

基于事件驱动的动态分簇网络的协作传输方法

李敏* 熊灿 肖扬

(重庆邮电大学自动化学院 重庆 400065)

摘要: 针对事件驱动的无线传感器网络的传输可靠性问题, 该文利用节点间的互助, 提出一种基于事件驱动的动态分簇网络的协作传输方法。无事件发生时, 各节点按预先形成的静态簇低频传输数据。而一旦有事件发生, 能感知事件发生的节点快速组成事件簇, 向簇头发送采集的数据, 簇头融合数据后发往汇聚节点。为提升传输可靠性, 当簇头传输失败时, 由最佳中继协作转发数据给汇聚节点。在最佳中继的选择上, 考虑到事件的连续移动, 以及处于事件前向通道上的节点具有较大的感应值和较好的协作能力等条件, 该文提出了基于前向通道的最佳中继选择策略。仿真和实验结果表明, 所提协作传输方法能够有效提高传输可靠性。

关键词: 分簇网络; 事件驱动; 协作传输; 动态事件簇; 可靠性

中图分类号: TN925

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2021)08-2232-08

DOI: 10.11999/JEIT200707

An Event-driven Cooperative Transmission Scheme for Dynamic Clustering Networks

LI Min XIONG Can XIAO Yang

(Department of Automation, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: In order to enhance the transmission reliability of event-driven wireless sensor networks, a cooperative transmission scheme for event-driven dynamic clustering network is proposed by utilizing collaboration between nodes. When no event occurs, each node transmits data to its cluster head at a very low frequency in pre-formed static cluster. Once an event occurs, the nodes that perceive the occurrence quickly form an event cluster and send data to the cluster head. The cluster head fuses the data and reports it to the sink node. The cluster head fuses the data and sends it to the sink node. If the cluster head fails to transmit, the best relay cooperates with it for forwarding data to improve the transmission reliability. In the best relay selection, considering the continuous movement of events, the nodes on the forward channel of events have strong induction intensity and good cooperation ability. Therefore, a best relay selection strategy based on the forward channel is developed. Simulation and experimental results show that the proposed scheme can effectively improve the transmission reliability.

Key words: Clustering networks; Event-driven; Cooperative transmission; Dynamic event cluster; Reliability

1 引言

无线传感器网络(Wireless Sensor Networks, WSNs)是由大量节点组成的分布式传感网络, 广泛

应用于医疗监控、智慧城市、野生动物跟踪、环境监测、农业检测等领域^[1,2]。在大多数应用场景中, 传感器节点由电池供电, 为降低节点的能耗, 延长网络的生命周期, 常将大规模网络进行分簇^[3-6]。各簇成员将采集的数据发送给簇头, 簇头将数据融合后再发给汇聚节点, 以提高能量利用效率。近年来, 为实现对突发事件的检测和报告, 基于事件驱动的传输方法被提出^[7-11]。文献[7]将事件驱动机制引入智慧城市的焦点服务触发过程中, 建立了根据不同社会实体和个人决策的公共焦点服务模型与处理过程。文献[8]提出了一种基于锚点的时空事件的检测和报告路由协议。文献[9]将事件驱动应用于生

收稿日期: 2020-08-10; 改回日期: 2020-12-18; 网络出版: 2021-02-24

*通信作者: 李敏 limin@cqupt.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFB1702000), 国家自然科学基金(61701065), 重庆市自然科学基金(cstc2019jcyj-msxmX0444)

Foundation Items: The National Key R&D Program of China (2018YFB1702000), The National Natural Science Foundation of China (61701065), The Natural Science Foundation of Chongqing (cstc2019jcyj-msxmX0444)

物免疫系统中。文献[10]针对含有未知输入的离散随机系统, 结合事件驱动机制设计估计器以实现无线传感节点的远程状态估计。文献[11]将事件驱动用于大数据视频监控数据的选择性存储上, 以提高异常事件的高效保存和可信预警。在基于事件驱动的网络中, 节点收集数据由事件的发生与否来决定, 无事件发生时, 节点休眠或以极低的频率向簇头定时汇报节点状态; 有事件发生时, 节点被唤醒, 高频采集数据并向簇头高速传输数据, 实现对事件的实时监测[12-14]。

以上研究中, 对网络进行分簇和利用事件驱动来设计数据的传输方法旨在提高网络的能量效率, 延长网络的生命周期。但在突发紧急事件的监测中, 如山洪、台风、森林火灾、燃油或化学物质泄漏等, 数据传输的可靠性同样值得关注。文献[15]用两类节点, 即传感节点和中继节点来分别承担感知和数据包多跳转发任务以提升节点的能量效率和数据传输的可靠性。但在无线传感器网络中, 很少布置专门的中继来转发数据, 且当事件连续变化时, 原有的多跳路由不再适用, 频繁的中继选择也会耗费更多的能量。基于此, 本文针对事件驱动的无线传感器网络, 利用节点间的互助, 提出了一种动态分簇的协作传输方案来提高数据传输的可靠性。本文主要创新点如下:

(1) 针对事件驱动的大规模无线传感器网络的传输可靠性问题, 本文提出了一种基于事件驱动的动态分簇网络的协作传输方法。根据运动事件的特征, 定义了事件的大小、移动速度和方向, 描述了事件簇的形成过程;

(2) 根据网络中不同位置的节点协作效果不同, 本文提出了基于前向通道的最佳中继选择方法。处于事件移动方向上的节点更接近于事件中心和汇聚节点, 从该区域中选出的最佳中继能更好地实施协作传输;

(3) 仿真结果和实验测试结果验证了所提方法的有效性。与其他方法相比, 所提方法能提高数据包的传输率, 增强了数据传输的可靠性。

2 系统模型

考虑由 N 个传感节点 $s_i (i = 1, 2, \dots, N)$ 和1个汇聚节点 D 构成的无线传感器网络, N 个节点随机分布在 $M \times M$ 的方形区域内, 汇聚节点在方形区域外, 如图1所示。假设任意两节点间的信道服从独立的Rayleigh衰落, 且具有对称和长静态特性。各节点配备单根天线, 具有相同的初始能量 E_0 , 工作在半双工模式, 单位频谱上的数据传输速率为

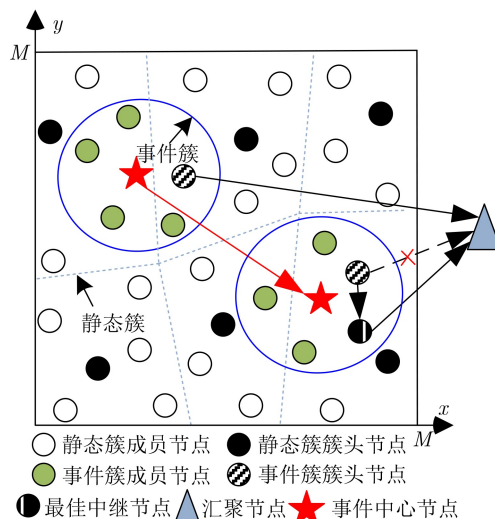


图1 系统模型

R bps。假定各节点均知晓自身的位置, 用平面坐标系 x, y 表示。

为节省节点能量, 网络被划分为大小不等的 K 个静态簇。无事件发生时, 各簇成员以极低的频率周期性地向簇头汇报节点状态, 簇头融合接收到的数据后发往汇聚节点。当有事件发生时, 所有节点进入警备状态, 感知到事件发生的节点迅速加入事件簇, 事件感应值最大的节点成为事件中心节点。事件簇形成后, 各节点依次向簇头发送检测数据, 簇头融合后向汇聚节点发送数据。为确保数据的可靠传输, 采用反馈机制来反映汇聚节点是否成功收到数据。若汇聚节点反馈ACK帧, 表明数据成功发送; 若反馈的是NACK帧, 则表明数据接收失败, 此时需启动协作传输, 由最佳中继节点转发数据到汇聚节点。

假设事件遵循随机路径移动, 移动速度为 v 。事件形状为圆形, 半径为 r_e , 事件大小由事件中心节点到事件簇中最远节点的距离来决定。

3 基于事件驱动的协作传输协议

3.1 协议描述

采用与文献[16]类似的动态TDMA调度方案, 不同的传输状态分配不同长度的时隙。根据有无事件发生, 将数据传输过程分为两个状态: 静态簇传输和事件簇传输。静态簇传输采用低频方式, 时隙长度为 T_s ; 事件簇采用高频方式传输数据, 时隙长度为 T_a , $T_a \ll T_s$, 网络的通信流程如图2所示。

(1) 静态簇建立。如图2(a)所示, 网络开始运行时, 各节点按照文献[17]竞争簇头, 各簇头依次广播成簇信息, 收到成簇信息的节点加入相应的簇。静态簇建立后, 簇头和簇成员保持不变。

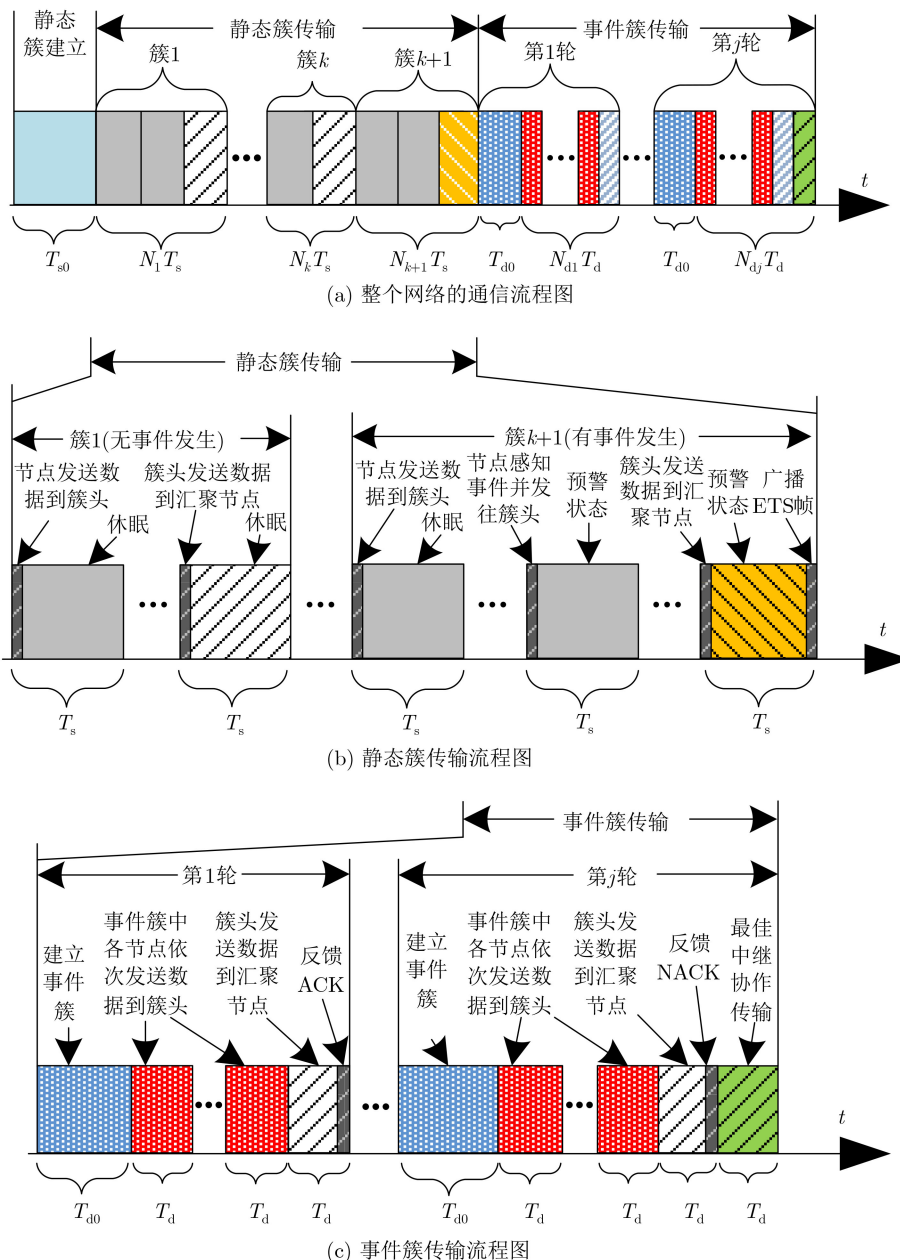


图2 网络的通信流程图

(2) 静态簇传输。如图2(b)所示,所有节点均以 T_s 为时隙长度依次向簇头发送信息,簇头融合数据后发往汇聚节点。为降低节点的能耗,在一个时隙内,若节点未感知到事件发生,则每个节点发送完数据后进入休眠状态,直到下一轮相应时隙开始时才被唤醒。若节点感知到事件发生,则传输完数据后转入预警状态,等待加入事件簇。事件的检测详见3.2.1小节。汇聚节点接收到事件数据时,立即广播事件传输开始(Event Transmission Start, ETS)帧,通知各节点停止静态簇传输,并在下一时隙启用事件簇传输,时隙长度为 T_d 。收到ETS帧的节点进入预警状态,等待竞争事件簇的簇头。

(3) 事件簇传输。事件簇开始时,处于预警状态的节点竞争事件簇簇头,事件簇簇头的竞争详见3.2.3小节。竞选成功的簇头广播成簇邀请,收到成簇邀请的节点加入事件簇,如图2(c)所示。事件簇中各节点依次传输所感知的数据到簇头,簇头融合所有数据发往汇聚节点。若汇聚节点反馈ACK帧,则表明当前轮数据传输成功,各节点进入新一轮事件簇的建立和数据传输。若反馈NACK帧,则表明汇聚节点未能成功收到事件信息,则在事件的前向通道上选择最佳中继,由最佳中继转发数据给汇聚节点。最佳中继的选择详见3.3节。汇聚节点检测每轮传输来的数据,若无任何节点检测到事件

的发生，则广播事件传输结束(Event Transmission End, ETE)帧，解散事件簇，下一时隙长度为 T_s ，所有节点执行静态簇传输。

3.2 事件簇的形成

3.2.1 事件的检测和事件中心节点的确定

与文献[18]相似，定义 SI_{s_i} 为节点 s_i 的事件感应强度。当节点检测到事件感应强度小于事件感应强度阈值 SI_{th} 时，判断无事件发生，事件指示变量 Q_{s_i} 置0；否则， Q_{s_i} 为1，表明有事件发生。 Q_{s_i} 表示为

$$Q_{s_i} = \begin{cases} 0, & 0 \leq SI_{s_i} < SI_{th} \\ 1, & SI_{s_i} \geq SI_{th} \end{cases} \quad (1)$$

有事件发生时，收到簇头广播的ETS帧的所有节点进入预警状态，在动态簇的第1个时隙，各事件感知节点竞争事件中心节点，事件感应强度最大的节点当选为事件中心节点，用 s_{ec} 表示。

3.2.2 事件的大小、速度和方向

下面根据事件感应节点来确定每轮传输中事件的大小、速度和方向。

(1) 事件的大小。假定事件的形状为圆形，事件的大小用半径 r_e 表示。 r_e 定义为当前轮中事件中心节点 s_{ec} 到最远的事件感应节点的距离，表示为

$$r_e = \max(r_i) = \max \left(\sqrt{(x_i - x_{ec})^2 + (y_i - y_{ec})^2} \right) \quad (2)$$

其中， x_{ec}, y_{ec} 为 s_{ec} 的 x, y 轴坐标。 x_i, y_i 为事件感应节点 s_i 的 x 轴、 y 轴坐标， r_i 为其到 s_{ec} 的距离。

(2) 事件的速度。在事件簇中，每轮数据的传输时隙为 T_d ，设当前轮中事件中心节点与前一轮事件中心节点 s_{ec_p} 的距离为 d ，则事件的移动速度为

$$v = d/T_d \quad (3)$$

其中，两轮事件中心节点的距离 $d = \sqrt{(x_{ec} - x_{ec_p})^2 + (y_{ec} - y_{ec_p})^2}$ 。 x_{ec_p}, y_{ec_p} 为 s_{ec_p} 的 x 轴、 y 轴坐标值。

(3) 事件的方向。事件的方向由前后两轮事件中心节点的移动方向来确定。如图3所示，定义 s_{ec_p} 指向 s_{ec} 的方向为事件移动方向，其与 x 轴的夹角 θ 为

$$\theta = \arctan \frac{\Delta x}{\Delta y} \quad (4)$$

其中， $\Delta x = x_{ec} - x_{ec_p}, \Delta y = y_{ec} - y_{ec_p}$ 。

3.2.3 事件簇的形成

事件簇的形成包括3个组成部分：确定事件中心节点、竞争簇头、成簇。将事件簇形成阶段的时隙 T_{d0} 划分为多个子时隙 T_{d0s} ，详细的子时隙划分和通信流程图如图4所示。

(1) 确定事件中心节点。当有事件发生时，各

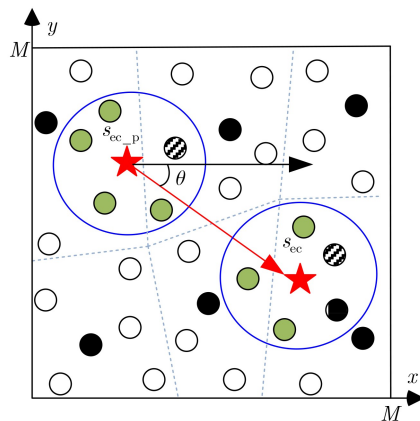


图3 事件参数计算图

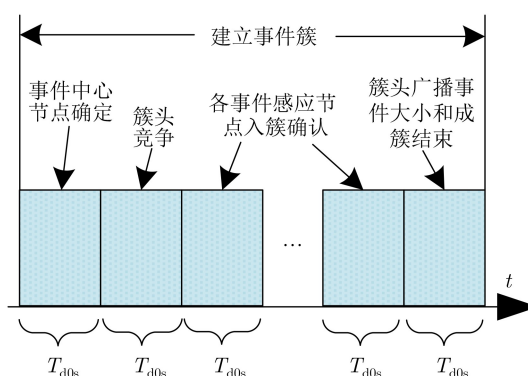


图4 事件簇的形成中子时隙的划分和通信流程图

节点竞争事件中心节点。在第1个子时隙 T_{d0s} 开始时，各警备节点按事件感应强度的倒数 $1/SI_{s_i}$ 设置定时器初值并开始计时，同时监听信道；若定时时间到时信道为空，则该节点发送事件感应值、自身坐标等信息给汇聚节点，该节点即为事件中心节点；若定时时间未到，而有节点抢占信道，则竞争失败，该节点立刻关闭计时器并监听事件中心节点发送的数据，获取事件中心节点的坐标。

(2) 竞争簇头。簇头承担着簇内协调、簇成员数据的接收、融合和传输任务，是事件簇形成过程中重要的一部分。簇头的选择需考虑以下3方面因素：

(a) 具有一定的剩余能量。设置剩余能量阈值 E_{th} ，只有剩余能量大于等于 E_{th} 的节点才有资格竞选簇头；

(b) 到汇聚节点的信道质量足够好。能成功收到ETS帧的节点说明其到汇聚节点的信道质量较好，具有竞争簇头的资格；

(c) 距离事件中心节点的距离。离事件中心节点越近的节点具有更大的感应强度，数据传输时所消耗的功率越小。

考虑以上3个因素，各节点检测自身的剩余能

量 E_{s_i} , 若 $E_{s_i} < E_{th}$, 则该节点能量不足, 放弃簇头竞争; 否则, 该节点参与簇头的竞争, 并按式(5)设置定时器初值

$$V_{s_i} = \frac{d_{s_i, s_{ec}}}{E_{s_i} \cdot \alpha_{s_i, d}} \quad (5)$$

其中, V_{s_i} 为评价指标, $d_{s_i, s_{ec}}$ 为事件感知节点 s_i 到事件中心节点 s_{ec} 的距离; E_{s_i} 为 s_i 的剩余能量; $\alpha_{s_i, d}$ 为 s_i 到汇聚节点的瞬时信道值。定时器最先归零的节点当选为簇头, 广播当选信息及自身坐标。其余节点若捕获到信道被占, 则关闭定时器, 并解码簇头发来的信息, 获取簇头的位置。

(3) 成簇。在接下来的子时隙, 各事件感知节点竞争加入事件簇。事件指示变量 $Q_{s_i}=1$ 的节点按事件感应强度的倒数 $1/SI_{s_i}$ 设置定时器初值并开始计时, 同时监听信道; 感应强度最大的节点第1个抢占信道, 发送确认信息给簇头, 其在事件簇中的编号设置为 $j=1$ 。在后面的每个时隙, 未加入簇的各节点重置定时器, 继续竞争信道, 竞争成功者, 发送确认信息给簇头, 并设置在事件簇中的编号。当子时隙中无节点占用信道时, 成簇结束。

3.3 最佳中继选择策略

在连续事件的监控中, 当事件簇簇头向汇聚节点传输数据失败时, 其他节点协作传输。因事件连续移动, 处于事件前进通道一定范围内的节点对事件的感知更强烈更及时可靠。因此, 本小节提出基于前向通道的最佳中继选择策略。

由3.2.1节、3.2.2节可知, 事件直径为 $2r_e$, 移动速度为 $d = v \times T_d$, 与 x 轴夹角为 θ , 以事件中心为起点, 沿事件发展方向为中垂线, 构建 $2r_e \times d$ 的矩形, 如图5所示, 该矩形即为所设定的前向通道区域。各节点根据事件中心节点的位置, 事件移动速度和方向, 计算自己是否位于该区域内。前向通道4个顶点 $P_1(x_1, y_1)$, $P_2(x_2, y_2)$, $P_3(x_3, y_3)$, $P_4(x_4, y_4)$ 的坐标分别为

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= x_{ec} - r_e \sin \theta \\ y_1 &= y_{ec} - r_e \cos \theta \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

$$\left. \begin{aligned} x_2 &= x_{ec} + r_e \sin \theta \\ y_2 &= y_{ec} + r_e \cos \theta \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

$$\left. \begin{aligned} x_3 &= x_{ec} + r_e \sin \theta + d \cos \theta \\ y_3 &= y_{ec} + r_e \cos \theta - d \sin \theta \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

$$\left. \begin{aligned} x_4 &= x_{ec} - r_e \sin \theta + d \cos \theta \\ y_4 &= y_{ec} - r_e \cos \theta - d \sin \theta \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

由以上4个顶点确定前向通道矩形的4条边界, 各节点将自身坐标代入4条边界进行计算, 看自己是否位于前向通道矩形区域内, 若是, 则有资格参与最佳中继的竞争, 设置区域指示标记 $IS_j = 1$; 否则, 无资格竞争, $IS_j = 0$ 。同时, 成功监听到事件簇簇头数据并成功解码NACK帧的节点具有与簇头和汇聚节点较好的信道质量, 能承担协作转发任务, 设置信道指示标记 $IC_j = 1$, 否则, $IC_j = 0$ 。 $IS_j = 1$ 且 $IC_j = 1$ 的节点竞争最佳中继, 启动定时器, 将初值设置为与剩余能量成反比, 并监听信道。具有最大剩余能量的节点当选为最佳中继, 协作完成数据的传输。若无节点参与竞争, 则产生中断。

4 仿真结果与分析

为验证所提方法的有效性, 将所提方法与文献[17]中的EEAOC方法、文献[18]中的RETP方法进行了对比, 观察不同参数下数据传输可靠性。仿真参数设置如下: 网络中节点数 $N = 200$, 所有信道服从Rayleigh衰落, 节点间的信道均值为1。单位频谱上传输速率 R 为1 b/s, $T_d = 0.001$ s, 仿真轮数为10000次。

数据包传输率(Packet Delivery Ratio, PDR)定义为汇聚节点 D 成功接收的数据包数与源节点发送的数据包数的比率。图6给出了不同方法在不同信噪比下的PDR。从图6可以看出: EEAOC方法的曲线在中高信噪比下PDR明显低于另两种方法, 这是因为EEAOC方法只采用了直接传输, 直接传输失败则产生中断。本文方法和RETP均采用了协作传输, 直接传输失败时有其他节点协作传输, 故传输可靠性得到提升。本文方法在数据包传输率上更优于RETP, 原因是RETP中RRT算法仅仅是增加传输节点数量并未考虑协作节点的性能。而本文方法在前向通道上选择协作能力最强、剩余能量最多的节点为最佳中继, 进行数据转发, 从而获得更高的数据包传输率。

为了测试不同网络规模下系统的性能, 图7比较了不同方法在不同节点数量下的数据包传输率。

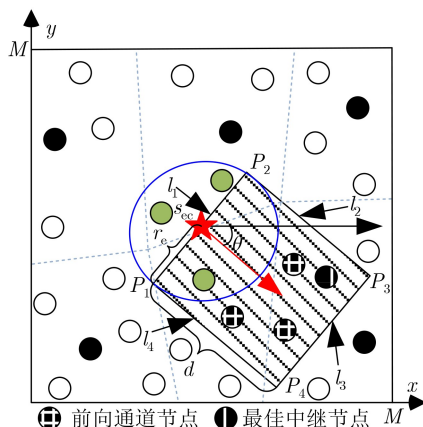


图5 前向通道示意图

从图7可以看出：随着节点数量的增加，本文方法和RETP方法的PDR逐渐升高，而EEAOC方法PDR保持不变。这是因为EEAOC方法无协作传

输，PDR高低取决于信道的好坏。而RETP和所提方法均有协作传输，节点数量增多意味着在最佳中继的选择上有更多候选者。且随着节点数量的增多，网络中节点密度增大，相应地前向通道内的协作节点的数量会增加，所提方法更有可能挑选出更有协作能力的节点进行转发，故其性能更优于RETP。

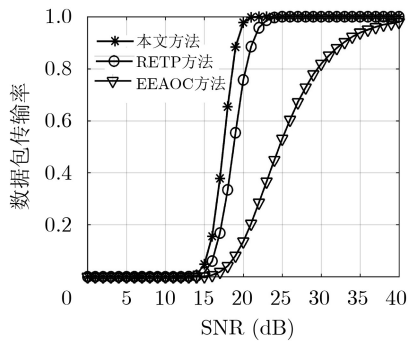


图6 不同信噪比下各方法的数据包传输率比较

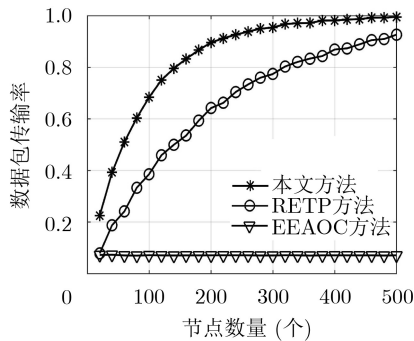
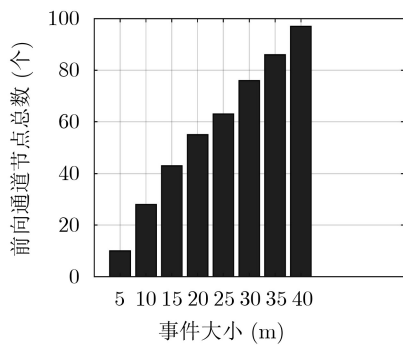


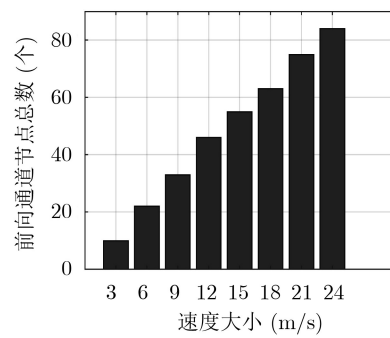
图7 不同节点数量下各方法的数据包传输率比较

图8给出了不同事件大小和不同速度时前向通道的节点数量。前向通道范围为：以事件中心为起点，沿事件发展方向为中垂线的 $2r_e \times d$ 的矩形区域，其中 $d = v \times T_d$ 。从图8可知，随着 v, r_e 不断增大，前向通道范围不断扩大，候选协作节点数不断增多。

图9比较了不同方法在不同事件大小和不同事件速度时的数据包传输率。从图9可以看出，随着 r_e 和 v 的增大，入选前向通道节点不断增多，本文所提方法的数据包传输率明显提升。而RETP方法中采用固定簇头协作转发，固定簇头到目标节点的信道质量不一定最好， r_e 增大使其数据包传输率有所增大，但增幅小于本文所提方法。RETP方法中没有考虑不同事件速度 v 的影响，所以PDR保持不变。而EEAOC方法未采用协作传输， r_e 和 v 均不能影响其数据包传输率，故其PDR一直最低且不变。

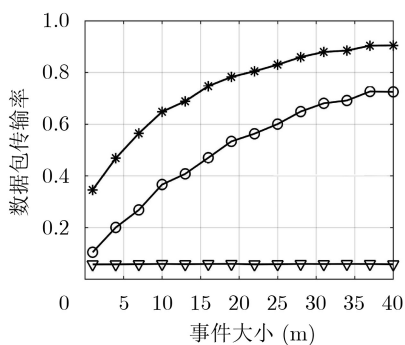


(a) 不同事件大小下的前向通道节点总数

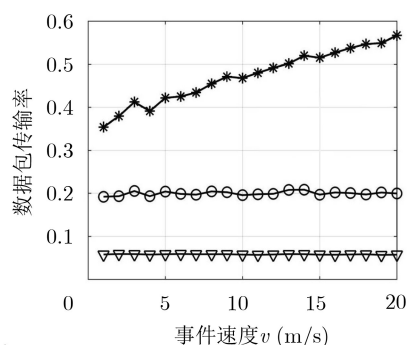


(b) 不同速度大小下的前向通道节点总数

图8 本文方法在不同事件大小和不同速度大小下的前向通道节点总数比较



(a) 不同事件大小下的数据包传输率



(b) 不同事件速度下的数据包传输率

图9 不同方法在不同事件大小和不同事件速度下的数据包传输率

5 实验验证

5.1 实验平台

为验证所提方法的有效性,搭建了由15个传感节点 $s_i(i=1,2,\dots,15)$ 和1个汇聚节点构成的无线传感器网络。各节点均采用TI公司的CC 2530无线收发模块,工作在2.4 GHz频段,无线数据收发遵循IEEE 802.15.4-2006/Zigbee标准。各传感节点配备相应的传感器,负责采集和发送数据,需要时兼做中继;汇聚节点负责接收和处理数据,并将处理结果经UART转USB传送至计算机进行显示。无线数据收发时各节点传输速率为250 kB/s,发射功率为4.5 dBm。

实验场景为10 m × 10 m的室内实验场所,各节点之间存在墙壁、桌椅、器材等多种障碍物,场景的布局和各节点的位置分别如图10所示。实验中采用移动火源来模拟事件的发生和移动,火源的移动速度为0.02 m/s,移动路径如图10中折线所示。各传感节点通过检测温度判断是否有事件发生,温度阈值设置为45°(室温16°),小于45°表明无事件发生,否则有事件发生。设置 $T_s=1\text{ h}$, $T_d=1\text{ s}$ 。

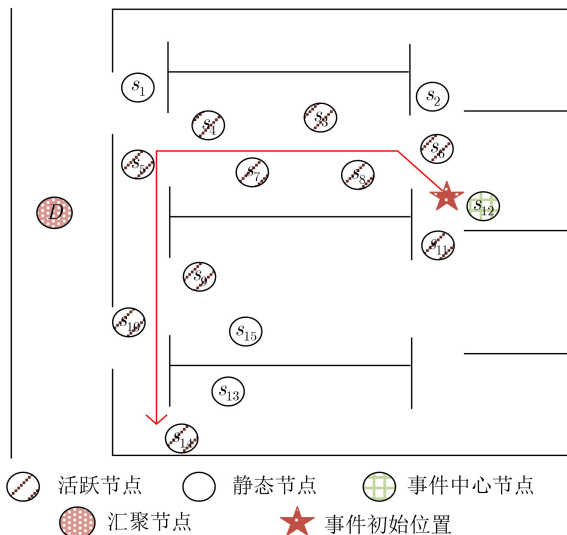


图10 实验场景布局图

5.2 测试结果及分析

以PDR为测试指标,实验对比了本文所提方法与RETP, EEAOC方法的传输性能。实验测试数据如表1所示。其中,每组每种方法下发送的数据包总数为10000。

表1 测试结果

方法	成功接收到的数据包个数			数据包传输率PDR(%)			平均数据包传输率(%)
	第1组	第2组	第3组	第1组	第2组	第3组	
RETP方法	7871	7989	7885	78.71	79.89	78.85	79.15
EEAOC方法	6703	6966	7288	67.03	69.66	72.88	69.86
本文方法	9208	8851	9130	92.08	88.51	91.30	90.63

由表1可知,在每组测试中,EEAOC的PDR最低,RETP次之,本文所提方法具有最高的单次和平均数据包传输率。这是因为EEAOC只采用了直接传输,一旦直接传输失败,则产生中断。而本文方法和RETP均采用了协作传输,直接传输失败时由其他节点协作转发,故传输可靠性得到提升。RETP在协作节点的选择上采用固定的多簇头方式,如果这些簇头到目标节点的信道质量较差,则协作转发仍然会失败。而本文在协作节点的选择上采用竞争方式,在前向通道上选择协作能力更强的节点为最佳中继,进行数据转发,使得数据包传输率更高,从而获得更好的传输性能。

6 结束语

本文提出一种基于事件驱动的动态分簇网络的协作传输方案。根据运动事件的特征,定义了事件的大小、速度和方向,描述了事件簇的形成过程。并提出了基于前向通道的最佳中继选择方法,从处

于事件移动方向上的更接近于事件中心和汇聚节点的区域中选择最佳中继,能更好地实施协作传输。仿真和实验结果表明,相比于RETP和EEAOC方法,本文所提方法能提高数据包传输率,增强数据传输可靠性。

参考文献

- [1] AMUTHA J, SHARMA S, and NAGAR J. WSN strategies based on sensors, deployment, sensing models, coverage and energy efficiency: Review, approaches and open issues[J]. *Wireless Personal Communications*, 2020, 111(2): 1089–1115. doi: 10.1007/s11277-019-06903-z.
- [2] ARANDA J, MENDEZ D, and CARRILLO H. Multimodal wireless sensor networks for monitoring applications: A review[J]. *Journal of Circuits, Systems and Computers*, 2020, 29(2): 2030003. doi: 10.1142/S0218126620300032.
- [3] ULLAH Z. A survey on Hybrid, Energy Efficient and Distributed (HEED) based energy efficient clustering protocols for wireless sensor networks[J]. *Wireless Personal*

- Communications*, 2020, 112(4): 2685–2713. doi: [10.1007/s11277-020-07170-z](https://doi.org/10.1007/s11277-020-07170-z).
- [4] RANGANATHAN A and RANGASAMY B. Analysis of energy-efficient clustering algorithms for Wireless Sensor Network (WSN)[J]. *Journal of Testing and Evaluation*, 2019, 47(6): 3864–3877. doi: [10.1520/JTE20180487](https://doi.org/10.1520/JTE20180487).
- [5] EVER E, SHAH P, MOSTARDA L, *et al.* On the performance, availability and energy consumption modelling of clustered IoT systems[J]. *Computing*, 2019, 101(12): 1935–1970. doi: [10.1007/s00607-019-00720-9](https://doi.org/10.1007/s00607-019-00720-9).
- [6] 赵太飞, 许杉, 屈瑶, 等. 基于无线紫外光隐秘通信的侦察无人机蜂群分簇算法[J]. *电子与信息学报*, 2019, 41(4): 967–972. doi: [10.11999/JEIT180491](https://doi.org/10.11999/JEIT180491).
- ZHAO Taifei, XU Shan, QU Yao, *et al.* Cluster-based algorithm of reconnaissance UAV swarm based on wireless ultraviolet secret communication[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2019, 41(4): 967–972. doi: [10.11999/JEIT180491](https://doi.org/10.11999/JEIT180491).
- [7] XIAO Changjiang, CHEN Nengcheng, GONG Jianya, *et al.* Event-driven distributed information resource-focusing service for emergency response in smart city with cyber-physical infrastructures[J]. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2017, 6(8): 251. doi: [10.3390/ijgi6080251](https://doi.org/10.3390/ijgi6080251).
- [8] ARANZAZU-SUESCUN C and CARDEI M. Anchor-based routing protocol with dynamic clustering for Internet of Things WSNs[J]. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2019, 2019(1): 130. doi: [10.1186/s13638-019-1447-8](https://doi.org/10.1186/s13638-019-1447-8).
- [9] DING Yongsheng, CHEN Rui, and HAO Kuangrong. A rule-driven multi-path routing algorithm with dynamic immune clustering for event-driven wireless sensor networks[J]. *Neurocomputing*, 2016, 203: 139–149. doi: [10.1016/j.neucom.2016.03.052](https://doi.org/10.1016/j.neucom.2016.03.052).
- [10] 谢承翰, 陆赛杰, 李云骥, 等. 无线传感器网络中含未知输入的事件驱动状态估计器设计[J]. *通信学报*, 2017, 38(S1): 200–206. doi: [10.11959/j.issn.1000-436x.2017254](https://doi.org/10.11959/j.issn.1000-436x.2017254).
- XIE Chenghan, LU Saijie, LI Yunji, *et al.* Design of event-triggered state estimator with unknown input in wireless sensor networks[J]. *Journal on Communications*, 2017, 38(S1): 200–206. doi: [10.11959/j.issn.1000-436x.2017254](https://doi.org/10.11959/j.issn.1000-436x.2017254).
- [11] 邵振峰, 蔡家骏, 王中元, 等. 面向智能监控摄像头的监控视频大数据分析处理[J]. *电子与信息学报*, 2017, 39(5): 1116–1122. doi: [10.11999/JEIT160712](https://doi.org/10.11999/JEIT160712).
- SHAO Zhenfeng, CAI Jiajun, WANG Zhongyuan, *et al.* Analytical processing method of big surveillance video data based on smart monitoring cameras[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2017, 39(5): 1116–1122. doi: [10.11999/JEIT160712](https://doi.org/10.11999/JEIT160712).
- [12] SAZAK N, ERTÜRK I, KÖKLÜKAYA E, *et al.* An event-driven WSN MAC protocol design based on active node and dynamic time slot allocation[J]. *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 2013, 21(3): 812–824. doi: [10.3906/elk-1108-14](https://doi.org/10.3906/elk-1108-14).
- [13] LEE W, YIM Y, PARK S, *et al.* A cluster-based continuous object tracking scheme in wireless sensor networks[C]. The 74th IEEE Vehicular Technology Conference, San Francisco, USA, 2011. doi: [10.1109/VETECONF.2011.6093203](https://doi.org/10.1109/VETECONF.2011.6093203).
- [14] LEYVA-MAYORGA I, RIVERO-ANGELES M E, and ARELLANO C C. Performance analysis of a non-preemptive hybrid WSN protocol in mobile environments[C]. The 28th International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops (WAINA), Victoria, Canada, 2014: 486–491. doi: [10.1109/WAINA.2014.83](https://doi.org/10.1109/WAINA.2014.83).
- [15] KRUSHNAJI R D. RE3TP: Reliable and energy efficient event transmission protocol in event driven WSN[C]. IEEE International Conference on Computer, Communication and Control, Indore, India, 2015: 7375683. doi: [10.1109/IC4.2015.7375683](https://doi.org/10.1109/IC4.2015.7375683).
- [16] BIAZI A, MARCON C, SHUBEITA F, *et al.* A dynamic TDMA-based sleep scheduling to minimize WSN energy consumption[C]. The 13th IEEE International Conference on Networking, Sensing, and Control, Mexico City, Mexico, 2016: 7478994. doi: [10.1109/ICNSC.2016.7478994](https://doi.org/10.1109/ICNSC.2016.7478994).
- [17] HU Yuan, NIU Yugang, LAM J, *et al.* An energy-efficient adaptive overlapping clustering method for dynamic continuous monitoring in WSNs[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2017, 17(3): 834–847. doi: [10.1109/JSEN.2016.2632198](https://doi.org/10.1109/JSEN.2016.2632198).
- [18] PRIYA K C K and TERENCE S. RETP: Reliable event transmission protocol in a wireless sensor network[C]. 2013 IEEE International Conference on Emerging Trends in Computing, Communication and Nanotechnology, Tirunelveli, India, 2013: 181–188. doi: [10.1109/ICE-CCN.2013.6528489](https://doi.org/10.1109/ICE-CCN.2013.6528489).
- 李 敏: 女, 1979年生, 副教授, 研究方向为无线通信、无线传感器网络、协作通信等。
- 熊 灿: 男, 1994年生, 硕士生, 研究方向为协作通信。
- 肖 扬: 男, 1994年生, 硕士生, 研究方向为协作通信。