由 v_i 的邻居规模 $O(\log n)$ 决定),广播 $\text{dominatee2}(v_i, v_j, v_k)$ 消息 $O(\log n)$ 次(由 v_i 的邻居规模 $O(\log n)$ 决定).此外,如果 v_i 转变为连接节点将广播 $\text{connector}(A, a)$ 消息 1 次.因此,每个节点最多广播 $O(\log n)$ 条消息.由于网络中有 n 个节点,因此 EBCDS 消息复杂度为 $O(n \log n)$.得证.

5 实验结果与分析

为了进一步验证 EBCDS 的性能,本文在 Matlab7.1 平台上进行模拟仿真.仿真环境如下:在一个 100×100 平方米的正方形网络区域中,有一个静态 Sink 节点位于区域中心, n 个节点随机散布在正方形区域内.其它仿真参数的设置见表 1 所示.不失一般性,通过设置节点的通信半径为不同的值,观察节点在不同通信半径条件下算法的性能.选择 mr-CDS 作为对比,下面将在不同规模的网络中测试 2 个算法的性能,并取 20 次仿真实验的平均值作为实验的结果.

表 1 仿真参数

参数	参数值
网络区域大小	$100 \times 100 \text{m}^2$
Sink 节点坐标	(50, 50)
节点数量	100, 200, 300, 400
节点通信半径	25m, 35m
节点能量范围	[1, 1.5] Joule(J)
发射电路消耗的能量	$E_{\text{elec}} = 50 \text{nJ/bit}$
功率放大消耗的能量	$\epsilon_{\text{fs}} = 13 \text{pJ/bit/m}^2$
数据包大小	$k = 1000 \text{bits}$

5.1 分簇的效果

下面将在 $n = 100$ 的网络上分别运行 EBCDS 和 mr-CDS,观察它们产生的连通支配集情况.设置节点的通信半径 $r = 25 \text{m}$.实验结果如图 1 所示.

在图 1 中,小圈表示被支配节点,而中心带十字的小圈代表连通支配集里的节点(包括支配节点和连接节点),位于图中心的 * 符号表示 Sink 节点.可以看到, EBCDS 和 mr-CDS 均产生了覆盖全网的连通支配集.但是, mr-CDS 产生的连通支配集中有 29 个节点,而 EBCDS 产生的连通支配集中只有 18 个节点,连通支配集的规模更小.因为 mr-CDS 在产生支配节点后,连接节点的选择是由非支配节点来决定的.这样,在一对支配节点之间可能同时产生多个连接节点.而 EBCDS 中每对

支配节点间的连接节点,是由 ID 号较小的支配节点来确定的,由这个支配节点选择一个能量较高的节点作为连接节点.由于 EBCDS 产生的连通支配集的规模较少,则有更多非支配节点可进入休眠状态以保存能量.

5.2 生成连通支配集过程的能耗

分别在 $n = 100, 200, 300$ 和 400 的网络上运行 2 个算法,测试算法在生成连通支配集过程中令网络中所有节点耗费的能量的平均值.其中,节点的通信半径分别设为 $r = 25 \text{m}$ 和 $r = 35 \text{m}$.实验结果如图 2 所示.

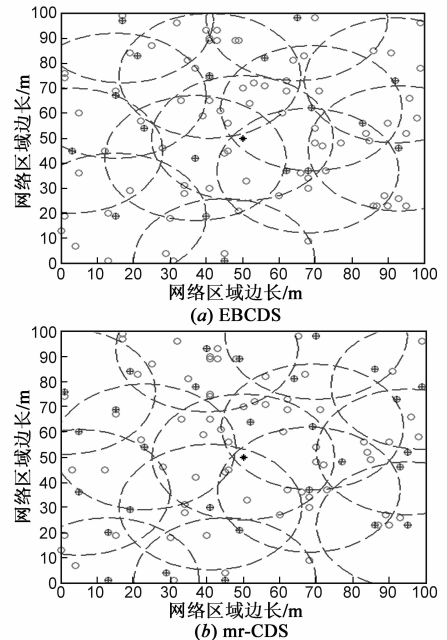


图 1 EBCDS 和 mr-CDS 分簇对比

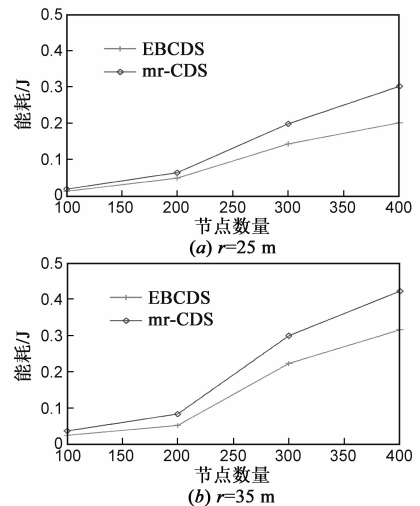


图 2 生成连通支配集过程的能耗对比

从图 2(a) 和图 2(b) 可以看到,当节点数量从 100 增加到 400 时, EBCDS 和 mr-CDS 的能耗均呈现递增趋势.这是因为在这 2 个算法中,节点需要接收邻居节点发送来的多条消息.因此,当网络规模增大时,节点的

邻居数量也随之增加,导致节点需要耗费更多的能量来接收更多来自邻居节点的消息。

对比图 2(a)和图 2(b),当节点通信半径增大时(从 25m 增加到 35m),2 个算法均需耗费更多的能量才能生成连通支配集.但是,无论网络规模和节点通信半径如何变化,EBCDS 的能量耗费都要低于 mr-CDS.这是因为 EBCDS 生成的连通支配集规模较小,无须进一步剪枝以消除冗余支配节点,因此节点能量得到有效保存。

5.3 网络生命周期对比

本节将测试 2 个算法所能获得的网络生命周期.在数据收集过程中,虽然节点在执行算法后能形成连通支配集,但节点并不知道选择哪条路径能以较小的能耗代价传送数据到 Sink 节点.目前有大量的算法通过将连通支配集中的节点构造成一棵以 Sink 为根的数据收集树来解决这个问题,在此不再专门进行讨论.为了满足可比性,算法采用与 mr-CDS 一样的 DV^[12]算法来构造数据收集树.在数据收集时,每个非支配节点将数据传送给自己邻居中能量最高的树上的节点,接着进入睡眠状态以保存能量.而树上的节点将对接收到的数据进行完全汇聚,然后传送一个大小为 1000bits 的数据包给自己的父亲节点.当 Sink 接收到所有孩子发送来的数据后,就完成了一轮的数据收集.实验结果如图 3 所示.从图 3 可以看到,在不同网络条件下,EBCDS 的网络生命周期均高于 mr-CDS 的网络生命周期.这是因为 EBCDS 在构造连通支配集时充分考虑了节点能量和节点度的关系,构造出规模较小且能量较高的连通支配集.这样,不仅有较多的非支配集节点可以传送数据给支配节点后马上进入睡眠状态以保存能量,而且支配集中的节点能量较高,能承担更多轮次的数据收集。

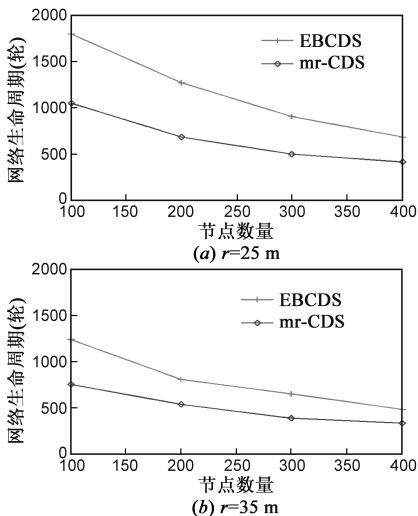


图3 网络生命周期对比

5.4 进一步讨论

为了进一步分析不同的节点能量水平以及不同的

传输数据量对算法性能的影响,在以上网络场景中,把节点的数据包大小调整为 1500bits,节点的能量范围调整为 $[0.5J, 1J]$.然后重新运行 EBCDS 和 mr-CDS 算法,实验结果如图 4 所示。

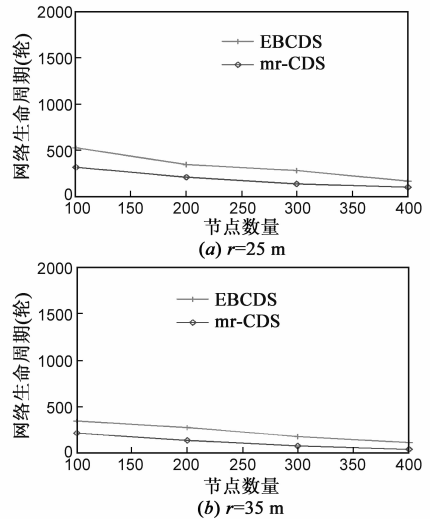


图4 节点能量和传输数据量改变后的网络生命周期对比

从图 4 可以看到,当节点的能量减少且节点传输的数据量增大时,2 个算法所获得的网络生命周期均有较大幅度地下降.这是因为传输的数据量增大后,节点需要耗费更多的能量进行数据通信;另一方面,节点的平均能量减少将使得节点的能量不足以维持长时间的数据收集.因此,网络生命周期变短.但是,从图 4(a)和图 4(b)可知,EBCDS 仍然能获得比 mr-CDS 更长的网络生命周期.因此,EBCDS 在不同的网络条件下,性能均优于 mr-CDS。

可见,EBCDS 具有较好的能量有效性,能有效延长网络生命周期.然而,由于 EBCDS 构造的支配集属于 1-连通、1-支配的支配集,因此 EBCDS 在可靠性方面的性能仍有待提高.EBCDS 与相关算法的性能对比,如表 2 所示:

表 2 不同算法的性能对比

算法	减少能耗的能力	可靠性
CDS-BD-D	中	低
GOC-MCDS-D	中	中
Wu_h	中	低
mr_CDS	较高	低
LDA	低	高
FT-CDS-CA	低	中
SSC	中	高
EBCDS	高	低

6 总结

本文针对在网络中构造连通支配集进行数据收集的问题进行研究.为了能均衡网络中节点的能量消耗

从而延长网络生命周期,提出一种分布式的算法 E-BCDS 来构造能量均衡的连通支配集.在 EBCDS 中,每个节点根据自己的能量水平和度计算出自身的权值.如果自身的权值大于邻居节点的权值,则该节点成为支配节点.每对支配节点之间,由 ID 号较小的那个支配节点选择能量高的节点担任连接节点.理论分析表明,EBCDS 能以较小的消息代价构造连通支配集,仿真实验表明,EBCDS 在生成连通支配集过程中比已有算法耗费更少的能量,同时获得了比已有算法更长的网络生命周期.未来,在实际的网络环境中设计能耗低且具有较高可靠性的数据收集算法将是我们下一步的研究方向.

参考文献

- [1] 郑婵,孙世新,黄天云. Ad Hoc 网络和无线传感器网络中连通支配集的分布式构造[J]. 软件学报, 2011, 22(5): 1053 - 1066.
Zheng C, Sun S X, Huang T Y. Constructing distributed connected dominating sets in wireless Ad Hoc and sensor networks[J]. Journal of Software, 2011, 22(5): 1053 - 1066. (in Chinese)
- [2] 郜帅,张宏科. 时延受限传感器网络移动 Sink 路径选择方法研究[J]. 电子学报, 2011, 39(4): 742-747.
Gao S, Zhang H K. Optimal path selection for mobile sink in delay-guaranteed sensor networks[J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(4): 742 - 747. (in Chinese)
- [3] Kim Donghyun, Wu Yiwei, Li Yingshu, et al. Constructing minimum connected dominating sets with bounded diameters in wireless networks[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2009, 20(2): 147 - 157.
- [4] Du Hongwei, Ye Qiang, Wu Weili, et al. Constant approximation for virtual backbone construction with guaranteed routing cost in wireless sensor networks[A]. In Proc. of the 30th IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM 2011)[C]. Shanghai, China; IEEE 2011. 1737 - 1744.
- [5] Khalid Ateyia M. Almahorg, Sagar Naik, Shen Xuemin. Efficient localized protocols to compute connected dominating sets for Ad Hoc networks[A]. In Proc of the IEEE Global Communications Conference (Globecom 2010)[C]. Miami, Florida, USA; IEEE 2010. 1 - 5.
- [6] Sajid Hussain, Mubashsharul I. Shafique, Laurence T Yang. Constructing a CDS-based network backbone for energy efficiency in industrial wireless sensor network[A]. In Proc of the 12th IEEE International Conference on High Performance Computing and Communications (HPCC 2010)[C]. Melbourne, VIC, Australia; IEEE 2010. 322 - 328.
- [7] Wu Yiwei, Li Yingshu. Construction algorithms for k-connected m-dominating sets in wireless sensor networks[A]. In Proc of the 9th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobiHoc 2008)[C]. New York, NY, USA: ACM, May 2008. 83 - 90.
- [8] Donghyun Kim, Wang Wei, Li Xianyue, Zhang Zhao, Wu Weili. A new constant factor approximation for computing 3-connected m-dominating sets in homogeneous wireless networks[A]. In Proc of the 29th IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM 2010)[C]. San Diego, CA, USA; IEEE Computer Society, 2010. 1 - 9.
- [9] M T Thai, Zhang N, R Tiwari, Xu X. On approximation algorithms of k-connected m-dominating sets in disk graphs[J]. Theoretical Computer Science, 2007, 385(1): 49 - 59.
- [10] Andreas Larsson, Philippas Tsigas. A self-stabilizing (k, r)-clustering algorithm with multiple paths for wireless Ad-hoc networks[A]. In Proc of the 31st International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS 2011)[C]. Minneapolis, MN, USA; IEEE 2011. 353 - 362.
- [11] V Mhatre, C Rosenberg. Design guidelines for wireless sensor networks: communication, clustering and aggregation[J]. Ad Hoc Networks, 2004, 2(1): 45 - 63.
- [12] R Malhotra. IP Routing[M]. O'REILLY, 2002.

作者简介



奎晓燕 女, 1980 年 10 月出生于云南玉溪. 工学博士, 讲师. 主要研究方向为无线传感器网络, 移动自组织网络.

E-mail: xykui@csu.edu.cn, kuixiaoyan@126.com



杜华坤 (通信作者) 男, 1977 年 7 月出生于云南镇雄. 讲师, 博士研究生. 主要研究方向为信号处理.

E-mail: hkdu@csu.edu.cn



梁俊斌 男, 1979 年 3 月出生于广西壮族自治区南宁市. 工学博士, 副教授, 硕士生导师. 主要研究方向为无线传感器网络.

E-mail: liangjb2002@163.com