

WSNs 中基于能量代价的最小权和支配集拓扑控制算法

孙超 尹荣荣 郝晓辰 刘彬
(燕山大学信息科学与工程学院 秦皇岛 066004)

摘要: 该文针对无线传感器网络中最小连通支配集拓扑并非网络耗能最小拓扑的问题, 定义由节点剩余能量, 邻居个数和通信代价构建的能量代价函数综合反映支配节点的能量效率以及对降低网络整体能耗的贡献, 进而以其作为拓扑权值, 提出一种基于能量代价的最小权和连通支配集拓扑控制算法。算法选取局部最小权值节点担负支配任务, 搭建整体权和最小的支配集, 最小化网络整体能耗。实验结果表明, 算法不仅具有节能的特点, 还确保了通信链路的可靠性, 有效延长了网络生命周期。

关键词: 无线传感器网络; 拓扑控制; 能量代价; 最小权和连通支配集

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)04-0857-07

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2009.00342

Energy Cost Based Topology Control Algorithm of Minimum-Total-Weight Connected Dominating Set in WSNs

Sun Chao Yin Rong-rong Hao Xiao-chen Liu Bin

(Institute of Information Technology and Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: In this paper, defining energy cost function constructed by remain energy, neighborhood numbers and communication cost of nodes as topology weight to synthetically reflect the energy efficiency of dominator and the contribution of reduced whole energy consumption, an Energy Cost based topology control algorithm for Minimum-total-weight Connected Dominating Set (ECMCDs) is proposed to solve the problem that the energy consumption of minimum connected dominating set is not minimum. The algorithm locally selects the node with a low-weight undertaking dominating mission to construct minimum-total-weight dominating set, and minimums the total energy consumption of networks. The experimental results show that the algorithm not only has the energy saved characters, but also ensures the reliability of topology links and extends the network life-cycle efficiently.

Key words: Wireless sensor network; Topology control; Energy cost; Minimum-total-weight connected dominating set

1 引言

无线传感器网络(Wireless Sensor Networks, WSNs)是由大量随机分布的微型传感器节点以自组织方式构成的无线网络, 由于它可“随时随地”感知物理世界的变化, 其潜在的市场需求十分巨大, 引起了人们的高度关注^[1,2]。

拓扑控制是 WSNs 中的基础性研究课题, 对路由优化、能量保护和资源分配具有重要作用^[3,4]。其中, 基于最小连通支配集的拓扑算法通过最小化网络支配集大小, 增加周期性处于睡眠状态的工作节点数, 大幅度地降低了网络能量消耗, 是拓扑控制的一种有效方法^[5]。因此, 目前绝大多数的研究者对如何构建尽可能小的连通支配集进行了研究并提出了大量拓扑控制算法和机制, 以实现网络最小能耗拓扑近似。

文献[6,7]以邻居个数作为拓扑构建权值, 搭建

了常数近似率的网络连通支配集, 能够保证构建的连通支配集具有较小规模, 但因没有考虑支配节点能量对网络性能的影响, 以致存在低能节点担当支配任务过早失效, 网络能量利用率低的不足。针对节点能量大小对网络支配节点的选择影响, 文献[8,9]以节点剩余能量作为权值, 在保证常数近似率的同时优先选择高能量的节点充当支配节点, 在一定程度上, 提高了网络能量有效性, 且文献[9]提出的 ICDS 算法, 还能够保证上层路由的高效性, 但两者都忽略了支配节点与其所支配邻节点间的通信代价问题, 存在通信代价高的支配节点过早失效的局限, 且上述各算法皆仅从睡眠调度机制^[10]理论出发, 认为网络支配集越小, 则处于工作状态的节点越少, 网络总能耗也就越小, 用最小连通支配集近似网络最小能耗拓扑, 过于片面。针对最小连通支配集并非网络全局最优拓扑, 文献[11]从网络整体的角度构建了最小权和连通支配集以保证网络全局最优, 但却未同时考虑单个节点的能量优化问题, 以致支配

节点负载不均衡,网络仍存在支配节点过早失效的弊端,且其仅定义了一般意义的权值,并以生成树方式简化支配集大小,算法复杂性较高而不易实现。

针对目前构建网络最小能耗拓扑之不足,本文同时综合节点和网络两个方面搭建低能耗网络连通支配集拓扑结构。通过充分考虑节点剩余能量、邻居个数和通信代价对选取低能耗网络支配节点的影响,以能量代价为新的拓扑构建权值,提出分布式拓扑控制算法 ECMCDS (Energy Cost based Minimum-total-weight Connected Dominating Set),构建了最小权和连通支配集,在有效利用各节点自身能量的同时最小化网络整体能耗。实验结果表明,该算法在保证网络连通性和可靠性的前提下,实现了延长网络生命周期的目的。

2 理论基础

2.1 基本概念

通常情况下,WSNs 的监测区域可以抽象为一个 2 维平面图 $G(V, E)$, 其中, V 为点集, E 为边集, 分别表示无线传感器网络中节点及任意两节点间的通信链路集合。为了方便后续拓扑算法理论描述, 这里首先给出一些相关的基本概念。

定义 1 连通支配集和最小连通支配集: 图 $G(V, E)$ 一个节点子集 C 若满足, $\forall u \in V - C$ 至少存在一个邻节点 $v \in C$, 且由 C 导出的子图为连通图, 则称 C 为连通支配集; 图 $G(V, E)$ 所有连通支配集中, 节点个数最少的连通支配集 S 称为最小连通支配集。

定义 2 独立集和极大独立集: 图 $G(V, E)$ 的一个节点子集 M 若满足, M 中不存在任何相邻节点, 则称 M 为独立集; 若添加任何一个节点到独立集 M 中, M 将不再是独立集, 则称 M 为极大独立集 MIS (Maximum Independent Set)。

定义 3 最小权和连通支配集: WSNs 中各节点皆具有一个权值 Weight, 以评价节点某一特性。若图 $G(V, E)$ 的一个连通支配集 C 满足, $G(V, E)$ 的所有连通支配集中 C 具有权值之和最小的性质, 则称 C 为最小权和连通支配集。

2.2 权值确定

WSNs 拓扑控制的首要目标就是最大化网络生命周期, 而通常网络生命周期的衡量以能量最先耗尽的传感器节点为基准^[12]。对于基于连通支配集构建拓扑的 WSNs 而言, 由于担负支配任务的节点需长期处于工作状态以即时转发网络信息, 能耗远远大于能够周期性地进入睡眠和工作状态的非支配节点。因此, 合理的支配集构建对于延长网络生命期

至关重要。

为了构建网络最小能耗拓扑, 本文从单个节点和整个网络综合的角度, 设定了新的拓扑构建权值能量代价——节点成为支配节点后自身能量效率及其对降低网络总能耗所做贡献的综合指标——能量代价越低, 节点越适合担当支配节点。并基于最小权和支配集思想, 提出了网络最小能耗拓扑控制算法 ECMCDS, 下面具体给出能量代价函数的构建过程。

从单个节点的角度出发, 选取剩余能量大, 通信代价小的节点为支配节点, 能够有效使用网络中各节点的能量资源, 从而可大大延长网络拓扑的重构时间, 有利于最大化网络生命周期; 从整个网络的角度出发, 选取邻居节点多的节点为支配节点, 可最小化处于工作状态的节点数目, 有利于降低网络的总能耗, 易于延长网络生命周期。所以, 综合考虑节点剩余能量、通信代价和邻居个数对选取网络支配节点的影响, 网络中任意节点 u 的能量代价 $E_{\text{Cost}}(u)$ 可用式(1)表示。

$$E_{\text{Cost}}(u) = \frac{\text{Cost}(u)}{n(u) \cdot E_{\text{remain}}(u)} \quad (1)$$

其中 $n(u)$ 代表节点 u 的邻居个数; $E_{\text{remain}}(u)$ 代表节点 u 的剩余能量; $\text{Cost}(u)$ 代表节点 u 的通信代价。

由式(1)可见, 网络中任意节点 u , 若其邻居个数越多, 剩余能量越大, 通信代价越小, 则其能量代价 $E_{\text{remain}}(u)$ 越小。进一步考虑到节点间通信链路质量越好, 直接通信邻节点的剩余能量越大, 网路信息重发率就越低, 节点间通信代价也就越小, 本文定义网络中任意两个直接通信节点 u 和 v_i 间的通信代价 $\text{Cost}_{(u, v_i)}$ 如式(2)所示。

$$\text{Cost}_{(u, v_i)} = \frac{W_{P_1}}{\text{LQ}_{(u, v_i)}} \cdot \frac{E_{\text{initial}}(v_i)}{E_{\text{remain}}(v_i)} \quad (2)$$

其中 W_{P_1} 代表节点 u 发射功率为 P_1 时发送 1 bit 数据的功耗; $\text{LQ}_{(u, v_i)}$ 代表节点 u 和 v_i 间的链路质量; $E_{\text{initial}}(v_i)$ 代表节点 v_i 的初始能量。

由式(2)可见, 合理的链路质量度量指标对于选择通信链路, 构建有效网络拓扑尤为重要^[13]。文献[14]对目前常用的 3 种链路质量度量标准进行了比较得出, 随着接收信号强度值 RSSI 的增大, 收包率呈指数上升趋势, 且当 RSSI 到某一阈值 RSSI_{th} , 收包率能够达到期望要求的结论。基于此, 本文以 RSSI 度量通信链路质量, 将其代入式(2), 则网络中具有 n 个直接通信邻节点的节点 u 的通信代价 $\text{Cost}(u)$ 可用式(3)表示。

$$\text{Cost}(u) = W_{P_1} \sum_{i=1}^n \frac{E_{\text{initial}}(v_i)}{\text{RSSI}_{(u, v_i)} \cdot E_{\text{remain}}(v_i)} \quad (3)$$

其中 $RSSI_{(u,v_i)}$ 是节点 u 与通信邻节点 v_i 间的接收信号强度值。

对于同构网络而言,网络中所有节点皆具有一致的最大发射功率 P_{\max} 和相同的初始能量 E_{initial} ,从而将式(3)代入式(1)可得节点 u 的拓扑构建权值 $E_{\text{Cost}}(u)$:

$$E_{\text{Cost}}(u) = \frac{W_{P_1} \cdot E_{\text{initial}} \cdot \sum_{i=1}^n 1 / (RSSI_{(u,v_i)} \cdot E_{\text{remain}}(v_i))}{n(u) \cdot E_{\text{remain}}(u)} \quad (4)$$

3 ECMCDS 算法

ECMCDS 算法主要由 3 部分组成,分别为 MIS 构建及优化、连接节点选择和拓扑生成。

3.1 MIS 构建及优化

网络中各节点皆存在一个状态标识位 estate (0_未处理节点, 1_非支配节点, 2_支配节点, 3_连接节点), 接收信号强度阈值 $RSSI_{\text{th}}$ 和唯一标识号 ID, 并都能感知自身剩余能量 E_{remain} 。

(1)邻居信息交换 网络中各节点初始 estate 标记皆为 0, 并都以最大发射功率 P_{\max} 发送 Hello 信息包, 包括节点 ID, estate 和 E_{remain} 。收到 Hello 信息包的节点, 将满足 $RSSI \geq RSSI_{\text{th}}$ 的邻节点信息依次存入邻居信息列表(表 1), 并由式(4)计算自身权值 E_{Cost} , 与其 ID 一并打包发送权值交换信息, 收到权值交换信息的节点, 存储相应邻节点权值于 E_{Cost} 栏, 至此, 信息交换结束。

表 1 邻居信息列表

ID	estate	E_{remain}	RSSI	E_{Cost}
----	--------	---------------------	------	-------------------

(2)MIS 构建 网络中各节点依据其建立的邻居信息列表自行决定成为支配节点或非支配节点:

步骤1 estate 标记为 0 的节点, 若自身权值小于邻居信息列表中所有 estate 标记为 0 的邻节点权值或其邻居信息列表中不存在 estate 为 0 的节点, 则其成为支配节点, 并发送支配信息, 包括自身 ID 和 estate 状态。

步骤2 接收到支配信息的节点成为非支配节点, 并修改邻居信息列表中相应接收的邻节点 estate 状态, 同时发送被支配信息, 包括自身 ID 和 estate 状态。

步骤3 接收到被支配信息的节点, 修改邻居信息列表中相应接收的邻节点 estate 状态。

执行上述操作, 直到网络中无 estate 标记为 0 的节点为止。

(3)MIS 优化 为确保支配节点在其局部范围内皆具有较小权值, 本文对已构建的 MIS 结构进行优化。优化原则: 已选取的支配节点, 若其两跳内的邻节点中存在满足较自己权值小且能够覆盖自身和其邻居信息列表中所有节点的邻节点(邻节点组)时, 自己退为非支配节点, 并发送替代信息包, 包括其 ID, estate 和替代邻节点(邻节点组)ID。接收到替代信息包的邻节点, 若其 ID 包含于替代邻节点(邻节点组中节点)ID 中, 则成为支配节点, 并存储邻居信息列表中相应接收的邻节点 estate 状态, 否则仅存储邻居信息列表中相应接收的邻节点 estate 状态即可。

3.2 连接节点选择

为了搭建一个数据转发的优化网络结构, 连接节点的选取需满足如下 3 个条件: (1)最小化连接节点集规模; (2)最小化连接节点集权和; (3)保证任意两个支配节点间皆存在常数倍最短跳数路径。具体实现步骤如下。

步骤 1 网络中各节点依次转存其邻居信息列表中 estate 标记为 2 的邻节点 ID 和相应权值 E_{Cost} 于其 1 跳远支配节点信息列表(表 2)。其中, estate 标记为 1 的节点, 需发送 1 跳远支配节点信息包, 包括自身 ID, E_{Cost} 和 1 跳远支配节点信息列表中的 ID 集。

表 2 1 跳远支配节点信息列表

ID(1_d)	$E_{\text{Cost}}(1_d)$
---------	------------------------

步骤 2 收到 1 跳远支配节点信息的节点, 将接收的 ID 集中不存在于自身 1 跳远支配节点信息列表中的节点 ID 存储到其 2 跳远支配节点信息列表(表 3), 并修改两节点间权值最小的连接节点 estate 状态, 同时存储其 ID(c)和权值 $E_{\text{Cost}}(c)$ 。

表 3 2 跳远支配节点信息列表

ID(2_d)	ID(c)	$\min E_{\text{Cost}}(c)$
---------	-------	---------------------------

步骤 3 estate 标记为 1 的节点, 发送其 2 跳远支配节点信息包, 包括其自身 ID、权值和其 2 跳远支配节点信息列表中的 ID 集。 estate 标记为 2 的节点, 若收到 2 跳远支配节点信息, 将接收到的 ID 集中不存在于其 2 跳远支配节点信息列表中的节点 ID 存储到其 3 跳远支配节点信息列表(表 4), 并存储相应权和最小的连接节点组信息, 包括相距 1 跳远的连接节点 ID(1_c), 相距 2 跳远的连接节点 ID(2_c) 和最小权和 $\min TE_{\text{Cost}}(cs)$ 。其中, $\min TE_{\text{Cost}}(cs)$ 如

表 4 3 跳远支配节点信息列表

ID(3_d)	ID(1_c)	ID(2_c)	min TE _{Cost} (CS)
---------	---------	---------	-----------------------------

式(5)所示,同时修改相应连接节点 estate 状态。

$$\min TE_{Cost}(cs) = \min\{E_{Cost}(1_c) + E_{Cost}(2_c)\} \quad (5)$$

如此,网络中所有相距 2 跳(或 3 跳)远的支配节点间皆确定了唯一虚拟通信链路:支配节点 ↔ 权值最小的连接节点(连接节点组) ↔ 支配节点。

3.3 拓扑生成

为了进一步降低网络能耗,本文在网络拓扑生成阶段放弃了相对能量代价较大的虚拟通信链路的构建,判断依据具体描述如下。

依据 1: 网络中相距 2 跳远的支配节点 u 和 v , 若存在公共支配节点 w 符合下述两种情况之一,则放弃虚拟通信链路 $u \leftrightarrow x, x \leftrightarrow v$ 的构建,同时连接节点 x 退为非支配节点。

情况 1: w 节点是节点 u 和 v 的一跳支配节点。

情况 2: w 节点是节点 u (或 v)的一跳支配节点,节点 v (或 u)的两跳支配节点,且 u, v 虚拟通信链路上的连接节点权值大于 w, v (或 w, u)虚拟通信链路上连接节点权值。

依据 2: 网络中相距 3 跳远的支配节点 u 和 v , 若存在公共的支配节点 w 符合下述 3 种情况之一,则放弃其虚拟通信链路 $u \leftrightarrow x \leftrightarrow y \leftrightarrow v$ 中链路 $x \leftrightarrow y$ 的构建,同时连接节点 x, y 退为非支配节点。

情况 1: w 节点是节点 u 和 v 的一跳支配节点。

情况 2: w 节点是节点 u (或 v)的一跳支配节点,节点 v (或 u)的两跳支配节点,且 u, v 虚拟通信链路上的连接节点组权和 $E_{Cost}(x) + E_{Cost}(y)$ 大于虚拟链路 w, v (或 w, u)连接节点权值。

情况 3: w 节点是节点 u 和 v 的两跳支配节点,且 u, v 虚拟通信链路上连接节点组权和 $E_{Cost}(x) + E_{Cost}(y)$ 大于虚拟通信链路 w, v 和 w, u 上连接节点权值之和。

4 性能分析

4.1 理论证明

性质 1 若 $G(V,E)$ 是连通的,则 $G_{ECMCDS}(V, E_{ECMCDS})$ 也是连通的。

证明 由 MIS 构建可知,ECMCDS 拓扑中每个非支配节点皆至少存在一个相邻支配节点,那么,当 $G(V,E)$ 连通时,要证明 $G_{ECMCDS}(V, E_{ECMCDS})$ 的连通性,只需证明 ECMCDS 拓扑中支配节点和连接节点所形成的支配集是连通支配集即可。通过连接节点选择阶段,网络中所有相距 2 跳远或 3 跳远的支配节点间皆确定了唯一虚拟通信链路,而对于网

络支配节点集中任意两个节点,都可以细化为有限个相距 2 跳(或 3 跳)通信链路之和,且在拓扑优化阶段并未破坏其网络连通性,所以,由定义 1 易得,ECMCDS 拓扑是连通的。证毕

性质 2 $G_{ECMCDS}(V, E_{ECMCDS})$ 骨干网权和至多为 k 倍的最小权和连通支配集。其中, $k = \min(18 \lg(\alpha + 1), 4\beta + 1) + 2, \beta = \max_{i,j \in E} E_{Cost}(i) / E_{Cost}(j) \alpha = \max_{u \in V} N(u)$ 。

证明 设 OPT 为网络最小权和连通支配集,其权和以 opt 表示。本文通过从 ECMCDS 骨干网形成的过程论证该性质的正确性。

(1) MIS 构建阶段 假设节点 u 是 OPT 上节点,则在 ECMCDS 拓扑中节点 u 或为支配节点,或为非支配节点。若节点 u 为支配节点,则由节点 u 的一般性可得,ECMCDS 骨干网权和等同于最优权和 opt ; 若节点 u 为非支配节点,因其至多存在 5 个独立邻节点^[15],由 MIS 构建依据可得,至少存在一个独立邻节点其权值小于 $E_{Cost}(u)$ 成为支配节点,而其余独立节点权值至多为 $\beta E_{Cost}(u)$,所以节点 u 的相邻独立节点组的权和至多为 $(4\beta + 1)E_{Cost}(u)$,由 u 的一般性,推广到整个 OPT 中,易见,ECMCDS 拓扑中 MIS 权和至多为 $(4\beta + 1) \cdot opt$ 。

(2) MIS 优化阶段 假设支配节点 u 经贪婪算法,在其两跳内邻节点中找到了满足 MIS 优化原则的替代支配节点子集 $G_{sub}(u)$,其权和至多为 $E_{Cost}(u)$,由于贪婪算法生成的满足覆盖区域的支配集大小至多为 $\lg a$ 倍的最优支配集,其中, a 为覆盖区域节点数目。因此, $E_{Cost}(G_{sub}(u)) \leq \lg(\alpha + 1) \cdot E_{Cost}(G_{lopt}(u))$ 。其中, $G_{lopt}(u)$ 是节点 u 的局部最优替代支配节点集。假设 $G_{topt}(u) = OPT \cap N_2(u)$,易见, $E_{Cost}(G_{lopt}(u)) \leq E_{Cost}(G_{topt}(u))$ 。考虑到单位圆模型中,任意节点 u 的 2 跳内独立节点数至多为 18 ^[15],所以 $\sum_{u \in MIS} E_{Cost}(G_{topt}(u)) \leq 18 \cdot opt$ 。即 ECMCDS 骨干网中 MIS 权和至多为 $\min(4\beta + 1, 18 \lg(\alpha + 1)) \cdot opt$ 。

(3) 连接节点选取阶段 假设 $G(V,E)$ 中 $u_1 v_2 \dots v_n v$ 是节点 u 和 v 间能量代价最小链路,由于 $G_{ECMCDS}(V, E_{ECMCDS})$ 拓扑中任何非支配节点皆至少存在一个支配节点与其相邻,所以记 u_1, u_2, \dots 为非支配节点 $v_1, v_2 \dots$ 的相应支配节点。考虑到 $G_{ECMCDS}(V, E_{ECMCDS})$ 骨干网中任意相距 3 跳内的支配节点间皆选取了权和最小的连接节点(连接节点组)构建通信链路,所以, $E_{Cost}(u_i u_{i+1}) \leq E_{Cost}(v_i) + E_{Cost}(v_{i+1}), 1 \leq i \leq n$,因此, $G_{ECMCDS}(V, E_{ECMCDS})$ 骨干网中连接节点权和至多为 $2opt$,即 $G_{ECMCDS}(V, E_{ECMCDS})$ 骨干网权和至多为 k 倍的最小权和连通支配集,其中

$k = \min(18 \lg(\alpha + 1), 4\beta + 1) + 2$ 。 证毕

性质3 ECMCDS算法的消息复杂度和时间复杂度皆为 $O(n)$ 。

证明 ECMCDS 中各传感器节点至少需发送 Hello 信息包、权值交换信息包和支配信息包(被支配信息包), 来建立其邻居信息列表并确定自身状态。但支配节点至多仅需发送 4 个信息包, 即部分支配节点还需发送替代信息包优化 MIS 结构; 而非支配节点也至多仅需发送 5 个信息包, 即为了确保 3 跳内支配节点间皆建立权和最小的通信链路, 非支配节点还需发送其 1 跳(和 2 跳)远支配节点信息包。因此, ECMCDS 算法总的消息复杂度为 $O(n)$ 。ECMCDS 中节点需依据自身相对于其邻节点权值大小来确定状态(支配节点或非支配节点), 在最坏情况下, 节点之间按照权值大小依次排列, 则最后一个节点需等待前 $n-1$ 个节点确定状态后才能确定状态, 因此该阶段的时间复杂度为 $O(n)$; 连接节点确定过程中, 每个非支配节点需 $O(\Delta)$ 时间建立其 1 跳(和 2 跳)支配节点信息列表, 其中, Δ 是网络中节点的最大邻居节点个数。同样, 支配节点也需 $O(\Delta)$ 时间来收集 1 跳(和 2 跳)支配节点信息包, 该阶段时间复杂度为 $O(2\Delta)$ 。因此, ECMCDS 算法总的时间复杂度为 $O(n + 2\Delta)$, 即 $O(n)$ 。 证毕

4.2 实验分析

为了进一步明确拓扑构建中引入邻节点个数、链路质量估计和通信代价所带来的优势, 本文设计了两类实验: 一类是 $RSSI_{th}$ 确定; 另一类是 ECMCDS 和 ICDS 拓扑在近似度、链路可靠性及网络生命周期 3 方面的对比分析。

实验1 户外随机布撒 2 个传感器节点, 通信范围皆为 200 m, 初始发射功率为 3.5 dBm, 信道噪声 P_n 为 -106 dBm, 噪声带宽 B 为 400 kHz, 数据率 R 为 250 kbps, 数据包长 l 为 1000 bit。一个节点直接与基站相连作为数据接收方, 另一个作为发送方, 两者距离每增加 1 m, 记录一组 RSSI 和 PRR, 一段时间后节点互换, 重复上述实验, 最终

得到 PRR 与 RSSI 的变化关系如图 1 所示。

由图 1 可见, PRR 随 RSSI 值递增呈现上升趋势, 且当 RSSI 大于 -86 dBm 后, PRR 皆处于 0.8 之上, 所以, 本文以 -86 dBm 为 RSSI 阈值作为 ECMCDS 拓扑构建门限, 以避免不可靠通信链路的构建。

实验2 采用 MATLAB 仿真工具, 在 $1000 \text{ m} \times 1000 \text{ m}$ 的被测区域内, 随机布撒 N 个节点, 通信范围皆为 200 m, 各节点初始发射功率为 3.5 dBm, 参考距离 d_0 为 1 m, d_0 处的路径损耗 $PL(d_0)$ 为 10 dBm, 路径损耗指数 n' 取 3.5, 阴影衰落方差为 4, 信道噪声 P_n 为 -106 dBm, 噪声带宽 B 为 400 kHz, 数据率 R 为 250 kbps, 数据包长 l 为 1000 bit, 数据融合耗能 E_{DA} 为 5 nJ/bit/signal, 放大器的功放倍数 ϵ_{amp} 为 100 pJ/bit/m², $RSSI_{th}$ 为 -86 dBm, 在保证初始网络连通的前提下, 分别执行 ECMCDS 和 ICDS 算法搭建网络拓扑。

4.2.1 近似度对比分析 近似度通常由网络中骨干节点数占总节点数的百分比表示。网络骨干节点越少意味着能够处于睡眠状态的节点越多, 网络近似度越小, 从而, 网络总能耗也越小。

分别执行 ECMCDS 和 ICDS 算法各 20 次, 其中, N 以 10 为步进长度, 测试区间为 [80, 160]。相应测得网络近似度与总节点个数 N 的关系曲线如图 2 所示。

由图 2 可见, 随着网络节点个数的增加, ECMCDS 和 ICDS 拓扑的近似度皆呈下降趋势, 表明基于连通支配集的拓扑控制算法在节点密集部署的监测环境中, 更利于降低网络能耗。此外, ECMCDS 拓扑相对 ICDS 拓扑近似度明显降低, 大大增加了网络中处于睡眠状态的节点, 更利于延长网络生命周期。

4.2.2 链路可靠性对比分析 高质量的数据传输是无线网络拓扑设计的基本要求, 网络通信链路上的收包率是直接反映链路信息通信质量的指标, 链路的收包率高, 表明实际通信过程中该链路上信息包

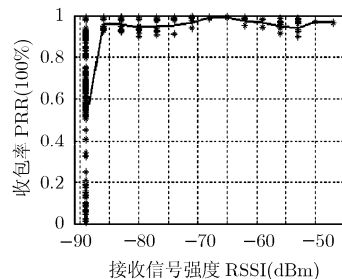


图1 PRR 和 RSSI 的变化关系

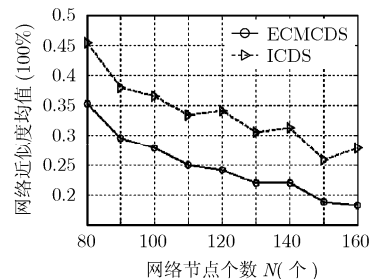


图2 ECMCDS 和 ICDS 拓扑近似度对比

的丢失量小, 信息传输的质量高; 反之, 链路的收包率低, 则表明实际成功接收的信息包少, 甚至链路无法实现信息的成功传输。

分别执行 ECMCDS 算法、ICDS 算法各 20 次, 统计其所搭建的拓扑链路收包率均值, 结果如图 3, 图 4 所示。

对比图 3, 图 4 可知, ECMCDS 算法构建的拓扑中有 50% 以上的链路 PRR 都达到 0.95 以上, 且不存在 PRR 低于 0.8 的通信链路, 故信息传输的链路可靠性能得以很好的保证这也验证了算法设计中 RSSI 阈值选取的正确性。而 ICDS 算法以距离衡量链路通信质量, 高质量的链路数明显低于 ECMCDS 拓扑, 甚至存在 PRR 低于 0.5 的链路。可见, ECMCDS 拓扑链路可靠性明显优于 ICDS。

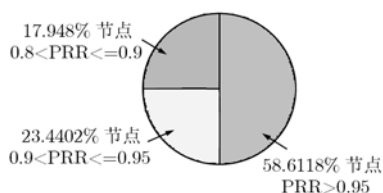


图 3 ECMCDS 拓扑链路可靠性分析

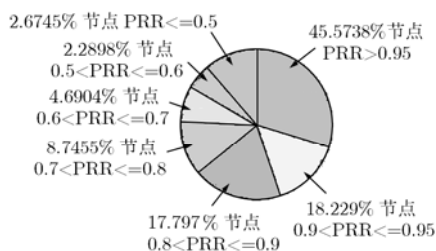


图 4 ICDS 拓扑链路可靠性分析

4.2.3 网络生命期对比分析 延长网络生命期是拓扑构建的首要目标。考虑到基于连通支配集思想搭建的网络拓扑, 其支配节点能耗远大于非支配节点, 所以, 支配节点同其所有邻居节点进行信息通信的轮数, 在一定程度上能够反映网络生命期的长短。

在 N 取值 [80, 160] 内, 每增加 10 个节点, 统计 20 次 ECMCDS 和 ICDS 拓扑中支配节点与其邻节点通信的最小轮数, 可得网络生命期均值与总节点个数 N 的关系曲线如图 5 所示。

由图 5 可见, 随着 N 的递增, 由于支配节点负载增大, ECMCDS 和 ICDS 拓扑中支配节点与其邻节点通信轮数相应减小, 但在 N 的不同取值下, ECMCDS 拓扑通信轮数皆远远大于 ICDS 拓扑, 有效实现了延长网络生命期的目的。

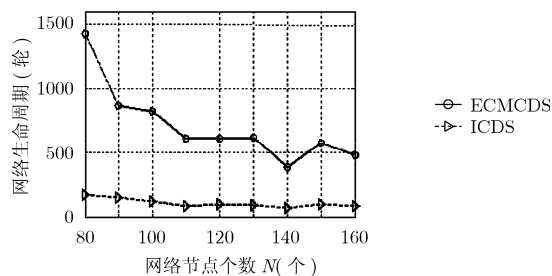


图 5 ECMCDS 和 ICDS 拓扑生命周期对比

5 结论

针对最小连通支配集算法构建的网络拓扑能耗并非最优, 本文设计了新的拓扑构建权值能量代价函数, 并提出分布式最小权和连通支配的拓扑算法 ECMCDS。理论分析得出, 该算法不仅具有线性复杂度, 且在保证网络连通性的同时搭建了权和最小的拓扑结构, 并通过与 ICDS 算法实验对比分析得出, 无论网络节点个数 N 取何值, ECMCDS 拓扑在网络近似度、链路质量及网络生命周期 3 方面皆优于 ICDS 拓扑。

参考文献

- [1] 任丰原, 黄海宁, 林闯. 无线传感器网络[J]. 软件学报, 2003, 14(7): 1282-1291.
Ren F Y, Huang H N, and Lin C. Wireless sensor networks[J]. *Journal of Software*, 2003, 14(7): 1282-1291.
- [2] Yao K. Sensor networking: Concepts, applications, and challenges[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2006, 32(6): 839-845.
- [3] Zhao T, Cai W D, and Liu G. Topology control for wireless sensor networks[C]. 2007 IFIP International Conference on Network and Parallel Computing Workshops, NPC 2007. Dalian, China. Sep 18-21 2007: 343-348.
- [4] Jardosh S and Ranjan P. A survey: Topology control for wireless sensor networks[C]. International Conference on Signal Processing Communications and Networking, ICSCN 2008, Chennai, India, Jan 4-6 2008: 422-427.
- [5] Navid N and Christian B. Topology management for improving routing and network performances in mobile ad hoc networks[J]. *Mobile Networks and Applications*, 2004, 9(6): 583-594.
- [6] Ruan L, Du H W, and Jia X H, et al. A greedy approximation for minimum connected dominating sets[J]. *Theoretical Computer Science*, 2004, 329(1): 325-330.
- [7] Qian J S and Sun Y J. Construction of distributed connected dominating sets in growth-bounded graphs[C]. 2008 3rd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, ICIEA 2008, Singapore, Singapore, Jun 3-5 2008: 1430-1434.
- [8] 唐勇, 周明天. 基于极大独立集的最小连通支配集的分布式算法[J]. 电子学报, 2007, 35(5): 868-874.
Tang Y and Zhou M T. Maximal independent set based

- distributed algorithm for minimum connected dominating set[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2007, 35(5): 868-874.
- [9] Khaled A, Li X Y, and Wang Y, *et al.* Geometric spanners for wireless ad hoc networks[J]. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2003, 14(4): 408-421.
- [10] Zhu J H, Li J Z, and Liu Y, *et al.* Data-driven sleeping scheduling mechanism in sensor networks[J]. *Computer Research and Development*, 2008, 45(1): 172-179.
- [11] Wang Y, Wang W Z, and Li X Y. Efficient distributed low-cost backbone formation for wireless networks[J]. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2006, 17(7): 681-693.
- [12] Slama I, Jouaber B, and Zeghlache D. Adaptive lifetime maximization strategies for wireless sensor networks[C]. 2007 2nd International Symposium on Wireless Pervasive Computing. San Juan, PR, United States. 2007: 88-92.
- [13] Sun P G, Zhao H, and Pu M, *et al.* Evaluation of communication link in wireless sensor networks[J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2008, 29(4): 500-503, 520.
- [14] Marco Z and Bhaskar K. Analyzing the transitional region in low power wireless links[C]. 2004 First Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor and Ad hoc Communications and Networks, IEEE SECON 2004. Santa Clara, CA, United States. Oct 4-7 2004: 517-526.
- [15] Li X Y and Wan P J. Theoretically good distributed CDMA/OVSF code assignment for wireless ad hoc networks[C]. 11th Annual International Conference on Computing and Combinatorics, COCOON 2005. Kunming, China. Aug 16-29 2005: 126-135.
- 孙 超: 男, 1983 年生, 博士生, 研究方向为无线传感器拓扑控制、路由协议。
- 尹荣荣: 女, 1985 年生, 硕士生, 研究方向为无线传感器拓扑控制。
- 郝晓辰: 男, 1980 年生, 副教授, 研究方向为无线传感器跨层拓扑控制。
- 刘 彬: 男, 1953 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为智能传感器设计、无线传感器网络。