

# 无线传感器网络中一种改进的能效数据收集协议

马晨明<sup>1</sup> 王万良<sup>2</sup> 洪 榛<sup>3</sup>

(浙江工业大学信息工程学院 杭州 310023)<sup>1</sup> (浙江工业大学计算机科学与技术学院 杭州 310023)<sup>2</sup>  
(浙江理工大学机械与自动控制学院 杭州 310018)<sup>3</sup>

**摘要** 基于连通支配集的虚拟骨干是减少支配节点数量和限制路由搜索空间的关键技术,对于优化无线传感器网络生命起到重要作用。ViTAMin 协议不但能通过关闭一些非必要节点产生虚拟骨干,而且能将采集的数据沿着距离基站能耗最低的路径进行发送,以节省能量。针对 ViTAMin 可能会产生非连通网络且支配节点能耗不均衡的问题,提出了一种基于虚拟骨干的能效数据收集协议 EEVB。理论分析证明,EEVB 能够以  $O(n)$  的时间与信息复杂度构造连通支配集,仿真实验进一步证实 EEVB 能够以较小的能耗开销构建规模较小的连通支配集,并有效延长网络的生命时间。

**关键词** 无线传感器网络,数据收集,虚拟骨干,连通支配集,能效

中图分类号 TP393 文献标识码 A DOI 10.11896/j.issn.1002-137X.2015.2.014

## Improved Energy Efficient Data Gathering Protocol in Wireless Sensor Network

MA Chen-ming<sup>1</sup> WANG Wan-liang<sup>2</sup> HONG Zhen<sup>3</sup>

(College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)<sup>1</sup>

(College of Computer Science and Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)<sup>2</sup>

(Faculty of Mechanical Engineering & Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)<sup>3</sup>

**Abstract** Virtual backbone based on connected dominating set is a key technique for reducing the number of dominating node and constraining the searching space for the routing which plays an important role for optimizing the lifetime of wireless sensor networks. ViTAMin protocol not only turns off unnecessary nodes to generate virtual backbone, but also sends the data collected along the minimal energy consumption path to save energy. In light of the problem that ViTAMin may generate non-connected network and dominating nodes consume energy not equally, an energy efficient virtual backbone data gathering protocol (EEVB) was proposed. Theoretical analysis shows that EEVB is able to construct connected dominating set with time and message complexity of  $O(n)$ , and simulation experiments confirm further that EEVB can construct smaller connected dominating set with low energy overhead and extend the life time of the network effectively.

**Keywords** Wireless sensor networks, Data gathering, Virtual backbone, Connected dominating set, Energy efficient

## 1 引言

无线传感器网络(Wireless Sensor Networks, WSNs)由大量价格低廉、存储有限的微型传感器节点组成,广泛应用于国防军事、对象跟踪、环境监测、灾害预防等领域<sup>[1]</sup>。数据收集是无线传感器网络中的基础应用,它是将节点采集的数据传送到基站(Sink)的过程。然而,受制于节点的能量,多数节点之间不能直接进行通信,同时网络中又没有类似蜂窝通信中的骨干结构,这就需要网络能够自组织地形成骨干,使得节点可以在若干中间节点形成的骨干上进行多跳数据交换,因此研究基于虚拟骨干的数据收集协议是 WSNs 的重要内容。

当前学者使用最小连通支配集<sup>[2,3]</sup>(Minimum Connected

Dominating Set, MCDS)构建虚拟骨干,网络节点被分为支配节点和普通节点。支配节点负责监听并转发数据,而普通节点仅负责发送监测数据到支配节点,当没有数据发送时进入休眠状态,这样在保持网络连通的情况下减少了数据的转发与传输,降低了拥塞和干扰的发生概率,从而节约了节点能量,延长了网络寿命。

然而,MCDS 问题是典型的 NP-hard 问题,在实际应用中一般采用分布式的近似算法<sup>[4-9]</sup>进行求解。文献[4-6]采用的最大独立集(Maximum Independent Set, MIS)技术通常将构建 MCDS 分为两个阶段,首先在第一个阶段构造一个最大独立集,然后在第二个阶段选择连接节点将最大独立集连成一个连通的网络。EECDs<sup>[4]</sup>是其中比较有代表的协议,即选择

到稿日期:2014-03-18 返修日期:2014-06-16 本文受国家自然科学基金(61304256, 61379123),“十二五”国家科技支撑计划(2012BAD10B01),浙江省自然科学基金(LQ13F030013),浙江省教育厅项目(Y201327006)资助。

马晨明(1983—),男,博士生,主要研究方向为无线传感器网络拓扑控制, E-mail: michealzjut@gmail.com; 王万良(1957—),男,教授,博士生导师,主要研究方向为计算机智能、自动化、无线网络; 洪 榛(1983—),男,博士,讲师,主要研究方向为无线传感器网络拓扑控制、智能交通、优化调度。

一个节点作为初始节点并广播 Black 消息成为支配节点,邻域状态为 White 的节点收到消息后将状态改变为 Grey 成为被覆盖节点,并将消息转发给它的邻域未覆盖节点,即距离初始节点两跳并且状态为 White 的节点,然后这些节点开始竞争成为支配节点,算法由内向外直到所有节点成为支配节点或被覆盖节点。在第二阶段, Grey 节点竞争成为支配节点以连通整个网络,算法的时间和信息复杂度都是  $O(n)$ 。Kim 等在文献[5]中指出 EECDs 在连通节点的选择过程中可能会出现死锁的情况,需要在算法中增加处理条件进行改进。PSCASTS<sup>[6]</sup>在最大独立集技术的基础上增加了剪枝的操作以减小连通支配集的规模,首先在第一个阶段中邻域内拥有最大节点度的节点优先成为支配节点,然后生成一个未经优化的连通支配集,在第二个阶段中使用修剪规则去掉冗余的节点。算法虽然能够产生较小规模的支配集,但是需要通过信息交换获得两跳邻域内的节点信息,因此时间和信息复杂度较大而且没有考虑节点的剩余能量。

文献[7]考虑了节点单位能耗,引入了候选支配点为某个时段能量消耗过快的支配点进行分流,然而该算法产生的支配集规模偏大,同时需要在执行开始前先通过两轮全网节点之间的广播获得节点度参数,降低了算法的效率。EB-MCDS<sup>[8]</sup>将节点度和剩余能量作为节点的权值,优先选择权值较大的节点成为支配节点,但是算法在构造 MCDS 的过程中同样需要利用二跳邻域信息,其信息复杂度达到了  $O(n\Delta)$ ,因而只能应用在规模较小的网络中。

上述文献主要关注如何构建 MCDS 以最小化网络能耗,而没有对数据收集过程中非支配节点的能耗进行研究,将普通节点采集的数据随机发送到邻居支配节点或邻域内 ID 最小的支配节点<sup>[10]</sup>,从而降低了算法性能。EVBT<sup>[11]</sup>考虑了这方面的优化,将数据发送到距离最近的支配节点上,缩短了数据传输的距离,但是该机制没有考虑到支配节点与 Sink 节点之间的距离,即总传输路径上的能量消耗。m-EVBT<sup>[12]</sup>和 ViTAMin<sup>[13]</sup>分别将普通节点采集数据沿着距离 Sink 节点路径最短和能耗最低的路径进行发送,改善了节点的传输性能,但是仍然存在诸如可能产生非连通网络、构建的连通支配集的数量过大以及传输路径上节点的能耗不均衡等问题。

本文在 ViTAMin 的基础上,提出了一种基于虚拟骨干的能效数据收集协议 EEVB,不仅使得节点将采集到的数据沿虚拟骨干在较小的寻路空间进行转发,而且平衡了各个支配节点的能耗,从而延长了网络的运行时间。

## 2 相关模型与协议分析

### 2.1 网络模型与问题定义

我们用图  $G(V, E)$  表示无线传感器网络模型,其中  $V$  表示传感器节点集合,  $E$  是由  $V$  中节点组成的通信链路集合。假设  $N$  个传感器节点随机部署在  $M \times M$  的正方形区域内, Sink 节点位于区域的中心位置  $(M/2, M/2)$ , 各个节点通过节点 ID 进行唯一标识且能量可以异构。假设传感器节点的通信半径  $R$  均相同,则任意两个节点  $u, v$  之间存在通信链路  $((u, v) \in E)$  当且仅当节点  $u$  与  $v$  之间的距离  $d(u, v) \leq R$ 。

本节首先给出 MCDS 问题的定义,然后在后续章节中给出求解问题的算法描述。假设无线传感器网络的节点集合  $V$  存在子集  $DS \subseteq V$ , 如果对于网络中任意其他节点  $u \in V - DS$ , 其通信半径内都至少存在一个  $DS$  中的节点  $v (v \in DS)$ , 则将

$DS$  中节点组成的集合称为支配集。如果  $DS$  是连通的, 则  $DS$  为连通支配集 CDS。我们对如何生成 CDS 的问题进行求解并使其规模尽可能小, 即为最小连通支配集问题。

### 2.2 能耗模型

本文采用文献[14]提出的无线通信能量模型, 当发送方与接收方的距离为  $d$  时, 发送与接收  $k$  比特数据能耗的计算公式如式(1)和式(2)所示, 式(3)表示的是链路中发送与接收  $k$  比特数据消耗的总能量。其中,  $E_{dec}$  为节点发送或接收单位比特数据消耗的能量, 参数  $\xi_{fs}$  为功率放大器消耗的能量系数。

$$E_{Tr}(k, d) = k * E_{dec} + k * \xi_{fs} * d^2 \quad (1)$$

$$E_{Rr}(k, d) = k * E_{dec} \quad (2)$$

$$E_{path}(k, d) = E_{Tr}(k, d) + E_{Rr}(k, d) \quad (3)$$

### 2.3 ViTAMin 协议分析

ViTAMin 作为近年来比较高效的数据收集协议, 有效地延长了网络的运行时间, 但通过仔细分析, 发现其仍然存在以下有待改善的问题。

问题 1: 在 MCDS 构造过程中, 节点在首次收到 EBCR 消息包时会启动一个与自身适应度函数成反比的定时器  $t_1$  竞争成为支配节点, 如果  $t_1$  时间内没有再次收到 EBCR 包, 则其成为支配节点并广播 EBCR 包阻止邻域内其他节点成为支配节点; 然而, 该机制可能会破坏网络的连通性, 如图 1(a) 所示, 初始时假设节点 A 成为支配节点并广播 EBCR 包, 邻域内节点 B、C、D 将竞争成为支配节点。假设时间  $t$  后 C 在邻域内具有最大的适应度函数, 则其成为支配节点, 如图 1(b) 所示, 节点 C 将阻塞 B、D 成为支配节点, 这样将导致拓扑图右侧的节点 F、G 成为未连通节点, 从而破坏了网络的连通性。

问题 2: 节点 C 成为支配节点后继续广播 EBCR 包, 邻居节点 E 收到来自 C 的消息包后将成为支配节点(邻域内无其他节点竞争), 如图 1(c) 所示。由于节点 E 不存在需要覆盖的其他节点且又处在支配节点 C 的邻域内, 因此将造成节点能量的浪费。

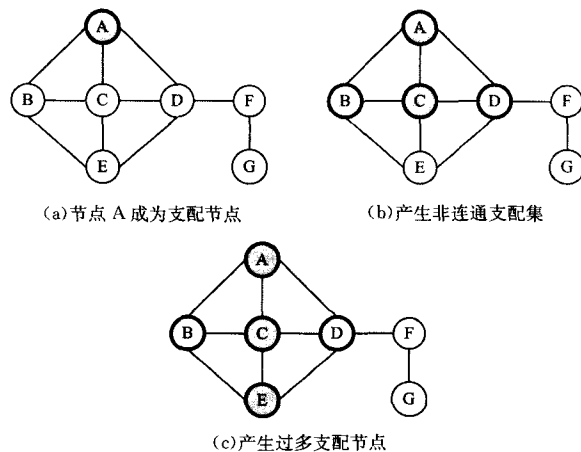


图 1 ViTAMin 协议 MCDS 构造中的问题

问题 3: 在数据收集过程中, ViTAMin 协议将节点采集的数据沿着 MCDS 向基站进行发送, 如图 2 所示, 节点 A、B、C 成为支配节点, 普通节点 D、E、F、G 总是贪心地选择到基站能耗最低的路径进行转发, 这将导致关键链路节点 C 能量消耗过大而提前死亡。为了最大限度地延长网络生命, 即保证所有节点能在同一时刻死亡, 需要选择合适的能量平衡策略

来保证网络的运行时间。

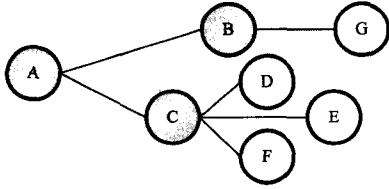


图2 ViTAMin协议普通节点的路径选择问题

### 3 EEVB 算法

本节对 EEVB 算法进行描述,通过在构建 MCDS 的过程中增加一定的通信开销来保证网络的连通覆盖性并且最小化支配节点数,然后将普通节点采集的数据沿着路径能耗低且路径节点剩余能量高的节点发送以平衡节点的能耗。下面介绍节点的适应度函数,它是衡量节点性能优劣的标准。

#### 3.1 适应度函数

在无线传感器网络中,普通节点可以关闭通信模块周期性地进入睡眠以节约能量,而作为虚拟骨干的支配节点由于需要时时准备接收并转发数据需要一直处于活跃状态中,其能耗和消息吞吐量将远远大于普通节点,因此在构造 MCDS 时需要选取质量较优的节点作为支配节点。本文考虑将节点剩余能量、节点之间的距离、虚拟骨干树的笔直性作为适应度函数的参数,具体公式如式(4)所示:

$$fitness = \begin{cases} \omega_1 * \frac{E_{cur}}{E_{max}} + \omega_2 * \frac{RSSI_{received}}{RSSI_{min}} + \omega_3 * (1 - \frac{abs(\beta)}{\pi}), & E \geq E_0 \\ \alpha * (\omega_1 * \frac{E_{cur}}{E_{max}} + \omega_2 * \frac{RSSI_{received}}{RSSI_{min}} + \omega_3 * (1 - \frac{abs(\beta)}{\pi})), & E < E_0 \end{cases} \quad (4)$$

$\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 = 1$

其中,  $\omega_1, \omega_2, \omega_3$  表示各参数对应的权值,  $\alpha \in [0, 1]$  表示当节点的剩余能量小于阈值  $E_0$  时,节点的适应度函数将迅速减少,该节点被选择的可能性下降。 $E_{cur}, E_{max}$  分别表示节点的当前剩余能量和初始能量; $RSSI_{received}, RSSI_{min}$  表示节点接收到父亲节点的信号强度和确保连通覆盖性的最小信号强度; $\beta$  表示当前节点偏离上层节点的方向,夹角越小表示生成的虚拟骨干树的曲直性越好。

状态为 Initial 的节点  $i$  首次收到 Dominate Message 时,启动与  $fitness$  成反比的超时  $timer2$  竞争成为支配节点,该时间的定义如式(5)所示:

$$timer2 = (1 - fitness(i)) * T \quad (5)$$

由于  $fitness$  的 3 个组成部分都在  $[0, 1]$  之间,因此权值累加后的  $fitness$  同样处于  $[0, 1]$  之间,这就确保了各节点的支配节点选择过程在时间  $T$  内结束。

#### 3.2 算法描述

本小节对算法的具体执行过程进行描述,各个节点的初始状态都为 Initial,算法结束后所有节点的状态将变为 Dominator 或 Dominatee。图 3 是算法在执行过程中节点状态的转换图。

1. Sink 节点广播 Dominate 消息 ( $E_s, E_{mit}, E(s, sink)$ ), 并改变节点状态为 Waiting Dominator, 其中  $E_s$  表示节点  $s$  的剩余能量,  $E_{mit}$  表示节点的初始能量,  $E(s, sink)$  为当前节点到达 Sink 节点路径需要消耗的能量。同时,启动一个超时在  $timer1$  后确认邻域内是否存在尚未覆盖的节点。 $timer1$  时间内如果节点收到其他节点的 Reply ( $SendID, DesID$ ) 消息,且

$DesID$  和节点  $ID$  相同,则将其添加到  $CList$  列表中。 $timer1$  结束后,如果节点的  $CList$  中成员个数大于 0,表示其邻域内存在需要覆盖的节点,则应将自身状态改变为 Dominator; 否则,变为 Dominatee。

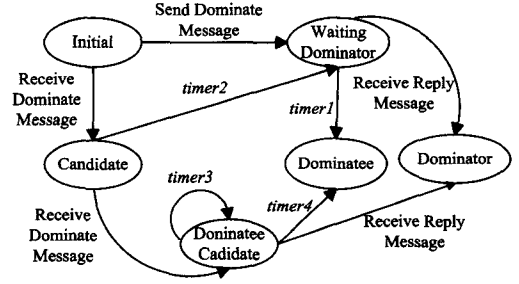


图3 MCDS 构建的节点状态转换图

2. 状态为 Initial 的邻居节点  $u$  收到节点  $v$  广播的 Dominate ( $E_v, E_{mit}, E(v, sink)$ ) 消息,将状态标记为 Candidate。节点  $u$  通过信号强度  $RSSI$  估计路径 ( $u, v$ ) 之间的距离,并用式(3)计算传输单位比特信息需要消耗的路径能耗  $E(u, v)$ 。然后,解析消息包中的参数  $E_v, E_{mit}, E(v, sink)$ , 将其与  $E(u, v)$  一并存储到列表  $DList$  中,并回复 Reply Message 成为节点  $v$  的被支配节点。最后,启动一个与自身适应度函数  $fitness$  成反比的定时器  $timer2$  竞争成为支配节点。

(1) 如果  $timer2$  内,  $u$  没有收到邻域内其他节点成为支配节点的信息,则节点  $u$  改变状态为 Waiting Dominator, 并广播 Dominate ( $E_u, E_{mit}, E(u, sink)$ ) 消息,其中  $E(u, sink) = \text{Min}(E(u, v) + E(v, sink), E(u, v), E(v, sink))$ ,  $E(u, v), E(v, sink)$  分别表示  $DList$  中存储的节点  $u$  到邻域节点  $v$  需要消耗的能量以及  $v$  到达 Sink 的能耗。

(2) 如果  $timer2$  内,节点  $u$  收到了邻居节点的 Dominate 消息,则表示邻居节点具有更好的适应度,则节点  $u$  解析消息并将其存储到  $DList$ ,但并不立即进入睡眠模式,而是将状态改变为 Dominatee Candidate 并重置超时以在  $timer3$  后确保网络连通。

3.  $timer3$  结束后,状态为 Dominatee Candidate 的节点  $u$  在一跳邻域内广播 Dominate ( $E_u, E_{mit}, E(u, sink)$ ) 消息寻找邻域内是否存在尚未被覆盖的其他节点并启动定时器  $timer4$  等待回复。

(1) 如果状态为 Initial 的节点接收到节点  $u$  广播的 Dominate 消息,表明该节点尚未被其他支配节点覆盖,则其向  $u$  回复 Reply 消息并继续步骤 2 中操作。

(2) 如果节点  $u$  在  $timer4$  内收到未覆盖节点的回复则成为支配节点; 否则,将状态改变为 Dominatee 并正式进入休眠模式以节约能量消耗。

#### 3.3 基于能耗均衡的路由选择策略

MCDS 构建完成后,将开始数据收集过程,我们将数据以轮为单位进行收集,当 Sink 收到所有支配节点发送过来的当前轮次数据后即完成一轮数据收集。轮次通过在消息中加入 round 标签进行模拟,初始为 1,每一轮次中消息的 round 标签加 1。普通节点根据保存的  $DList$  列表选择上层支配节点进行数据发送,节点  $u$  的列表信息中包括邻居支配节点  $v$  的剩余能量  $E_v$ 、初始能量  $E_{mit}$ 、到达该节点需要消耗的能量  $E(u, v)$  以及从  $v$  到达 Sink 节点路径消耗的能量  $E(v, s)$ 。如果持续将节点沿着能耗最小路径发送,将导致部分节点能量提前

耗尽。本文考虑到链路能耗与路径节点剩余能量的均衡,避免选择能量较小的节点作为下一跳,如式(6)所示:

$$P(u, v) = \beta * \frac{[E_{mit} - E_v]^{-1}}{\sum_{i \in N_u} [E_{mit} - E_i]^{-1}} + \gamma * \frac{[E(u, v) + E(v, s)]^{-1}}{\sum_{i \in N_u} [E(u, v) + E(v, s)]^{-1}} \quad (6)$$

$$\beta + \gamma = 1, 0 < \beta < 1, 0 < \gamma < 1$$

其中,  $\beta * \frac{[E_{mit} - E_v]^{-1}}{\sum_{i \in N_u} [E_{mit} - E_i]^{-1}}$  表示剩余能量的相对大小,  $\frac{[E(u, v) + E(v, s)]^{-1}}{\sum_{i \in N_u} [E(u, v) + E(v, s)]^{-1}}$  表示传输路径能耗的相对大小,  $\beta, \gamma$  分别为剩余能量与路径能耗重要性所占的比重;  $N_u$  表示节点邻域内比自身到 Sink 节点所需能耗  $E(u, s)$  更少的节点集合。我们发现节点的剩余能量越大以及到 Sink 节点的路径能耗越少, 节点就越有可能对数据包进行转发, 因此平衡了各支配节点的能耗, 避免因某个局部节点的死亡而导致频繁重建虚拟骨干。但是, 节点获得支配节点的能量需要额外的信息开销, 同时支配节点的剩余能量在相邻轮次中通常变化不大, 为了在性能与开销之间取得平衡, 支配节点可以根据具体应用的需求相隔一定的轮次发送当前节点的能量消息以最小化网络能耗。

## 4 性能分析

**定理 1** 如果初始 WSNs 是连通的, 那么通过 EEVB 形成的 CDS 也是连通的。

证明:(反证法)假设经过了 EEVB 协议构建的 CDS 是非连通的, 那么说明至少存在一个节点没有被支配节点覆盖, 即存在状态为 Initial 的节点。算法从 Sink 节点开始广播 Dominate 消息, 邻域状态为 Initial 的节点被标记为 Candidate。其中, 适应度较大的 Candidate 节点在 timer2 结束后将状态改变为 Waiting Dominator 并广播 Dominate 消息尝试成为支配节点。该节点如果在 timer1 时间内收到了状态为 Initial 节点的回复, 则成为支配节点并改变状态为 Dominator, 否则成为普通节点并改变状态为 Dominatee; 适应度较小的 Candidate 节点再次收到 Dominate 消息后, 在 timer3 后确认邻域是否有尚未覆盖的节点, 并最终改变状态为 Dominator 或 Dominatee。算法由内向外覆盖网络, 最终所有节点, 将被标记为 Dominator 或 Dominatee。如果存在状态为 Initial 的节点, 说明初始的 WSNs 是非连通的, 与假设不符, 得证。

**定理 2** EEVB 的信息和时间复杂度均为  $O(n)$ 。

证明: 支配节点构建过程中, Initial 状态的节点收到 Dominate 消息后, 需要回复  $O(1)$  的信息。如果节点成为 Waiting Dominator 节点, 将继续发送  $O(1)$  的消息尝试成为支配节点; 否则, 节点改变状态为 Dominatee Candidate 并在时间 timer3 后广播  $O(1)$  的消息包, 尝试搜索未覆盖节点, 即无论 Dominator 还是 Dominatee 节点, 在构建过程都将发送  $O(2)$  的消息包。考虑网络所有节点, 算法的信息复杂度为  $O(n)$ 。同时, 每个节点均在常数时间内完成计算而不需要排序, 因此节点的时间复杂度也是  $O(n)$ 。

## 5 仿真实验及分析

### 5.1 实验环境及参数设置

为了验证 EEVB 协议的有效性, 采用基于网络事件驱动

的仿真软件 Atarraya<sup>[15]</sup> 进行评估, 将 EEVB 与 ViTAMin、EECDs 进行比较, 并从连通覆盖性、生成的支配节点个数、发送消息的数量、构建 MCDS 的能耗以及网络的运行时间 5 个方面对协议性能进行评估, 所有仿真结果取自运行 20 次后的平均值。仿真实验的具体参数如表 1 所列。

表 1 仿真实验参数设置

参数设置	数值
部署区域(m <sup>2</sup> )	200×200
节点数量	50, 100, 150, 200, 250
部署方式	随机分布
传输范围(m)	20, 40, 60, 80, 100
采集数据频率	10unit
拓扑实例	20
初始能量范围(J)	[0.5, 1]
能量参数	$E_{elec} = 50\text{nJ/bit}$ , $\xi_{fs} = 13\text{pJ/bit/m}^2$ , 消息包长度=50Byte
公式参数	$\omega_1 = 1/3, \omega_2 = 1/3, \omega_3 = 1/3, E_0 = 0.3, \alpha = \beta = \gamma = 0.5$

### 5.2 实验结果分析

本节对实验结果进行分析, 第一组实验我们将不同数量的节点部署在 200×200 的区域内, 并将节点的传输半径设置为 40m, 观察 EEVB 和 ViTAMin 协议的连通覆盖性情况。从图 4 中我们发现 ViTAMin 与之前的分析一致, 会在连通支配集构建过程中产生未覆盖节点, 特别当网络节点较少时, 如节点数为 50 的情况下, ViTAMin 协议的连通覆盖度不足 90%, 这是由于节点分布不均可能会使得 ViTAMin 协议停滞, 而导致部分网络节点未被完全覆盖。当节点数量为 250 时, ViTAMin 协议的连通覆盖度达到了 97.9%, 这说明随着部署在网络中节点数量的增加, 协议的性能得到了改善, 但是仍然会存在部分未被覆盖的节点。相反, EEVB 的连通覆盖度不随节点数量的变化而改变, 在节点数量从 50 到 250 的变化过程中均保证了网络的全连通。

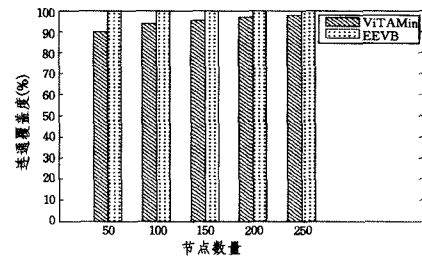


图 4 节点数量变化时的连通覆盖度

第二组实验我们通过调整节点的传输半径和改变网络中节点数量两种方式对不同节点密度下支配节点数目的变化规律进行分析。首先, 将 200 个节点静止部署在网络中, 通过改变节点的传输半径(20~100)观察节点度的变化对支配集数造成的影响。图 5 显示, EEVB 在不同节点度的情况下产生的支配节点数要少于其他算法, 当节点通信半径为 20m 时, EEVB 只需要 74.7 个节点作为支配节点, 而 ViTAMin 和 EECDs 则分别需要 94.8 和 78.6 个节点。随着传输半径的增大, 各个协议产生的支配节点数都逐渐减少, 这是由于传输半径的增加使得节点通信范围增大, 单位支配节点可支配的节点增多使得最终产生的支配节点数有所减少。

然后, 我们将节点的传输半径设为 40m, 通过改变节点数量(50~250)观察节点数量变化时对支配节点数量的影响。如图 6 所示, 在稀疏( $N=50$ )和密集( $N=250$ )两种不同类型网络中 EEVB 分别需要 17.8 和 25.6 个支配节点, 相当于

35.6%和10.2%的节点成为支配节点,这说明当网络节点数较少时支配节点数占网络中所有节点数的百分比更高;而EECDs和ViTAMin这一数据分别为19.3,28.3和26.8,39.8,相当于38.6%,11.3%和53.6%,15.9%的节点成为支配节点,这说明在稀疏和密集网络中EEVB执行后都能获得更接近最优值的解。从图中我们还发现EEVB产生的支配节点数量并不是随着节点的数量增加而一直增加,而是达到一定数量后在范围内上下波动,这是因为支配节点达到一定数量后即可覆盖整个网络,此时继续增加节点数并不需要增加新的支配节点。

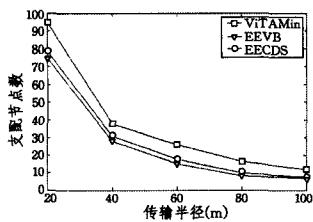


图5 节点度变化时MCDS构建产生的支配节点数

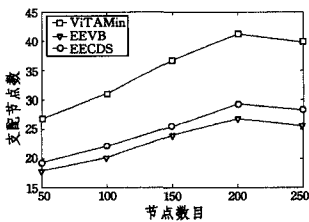


图6 节点数量变化时MCDS构建产生的支配节点数

在实验二中,我们发现EECDs产生的连通支配集的性能与EEVB相近,我们需要从协议的其他方面进一步比较性能。第三组实验我们将传输半径设置为40m,通过改变节点的数量(50~250)分析协议的通信开销和能耗情况。图7和图8显示了MCDS构建过程中节点发送的信息数和能耗比率,从图7中发现EECDs需要发送的消息量呈指数增加,这在无线传感器网络规模较大时不但增加了算法的时间而且将会消耗大量的能量,而EEVB发送的消息数要略多于ViTAMin,这是因为EEVB为了保证网络的全连通,增加了部分通信开销。图8中显示的协议能耗比率情况与图7中发送的消息数量类似,这是因为由式(1)一式(3)可知,节点能量的消耗与节点发送和接收消息的数据比特成正比,而消息数量越多所传输的比特也越多,因此能耗自然就增加了。

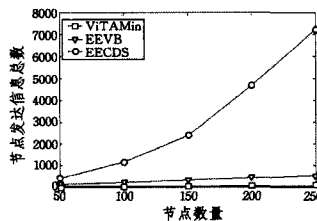


图7 节点数量变化时MCDS构建中的消息发送量

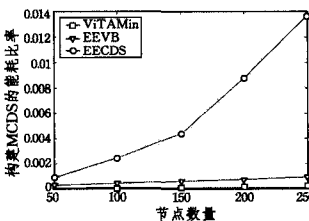


图8 节点数量变化时MCDS构建中的能耗比率

下一组实验,我们选取200个节点部署在网络中,节点的传输半径设为60m,观察存活节点数随时间的变化情况。我们选取EEVB与ViTAMin进行比较,但是ViTAMin在MCDS构建中产生了过多的支配节点影响了其生命时间。为了验证本文提出的路径选择策略的有效性,我们将ViTAMin融入本文的MCDS算法形成ViTAMin-MCDS进行比较。如图9所示,原生态的ViTAMin虽然在MCDS构建中能耗最少,但由于其产生了过多的支配节点导致效率下降,在12017.39时即出现了第一个节点的死亡;ViTAMin-MCDS和EEVB由于产生的支配集个数少于ViTAMin,运行时间显著提高,但是ViTAMin-MCDS出现第一个死亡节点的时间(15087.78)要早于EEVB(17091.23),这是由于贪心选择能耗较低的路径,导致频繁重构MCDS,而EEVB在数据发送

路径节点的选择更加均衡,其网络运行时间的增加也在情理之中。

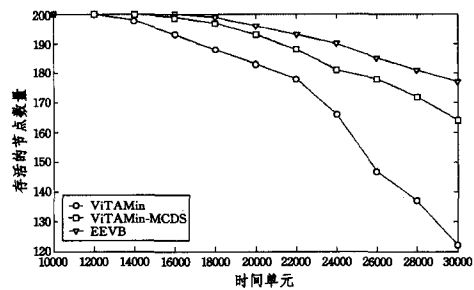


图9 网络存活节点随时间的变化图

**结束语** 本文对网络中构造虚拟骨干进行数据收集的问题进行研究,提出了基于虚拟骨干的能效数据收集协议EEVB。EEVB以较低的通信代价保证了网络的连通覆盖性,并分别在稀疏和密集环境下较ViTAMin协议减少18%和5.7%的支配节点数量,从而降低了网络的能耗;同时,能量均衡的路径选择策略有效地延长了网络的生命时间,提高了节点的能量利用率。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下一步研究的主要方向。

## 参考文献

- [1] Yick J, Mukherjee B, Ghosal D. Wireless sensor network survey [J]. Computer Networks, 2008, 52(12): 2292-2330
- [2] Wan P J, Alzoubi K M, Frieder O. Distributed construction of connected dominating set in wireless ad hoc networks [J]. Mobile Networks and Applications, 2004, 9(2): 141-149
- [3] Liu Z, Wang B W, 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, He Y X. Energy efficient distributed connected dominating sets construction in wireless sensor networks [C]// Proceeding of the 2006 ACM International Conference on Communications and Mobile Computing. Vancouver, Canada, 2006: 797-802
- [5] Kim D, Wu Y, Li Y, 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
- [6] Das A, Mandal C, Reade C, et al. An improved greedy construction of minimum connected dominating sets in wireless networks [C]// Wireless Communications and Networking Conference. Cancun, Mexico, 2011: 790-795
- [7] 付永生, 李善平, 周波. 无线传感器网络中能量均衡的连通支配集算法 [J]. 传感技术学报, 2010, 23(8): 1142-1145
- [8] 凌飞, 吴振华. 能量均衡的最小连通支配集分布式算法 [J]. 传感技术学报, 2012, 25(9): 1316-1321
- [9] 江亮, 刘建, 鲜明, 等. WSN中一种基于连通支配集的分簇一致性算法 [J]. 计算机科学, 2012, 39(Z11): 55-57
- [10] Wan P J, Huang S C, Wang L X, et al. Minimum-latency aggregation scheduling in multihop wireless networks [C]// Proceedings of the Tenth ACM International Symposium on Mobile Ad hoc Networking and Computing. New Orleans, USA, 2009: 185-194

(下转第75页)

内。因此,在不同的 MIMO 子信道带宽下,式(32)所给出的理论时延边界依然有效。

**结束语** 本文主要解决 LTE-A 飞蜂窝网络中的端到端时延边界问题,在研究 SNC 相关理论的基础上,结合 LTE-A 网络数据流到达的自相似特性与 MIMO 信道的时变特性,首先使用 Pareto 到达模型描述 LTE-A 飞蜂窝网络中业务流的重尾自相似特性,并构造模型的 gSBB 到达曲线;其次运用马尔科夫信道模型以描述 MIMO 无线信道的时变特性,并构建模型的弱服务曲线;最后根据 LTE-A 飞蜂窝网络下行链路数据通信图建立网络的端到端时延边界分析模型,并给出了网络的理论时延边界。仿真实验结果表明:在不同参数设置下,此模型均可给出贴近仿真结果的端到端时延边界,偏差不超过 2ms,对保障 LTE-A 飞蜂窝网络 QoS 具有参考价值。

## 参考文献

- [1] De Domenico A,Calvanese Strinati E,Capone A. Enabling Green cellular networks:A survey and outlook[J]. *Computer Communications*,2014,37(1):5-24
- [2] Zahir T,Arshad K,Nakata A,et al. Interference management in femtocells[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*,2013,15(1):293-311
- [3] Aijaz A,Aghvami H,Amani M. A survey on mobile data off-loading:technical and business perspectives[J]. *IEEE Wireless Communications*,2013,20(2):104-112
- [4] Andrews J G,Claussen H,Dohler M,et al. Femtocells: Past, present,and future [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*,2012,30(3):497-508
- [5] Tassi A, Khirallah C, Vukobratovic D, et al. Reliable rate-optimized video multicasting services over LTE/LTE-A[C]//2013 IEEE International Conference on Communications (ICC). IEEE,2013:5078-5082
- [6] Biswas J, Liu RP, Ni W, et al. Joint channel and delay aware user scheduling for multiuser MIMO system over LTE-A network [C]//2013 IEEE/ACM 21st International Symposium on Quality of Service(IWQoS). IEEE,2013:1-8
- [7] Jiang Y. A basic stochastic network calculus [J]. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, ACM, 2006, 36(4): 123-134
- [8] Azodolmolky S, Wieder P, Yahyapour R. Performance Evaluation of a Scalable Software-Defined Networking Deployment[C]//2013 Second European Workshop on Software Defined Networks (EWSND). IEEE,2013:68-74
- [9] Zhu Q, Yu L, Fang S. Per-flow end-to-end delay bounds in hybrid wireless network[C]//2013 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). IEEE,2013:2113-2118
- [10] 魏德宾,潘成胜,韩睿. 卫星网络业务自相似特性分析[J]. *计算机科学*,2013,40(5):67-69
- [11] 倪锐,周武旸,卫国. 基于网络演算的无线蜂窝网建模及其业务匹配研究[J]. *通信学报*,2010(7):33-39
- [12] Jiang L, Yu L, Dong Y, et al. Delay and backlog distribution analysis of Amplify-and-Forward cooperative channels: A stochastic network calculus perspective[C]//2013 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). IEEE, 2013:2085-2090
- [13] Min G, Jin X. Analytical Modelling and Optimization of Congestion Control for Prioritized Multi-Class Self-Similar Traffic[J]. *IEEE Transactions on Communications*,2013,61(1):257-265
- [14] 喻莉,白云,朱光喜. 基于 LFSN 自相似流量模型的随机突发边界分析[J]. *通信学报*,2010,31(5):16-21
- [15] Liebeherr J, Burchard A, Ciucu F. Non-asymptotic delay bounds for networks with heavy-tailed traffic[C]//2010 Proceedings IEEE INFOCOM. IEEE,2010:1-9
- [16] Mahmood K, Vehkaperä M, Jiang Y. Delay constrained throughput analysis of a correlated MIMO wireless channel[C]//IEEE Proceedings of 20th International Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN). IEEE,2011:1-7
- [17] Kishiyama Y, Benjebbour A, Nakamura T, et al. Future steps of LTE-A: evolution toward integration of local area and wide area systems[J]. *IEEE Wireless Communications*,2013,20(1):12-18
- [18] Lin C, Deng Y, Jiang Y. On applying stochastic network calculus [J]. *Frontiers of Computer Science*,2013,7(6):924-942
- [19] 3GPP TR36. 814 V9. 0. 0[OL]. <http://www.docin.com/p-277723701.html>
- [20] Rizk A, Fidler M. On Multiplexing Models for Independent Traffic Flows in Single-and Multi-Node Networks[J]. *IEEE Transactions on Network and Service Management*,2013,10(1):15-28
- [21] 陈昕,张磊,向旭东,等. 基于随机网络演算的 LTE 网络端到端时延分析[J]. *计算机学报*,2012,35(1):46-52
- [11] Acharya T, Chattopadhyay S, Roy R. Energy-aware virtual backbone tree for efficient routing in wireless sensor networks [C]// Third International Conference on Networking and Services. Athens, Greece,2007:19-25
- [12] Kim J, Yoon K, Lee S, et al. An m-EVBT algorithm for energy efficient routing in wireless sensor networks[C]//Proceedings of the 3rd International Conference on Ubiquitous Information Management and Communication. New York, USA, 2009: 586-591
- [13] Kim J, Yoon K, Lee J H. ViTAMin: A Virtual Backbone Tree Algorithm for Minimal energy consumption in wireless sensor network routing[C]//2012 International Conference on Information Networking (ICOIN). The Patra Bali Resort and Villas Bali, Indonesia,2012:1-3
- [14] Heinzelman W B, Chandrakasan A P, Balakrishnan H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*,2002,1(4):660-670
- [15] Wightman P M, Labrador M A. Atarraya: a simulation tool to teach and research topology control algorithms for wireless sensor networks[C]//Proceedings of the 2nd International Conference on Simulation Tools and Techniques. Rome, Italy,2009:26-35

(上接第 69 页)