

## 基于最小连通支配集的无线传感网拓扑构建研究

洪 榛 俞 立\* 张贵军 陈友荣  
(浙江工业大学信息工程学院 杭州 310023)

**摘 要:** 基于通信虚拟主干网的拓扑构建是关闭冗余节点, 节省全网能耗的有效方法。该文将全连通网络环境下寻找最优虚拟主干网问题抽象转化成最小连通支配集求解问题(MCDS), 并建立了基于混合整数规划的数学模型(NMIP-MCDS)。NMIP-MCDS 在分析 MCDS 解的基础上, 确定以令牌分发数与节点能耗乘积为目标的优化函数, 通过令牌分发同时辅以全网能量负载均衡的方式, 构建最优 MCDS。仿真实验结果验证了 NMIP-MCDS 的有效性, 并可进一步实际应用在中等规模的无线传感网中。

**关键词:** 无线传感器网络; 拓扑构建; 最小连通支配集; 混合整数规划

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2012)08-2000-07

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2011.01029

## Topology Construction Based on Minimum Connected Dominating Set for Wireless Sensor Networks

Hong Zhen Yu Li Zhang Gui-jun Chen You-rong

(College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

**Abstract:** Topology construction based on virtual backbone communication is an effective way to shut down redundant nodes and save energy of whole network. In this paper, an issue of finding optimal virtual backbone through fully connected network is abstracted and converted into Minimum Connected Dominating Set (MCDS) issue while a new mathematical modeling approach which is called (NMIP)-MCDS based on Mixed Integer Programming is proposed. Furthermore, with the help of analyzing MCDS solution, the product of token distribution number and energy consumption from nodes are built as the goal of optimization function. Simultaneously, the optimal MCDS is constructed via manner of token distribution and network energy load balancing. Finally, simulation results show the effectiveness of NMIP-MCDS. It could be further applied to practical general WSNs.

**Key words:** Wireless Sensor Networks (WSNs); Topology construction; Minimum Connected Dominating Set (MCDS); Mixed Integer Programming (MIP)

### 1 引言

无线传感器网络(Wireless Sensor Networks, WSNs)是由大量资源受限的传感节点组成的无线自组织网络<sup>[1]</sup>, 如何减少全网能耗延长网络生命周期是 WSNs 最先考虑的问题。拓扑控制是保证全网连通性和覆盖度、合理消耗能量增加网络生存时间的高效可行技术, 它主要包含拓扑构建和拓扑维护两个过程<sup>[2]</sup>。拓扑构建是拓扑控制的首要过程, 基于虚拟主干网的通信方式是在保证全网连通性的前提下, 最大化节能的一种有效的拓扑构建方法。通常, 在原节点网络全连通的状态下, 简化当前网络形成以

主干网为通信主体的方法有两类: (1)减小预设的传输功率, 以此削减冗余的通信链路; (2)关掉不必要的节点。如何决定关闭哪些无关紧要的节点, 则是拓扑构建中亟需解决的课题。

最小连通支配集(Minimum Connected Dominating Set, MCDS)的构建是形成虚拟主干网, 关闭网络拓扑中大部分不必要节点, 最终达到节省能耗, 延长网络生命周期的主要途径之一<sup>[3]</sup>。由于 MCDS 是 NP-hard 问题<sup>[2]</sup>, 它的求解过程相对比较困难。现有文献中构建 MCDS 的方式主要有 3 类: (1)采用最大独立集(Maximal Independent Set, MIS)<sup>[4,5]</sup>技术, 寻找能覆盖全网所有节点的最小不连接的独立节点集, 然后选择网关节点(gateway)连接各个独立节点, 从而使之连通。(2)采用构造树技术<sup>[6,7]</sup>, 选择一个节点作为初始点(通常选择 sink 节

2011-10-09 收到, 2012-04-26 改回

国家自然科学基金(60974017, 61075062)和浙江省自然科学基金(Y1100891)资助课题

\*通信作者: 俞立 lyu@zjut.edu.cn

点), 然后沿着该节点的邻居节点发散出去, 直到覆盖整个网络为止。(3) 剪枝技术 (pruning technique)<sup>[8]</sup>, 与构造树技术是两个截然相反的过程, 起始于全网的一个较大子集, 其中包含大量的冗余支配节点, 裁剪掉不必要的节点, 即关闭已经被支配节点覆盖的冗余活跃节点。

本文欲采用数学建模求解此类问题, 而现有文献研究该类方法的较少。文献[9]提出采用分而治之 (divide and conquer) 方法, 将复杂的 MCDS 问题划分成两个子问题, 基于线性规划方法建模, 在求解原图最小支配集 (Minimum Dominating Set, MDS) 的基础上, 运用分布式算法寻找 MDS 的生成树并形成最终的 MCDS 最优解。在大规模实际应用中, 将 NP-hard 问题分解能大幅降低原问题的复杂度, 但往往由于子问题的解并非是整个问题的最优值而导致最终结果偏离实际最优解。文献[10]首次提出了令牌流 (flow of tokens) 技术, 以最小化网络中分发的令牌数为目标函数, 并在此基础上建立混合整数规划模型求解 MCDS 问题。上述文献提供了解决较难 MCDS 问题的数学方法, 但大部分文献的结果限于趋近最优解, 且无法保证其最优解就是原 MCDS 的最优解。

针对求解 MCDS 过程中存在的一系列问题, 本文对该问题及其解进行描述和必要的分析, 并提出新的基于混合整数规划 (Mixed Integer Programming, MIP) 的优化建模方法 NMIP-MCDS, 无需任何预处理过程, 最小化虚拟主干网结构规模, 同时结合考虑节点的能耗因素, 有效求解 MCDS 构建问题。最后给出 NMIP-MCDS 与其它几类算法的实验比较结果。

## 2 MCDS 问题描述及解分析

假设  $G=(V, E, R)$  为随机几何圆盘图, 其中  $V$  是图中所有节点的集合,  $E$  是边的集合,  $R$  为节点的可通信半径。图  $G$  需满足以下条件:

- (1) 初始图为全连通图;
- (2) 所有连接均为双向;
- (3) 在任一节点  $v_1$  的通信半径  $R$  范围内的任一节点  $v_2$  ( $d \leq R$ , 其中  $d$  为  $v_1$  与  $v_2$  的距离), 被看作是  $v_1$  的直接邻居节点, 且满足在  $d \geq R$  时, 不存在任何通信。

**定义 1** 图  $G$  中节点度为 1 的节点称为悬挂点, 与该节点相关联的边称为悬挂边。

**定义 2** 集合  $S$  所包含的元素个数, 称为基数, 又作集的势, 记为  $\text{Card}(S)$ 。

**定义 3** 设  $D$  为支配集 (Dominating Set, DS),

$D \subset V$ , 当且仅当满足  $V$  中任一节点属于  $D$  或至少与  $D$  中其中一个节点邻接, 即

$$D = v \in D \vee \exists v' \in D, \forall v, v' \in V (v, v') \in E \quad (1)$$

如果 DS 为连通的, 那么 DS 称为 CDS, 即存在一条路径使得节点之间是可达的。通常, 最终求解得出的 CDS 并非唯一, 可能存在多种可行结果, 需要分析其最小 CDS, 即最小连通支配集 (MCDS) 问题。

**定义 4** 最小支配集含有的节点个数称为支配数, 记为  $\gamma(G)$ 。

**定义 5** 从 MCDS 最优解的角度考虑, MCDS 问题可以被看成为在所有从连通图  $G_c$  中析出的包含非叶子节点的生成树的最小势的子集。

**定理 1** 一个拥有  $n=|V|>2$  的连通图  $G_c$  所构建的每个可能的生成树至少包含 CDS 问题的 4 个解。

**证明** 通过一些简单的搜索算法, 诸如广度优先搜索 (BFS)、深度优先搜索 (DFS) 可以获得无环图。因此, 每个连通图至少有 1 棵含有全部节点的生成树  $T$ 。在极端最坏情况下, 连通支配集可以被看成线性图 (只含 2 个叶子节点), 为了保证连通性, 所有中间节点被选为支配节点, 即上述情况可作为求解 CDS 问题的其中 1 个解。同样针对该极端最坏情况, 其它 3 个解中有 1 个解是全部节点都为支配节点, 根据图论知识可知节点完全集也是 CDS; 另外 2 种解表现为互为补集, 即其中 1 个解的所有支配节点作为另外 1 个解的被支配节点。上述 4 个解只是在最坏极端拓扑路径下 CDS 可行的解, 如果其它网络拓扑拥有更多叶子节点, 将会产生更多 CDS 问题解的组合。证毕

**定理 2** 一个拥有  $n=|V|>2$  的连通图所构建的每个可能的生成树至少包含 CDS 问题的  $2^L$  个解, 其中  $L$  是形成的树的叶子节点个数。

**证明** 定理 1 已经给出一个拥有  $n=|V|>2$  的连通图构建的可能生成树至少包含 4 个 CDS 的解, 这就证明在极端最坏情况下, 该生成树为只含 2 个叶子节点 ( $L=2$ ) 的线性图, 则至少包含  $2^2=4$  个解。不失一般性, 连通图所构建的生成树包含全部连通支配集能计算得出所有叶子节点上可能的支配与被支配组合, 而其计算的最终值为  $2^L$ 。证毕

**引理 1** 如果图  $G$  是一个连通图, 且满足  $n=|V|>2$ , 则  $\gamma(G_c) = n - \varepsilon_T \leq n - 2$ , 其中  $\varepsilon_T$  为任一生成树最大悬挂边的个数<sup>[11]</sup>。

**引理 2** 如果  $T$  是一棵树, 且满足  $n=|V|>2$ , 则  $\gamma(T_c) = n - l(T)$ , 其中  $l(T)$  为树  $T$  端顶点的个数<sup>[11]</sup>。

**定理 3** 全连通图构建的可能生成树中最小 CDS 的势是  $n-L$ 。

**证明** 非叶子节点必然包含于 CDS，而任一 CDS 中包含叶子节点将导致求解 CDS 问题时出现冗余解。因此，排除所有叶子节点将产生树的最小势的 CDS。又由引理 1 和引理 2 得证构建的树中最小的 CDS 的势是  $n-L$ 。 证毕

定理 3 可以用图 1 诠释，假设一个全连通图构建的生成树是星型拓扑结构，那么其中一个支配节点支配着其余的节点，则最后得到这棵特殊树的 MCDS 解的势为 1，即节点总数  $n$  减去所有的叶子节点个数  $L$ 。然而，全连通图构建的生成树是不唯一的，定理 3 针对的是特定的生成树，在某些情况下，构建的生成树最小 CDS 的势并非是原始图的最小 CDS 的势，那么它也不是原图 MCDS 的解。如图 2 所示，全连通图构建的生成树是线性图(一条路径)，它包含 2 个叶子节点，如果根据定理 3，它的最小 CDS 的势是  $n-2$ ，则大于原图产生的星型拓扑生成树的最小 CDS 的势，那么其解也不是原图 MCDS 的解。通过分析，可以得到下面定理 4。

**定理 4** 不是全部的连通图所构建的生成树包含至少一个原图 MCDS 的解。

**证明** 假设全部的连通图所构建的生成树包含至少一个原图 MCDS 的解成立，那么肯定不存在任何实例验证全连通图所构建的生成树 MCDS 的解不是原图的解。然而，图 2 给出全连通图可能构建

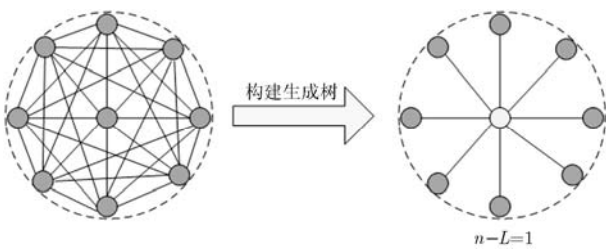


图 1 星型拓扑生成树求解 MCDS 的势

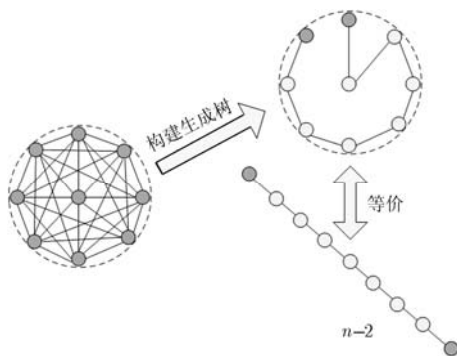


图 2 线性图生成树求解 MCDS 的势

的一种生成树为线性图，它只包含 2 个叶子节点，根据定理 3 计算 MCDS 的势为  $n-2$ ，而实际上原图的 MCDS 的势为 1(如图 1)，这与假设矛盾，本定理得证。 证毕

### 3 基于混合整数规划的 MCDS 建模

定理 3 和定理 4 说明通过构建最小生成树获得连通图支配集是可行的但并非是最可靠的方法。因此，本文提出新的基于混合整数规划的 MCDS 建模 (NMIP-MCDS)，用于分析其最优 MCDS 问题的解。

**定义 6** 能够表征一个节点有权利成为支配节点<sup>[10]</sup>，被称为令牌(tokens)，而令牌流则是所有令牌形成的路径，实际上为所有支配节点组成的生成树。

根据定义 6，采用令牌流的方式可得出当前网络中支配其它所有节点的最小生成树(支配节点集合)，则前述求解 MCDS 问题便可转化成求解令牌流路径。通常，由于实际应用中，Sink 节点总活跃于通信逻辑结构的中心位置，因此将它作为令牌流的起始节点，可以充分保证与其它所有节点以尽可能短的距离通信。此外，令牌流定义还必须满足以下规则：

- (1)假设 Sink 节点是唯一的令牌发起点， $n'$ 为全网所必需的最小支配节点数，那么该 Sink 节点拥有  $n'$ 个令牌。
- (2)分发过程起始于 Sink 节点，消耗 1 个令牌，则分发到它的邻居支配节点上总的令牌数为  $n'-1$ 。
- (3)每个支配节点  $v$  从另一个支配节点接收到  $n'(v)$ 个令牌，满足  $n'(v) \leq n'-1$ ，将消耗 1 个令牌，分发  $n'(v)-1$  个令牌到它的邻居支配节点。
- (4)如果任一支配节点只接收到 1 个令牌，那么它将无法分发任何令牌给其它支配节点。
- (5)如果有直接链路存在于节点之间，那么就有可能存在令牌流。
- (6)令牌只能在支配节点之间分发，而一个节点是否被作为支配节点依赖于是否存在其它的支配节点分发令牌给该节点。

假设现有一连通图  $G_c$ ，则有

$$\min n' \cdot \sum_j E(j) = \sum_i y(i) \sum_j E(j) \quad (2)$$

$$\text{s.t. } y(i) = \begin{cases} 1, & \text{支配节点} \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (3)$$

$$\text{adj}(i, j) = \begin{cases} 1, & \text{有直接通信存在} \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (4)$$

$$\sum_j \text{adj}(i, j) \cdot y(j) \geq 1, \quad \forall i \quad (5)$$

$$\sum_i f(s, i) - \sum_j f(j, s) = n' - 1 \quad (6)$$

$$\sum_j f(i, j) \cdot \text{adj}(i, j) - \sum_k f(k, i) \cdot \text{adj}(k, i) = -1 \cdot y(i), \forall i \quad (7)$$

$$\sum_j f(i, j) \cdot \text{adj}(i, j) \leq n \cdot y(i), \forall i \quad (8)$$

$$E(j) - \frac{1}{n} \sum_j E(j) \leq 0 \quad (9)$$

其中  $n=|V|$  为网络中全部节点数量,  $E(j)$  为第  $j$  个节点消耗的能量, 将采用文献[12]的能耗模型;  $y(i)$  则为大小是  $n$  的二进制数组, 且  $y(i) \in \{0,1\}$ , 如果节点被选为支配节点, 那么  $y(i)=1$ , 反之则  $y(i)=0$ ;  $f$  为  $n \times n$  大小的数组,  $f(i,j)$  表示节点  $i$  分发到  $j$  的令牌数, 且满足  $f(i,j) \leq n-1$ ,  $f(i,j) \in \mathbb{R}^+$ ;  $\text{adj}$  为  $n \times n$  的邻接矩阵, 如果节点  $i$  到  $j$  可直接通信, 则  $\text{adj}(i,j)=1$ , 反之则为 0。

式(2)至式(9)给出了整个基于 MIP 求解 MCDS 的建模过程。式(2)为本模型的目标函数, 为了更加贴近实际应用和尽可能延长网络的生命周期, 考虑到存在诸如活跃节点虽然最少, 但是全网能耗不一定是最小等问题, 本文以最小化分发的令牌数与活跃节点能耗的乘积来作为该问题的目标函数。不仅要求自 Sink 节点分发的令牌数尽可能小(即应最小化活跃节点数), 而且要求活跃节点消耗的能量也是极小, 即取两者之间的平衡。

式(3), 式(4)是对模型中两个相对重要的数组的简单定义。式(5)定义支配约束集, 式(6)至式(8)则构建生成树约束集, 而式(9)则是对节点能耗的约束。下面具体阐述该优化模型的主要约束条件:

(1)式(5)给出的约束为要求每个节点必须至少有一个支配节点作为其邻居, 这将保证最终形成的活跃节点集为完全支配集。

(2)式(6)给出的约束要求从 Sink 节点分发出去的令牌数为  $n-1$ , 且保证每经过一个支配节点即消耗 1 个令牌。

(3)式(7)给出的约束要求节点分发出去的令牌数与被分发进来的令牌数的差为 -1 或者 0, 即若该节点为支配节点则差为 -1, 反之为 0。本限制条件保证了令牌流只在支配节点之间分发传递, 而且只在邻居支配节点间发生。

(4)式(8)给出的约束要求支配节点分发出去的令牌数应小于等于全网的节点数, 而被支配节点分发令牌数则为 0。本限制条件控制了求解范围的边界, 同时也限定了令牌流只能在邻居节点间分发传递。

(5)式(9)要求节点消耗的能量必须低于网络平

均能耗值, 这也为了进一步保证在当前构建的虚拟主干网下, 全网的能耗相对较低, 从而延长网络的生命周期。

## 4 仿真实验及性能评价

### 4.1 实验参数设置及评价指标

为了验证 NMIP-MCDS 建模优化方法的有效性, 本文将其与 EECDS<sup>[4]</sup>, CDS-Rule-K<sup>[8]</sup>, A3 协议<sup>[6]</sup>以及 MIP-MCDS<sup>[10]</sup>做仿真实验对比。仿真实验被划分为 3 种不同的情形: (1)理想状态下基于网格的部署(如图 3 所示, 分水平-垂直(H-V 网格)和水平-垂直-对角(H-V-D 网格)方向部署通信); (2)在保持节点数量不变的基础上改变节点度(即通过计算调整临界传输范围(Critical Transmission Range, CTR)改变节点度<sup>[13]</sup>); (3)保持固定通信距离(传输范围), 改变节点数量。

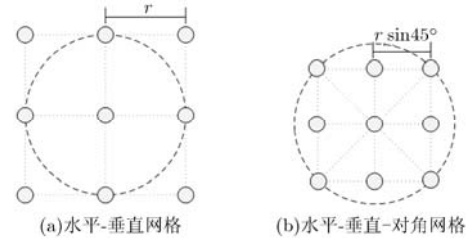


图 3 基于网格的理想状态部署

表 1 给出了这 3 类实验的具体参数设置, 其中包含了 A3 算法的特殊预设值。本文提出的 NMIP-MCDS 模型采用文献[14]的方法求解。此外, 5 类算法的实现均是在网络事件驱动仿真软件 Atarraya<sup>[15]</sup>的基础上扩展的, 同时 MIP-MCDS 和本文提出的 NMIP-MCDS 也在 Lingo12.0 优化建模软件测试通过, 并集成了其提供的接口。

为了进一步比较 NMIP-MCDS 与其它 4 类算法的优劣, 本节拟给出 3 个评价指标, 分别是网络拓扑构建的活跃节点数(虚拟主干网规模)、拓扑构建中消耗的能量以及评价执行时间。由于虚拟主干网的规模将直接影响到整个网络的能耗及最终网络的生命时间, 因此尽可能地减少活跃节点的数量是检验算法性能的重要指标之一。最终构建的网络拓扑能耗更是关系到全网的生存时间, 一个良好的算法必须要求有较小的能耗, 从而使之满足传感网实际的需要。除此之外, 平均执行时间也是本文所关注的主要评价指标之一。

### 4.2 结果分析评价

本节将按照前述的评价指标逐个对 3 类仿真实验的结果进行总结分析, 所有仿真结果均取自运行 100 次后的平均值。首先来看第(1)类理想态下基于

表1 仿真实验参数设置

参数设置	数值		
	实验 1	实验 2	实验 3
网络部署区域(m <sup>2</sup> )		(200×200)	
节点规模	49, 100	100	10, 20, 40, 60, 80, 100
节点分布	H-V 网格, H-V-D 网格	均匀分布(200, 200)	
传输范围(m)	30	1, 1.5, 2, 2.5, 3×CTR(100)	60
拓扑实例		100 实例	
初始能量(E <sub>0</sub> )(J)		1.0	
能量消耗	$E_{elec}=50$ nJ/bit, $\xi_s=10$ pJ/bit/m <sup>2</sup> , $\xi_{mp}=0.0013$ pJ/bit/m <sup>4</sup> , 短消息包=25 Byte, 长消息包=100 Byte, 假设忽略空闲状态下的能量消耗		
A3 权重		$W_E=0.5, W_D=0.5$	

网络的节点部署实验, 图 4 与图 5 分别给出了拓扑构建算法执行后形成的活跃节点数和消耗的能量。从图 4 可以看出, NMIP-MCDS 在 H-V 与 H-V-D 网格下分别执行后得到的活跃节点结果为 18 与 22, 在相同部署环境下较 EECDS 减少了 35.7%和 29%, 较 CDS-Rule-K 也少了 36.8%和 31.3%, 以及较 A3 减少 39.2%和 32.9%。除与上述的 3 类启发式算法相比, NMIP-MCDS 有了十足的进步, 而且它也比同类型的 MIP-MCDS 提高将近 14.3%。图 5 也反映出 NMIP-MCDS 的拓扑构建能耗明显要小于其余的 4 类算法。表 2 给出了该实验环境条件下, 拓扑构建的平均执行时间。从表中也可以反映出 NMIP-MCDS 较同类型的 MIP-MCDS 平均执行时间有了大幅度提高, 但是相比其它 3 类启发式算法, 还是有一定的差距。此外, 对于同一种算法, 由于 H-V-D 网格较 H-V 网格的情况复杂, 因此其最终针对 H-V-D 网格拓扑的平均执行时间要多于在 H-V 网格下执行的结果, 能耗也自然要高于在 H-V 网格下的消耗。

再来看第(2)类改变节点度的仿真实验结果。如图 6 所示, 在临界传输范围改变的情况下, NMIP-MCDS 执行后形成的活跃节点数要小于执行

表2 实验(1)结果: 理想网格拓扑下的拓扑构建平均执行时间

算法	理想部署环境下执行时间(s)	
	H-V 网格	H-V-D 网格
EECDS	0.035	0.55
CDS-Rule-K	0.055	0.5
A3	0.03	0.1
MIP-MCDS	38.3	8537.8
NMIP-MCDS	21.5	3958.1

EECDS, CDS-Rule-K, A3 以及 MIP-MCDS 所形成的结果。这说明节点度的改变不影响 NMIP-MCDS 执行后获得比其它 4 类算法更接近最优值的解。而从图 6 也可发现, 随着临界传输范围(CTR)的增加, 即节点度增加后, 执行同种算法后形成的活跃节点集(最优 MCDS)反而减小了。显然, 这是由于临界传输范围的增加造成任意节点可通信的范围增加了, 它的邻居节点必然增加, 最终整个网络需要的活跃节点相比原来必会减少。

图 7 给出在改变节点度的情况下各算法在拓扑构建的能耗情况。由于 NMIP-MCDS 将能耗作为其中的一个优化目标, 而同时又将本身计算量较大的求解过程放在通常无能量约束的 Sink 节点中进行, 其它节点只需执行较小的收发信息过程, 因此其相对于其它 4 类算法还是在能耗上有较大的优势。另一方面, 从图 7 中也可以看出, 随着节点度的增加, 在大部分情况下, 会导致计算量的增加, 从而带来能耗的进一步增大。

图 8 仍然给出了在改变节点度情况下的 NMIP-MCDS 与 EECDS, CDS-Rule-K, A3 以及 MIP-MCDS 的平均执行时间比较结果。同实验(1)的结果比较相似, 在临界传输范围 CTR=1.0 和 CTR=1.5 的情况下, NMIP-MCDS 虽然较 MIP-MCDS 平均执行时间短, 但相比其余 3 类启发式算法, 却相对耗时多。然而随着 CTR 的进一步增加, NMIP-MCDS 的平均执行时间明显减少了, 达到与 3 类算法相近的程度。这说明节点度的增加有助于 NMIP-MCDS 执行效率的增加。

图 9~图 11 分别给出了仿真实验(3)的实验结果。如图 9 与图 10 所示, 网络节点部署密度的改变不影响 NMIP-MCDS 以较少的能耗代价获得比 EECDS, CDS-Rule-K, A3 以及 MIP-MCDS 更少的

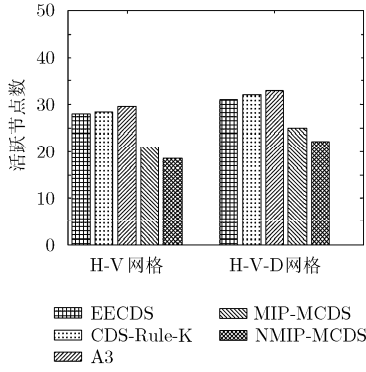


图 4 实验(1): 理想网络拓扑下的活跃节点数

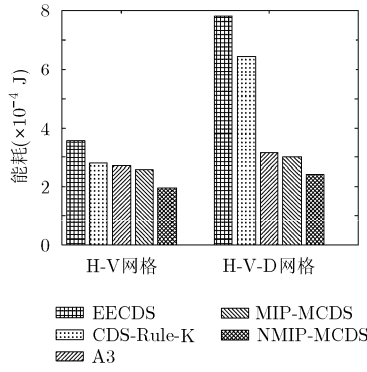


图 5 实验(1): 理想网络拓扑下的拓扑构建能耗

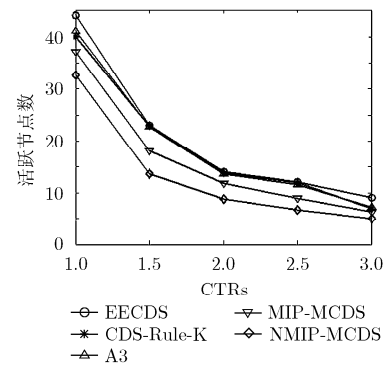


图 6 实验(2): 改变节点度下的活跃节点数

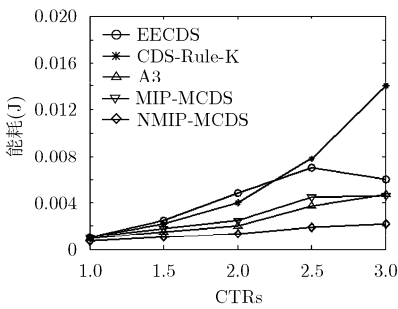


图 7 实验(2): 改变节点度下的拓扑构建能耗

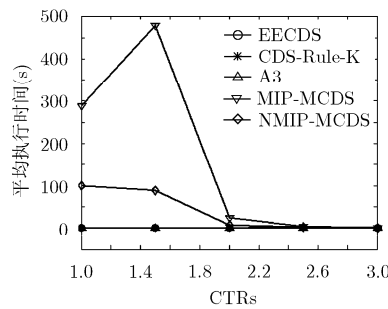


图 8 实验(2): 改变节点度下的平均执行时间

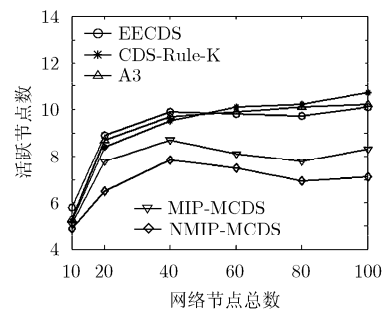


图 9 实验(3): 改变部署密度下的活跃节点数

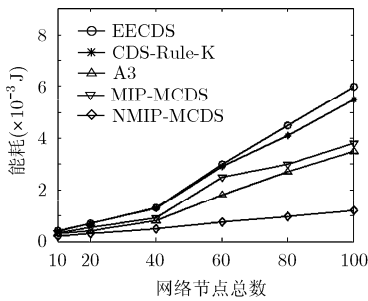


图 10 实验(3): 改变部署密度下的拓扑构建能耗

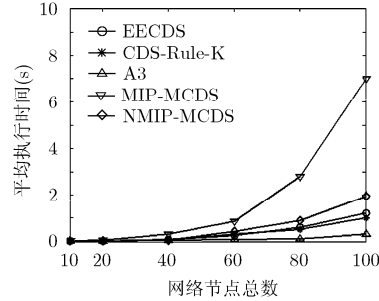


图 11 实验(3): 改变部署密度下的平均执行时间

活跃节点集。此外，图 9 还反映同种算法在不同节点密度环境下执行，其最终形成的活跃节点集是处于波动状态的，并不是简单的递增或者递减过程；而图 10 反映了随着节点部署密度的增加，上述 5 类算法拓扑构建时消耗的能量是呈递增关系的，这是由于节点增加必然会带动计算量和计算时间的增加，从而进一步加剧能量消耗，这也间接反映在图 11 上。同时，图 11 还证明假如不是在超大规模的传感网中，NMIP-MCDS 的平均执行时间与 3 种启发式算法相差不多，仍然是在可以接受的范围内。

上述 3 类实验详细给出了 NMIP-MCDS 与 EECDs, CDS-Rule-K, A3 及 MIP-MCDS 在活跃节点数、能耗以及平均执行时间的比较结果，并证明

了 NMIP-MCDS 能在消耗较小能量的情况下，获得最接近最优值的活跃节点集。这是 NMIP-MCDS 的最终优化目标，同时也为全网拓扑控制过程中节省能耗，尽量延长网络生命周期提供了有力保障。

### 5 结束语

本文主要阐述基于通信虚拟主干网的拓扑构建方法，把如何在原有全连通网络环境下寻找最优的主干网问题抽象并转化成 MCDS 求解问题。通过对 MCDS 解的进一步分析，以令牌分发数与能耗的乘积为目标的优化函数，建立新的基于 MIP 的数学模型，并借助优化软件提供的接口扩展实现该算法。3 类实验的仿真结果也验证了 NMIP-MCDS 的有效

性,在无需任何预处理的拓扑构建过程中,具有比EECDs, CDS-Rule-K, A3及MIP-MCDS拥有更小的能耗和形成更接近最优结果的活跃节点集。虽然,现有NMIP-MCDS的平均执行时间较3类经典的启发式算法要长,暂时无法适应于超大规模传感网络,但仍可作为拓扑构建方法应用于一般的中小传感网络。而下一步,可以从求解基于MIP建模启发式算法研究入手,设计实现快速有效的求解算法,在一定程度上降低问题求解时间,从而提高NMIP-MCDS的执行效率。

### 参考文献

- [1] Yick J, Mukherjee B, and Ghosal D. Wireless sensor network survey[J]. *Computer Networks*, 2008, 52(12): 2292-2330.
  - [2] Labrador M A and Wightman P M. Topology Control in Wireless Sensor Networks[M]. Berlin: Springer, 2009: 61-68.
  - [3] Liu Z, Wang B W, and Guo L J. A survey on connected dominating set construction algorithm for wireless sensor networks[J]. *Information Technology*, 2010, 9(6): 1081-1092.
  - [4] Zeng Y Y, Jia X H, and He Y X. Energy efficient distributed connected dominating sets construction in wireless sensor networks[C]. 2006 International Conference on Wireless Communications and Mobile Computing, Vancouver, Canada, July 3-6, 2006: 797-802.
  - [5] 孙超, 尹荣荣, 郝晓辰, 等. WSNs中基于能量代价的最小权和支配集拓扑控制算法[J]. *电子与信息学报*, 2010, 32(4): 857-863.  
Sun C, Yin R R, Hao X C, *et al.* Energy cost based topology control algorithm of minimum-total-weight connected dominating set in WSNs[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(4): 857-863.
  - [6] Wightman P M and Labrador M A. A3: a topology control algorithm for wireless sensor networks[C]. 2008 IEEE Global Telecommunications Conference, New Orleans, USA, Nov. 11-Dec. 4, 2008: 1-6.
  - [7] Wightman P M and Labrador M A. A3Cov: a new topology construction protocol for connected area coverage in WSN[C]. 2011 IEEE Wireless Communications and Networking Conference, Cancun, Mexico, Mar. 28-31, 2011: 522-527.
  - [8] Wu J, Cardei M, Dai F, *et al.* Extended dominating set and its applications in Ad hoc networks using cooperative communication[J]. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2006, 17(8): 851-864.
  - [9] Mnif K, Rong B, and Kadoch M. Virtual backbone based on MCDS for topology control in wireless ad hoc networks[C]. 2nd ACM International Workshop on Performance Evaluation of Wireless Ad hoc, Sensor, and Ubiquitous Networks, Montreal, Canada, Oct. 10-13, 2005: 230-233.
  - [10] Wightman P M, Fabregas A, and Labrador M A. An optimal solution to the MCDS problem for topology construction in wireless sensor networks[C]. 2010 IEEE Latin-American Conference on Communications (LATINCOM), Bogota, Columbia, Sept. 15-17, 2010: 1-6.
  - [11] Haynes T W, Hedetniemi S T, and Slater P J. Fundamentals of Domination in Graphs[M]. New York: Marcel Dekker, Inc., 1998: 41-66.
  - [12] Heinzelman W B, Chandrakasan A P, and Balakrishnan H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2002, 1(4): 660-670.
  - [13] Santi P. Topology Control in Wireless Ad hoc and Sensor Networks[M]. England, John Wiley and Sons, 2005: 39-52.
  - [14] 张贵军, 洪榛, 俞立, 等. 调速泵结构配置协调分解优化算法研究及实现[J]. *控制理论与应用*, 2011, 28(5): 659-666.  
Zhang G J, Hong Z, Yu L, *et al.* Harmonious decomposition algorithm and its application in global optimization of pump configurations[J]. *Control Theory & Applications*, 2011, 28(5): 659-666.
  - [15] Wightman P M and Labrador M A. Atarraya: a simulation tool to teach and research topology control algorithms for wireless sensor networks[C]. 2nd International Conference on Simulation Tools and Techniques, Rome, Italy, Mar. 2-6, 2009: 26-35.
- 洪榛: 男, 1983年生, 博士, 研究方向为无线传感器网络拓扑控制、路由协议、优化调度等。
- 俞立: 男, 1961年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为网络控制系统、无线传感器网络等。
- 张贵军: 男, 1974年生, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为优化调度、智能交通等。
- 陈友荣: 男, 1982年生, 讲师, 博士, 研究方向为无线传感器路由等。