

一种基于休眠调度的数据源拥塞控制方法

黄骏杰 陈晓江 刘晨 房鼎益 王薇 尹小燕 武岳山

(西北大学信息科学与技术学院 西安 710127)

(hjj_9029@163.com)

A Source Data Congestion Control Based on Sleep Schedule

Huang Junjie, Chen Xiaojang, Liu Chen, Fang Dingyi, Wang Wei, Yin Xiaoyan, and Wu Yueshan

(School of Information and Technology, Northwest University, Xi'an 710127)

Abstract WSNs usually operate in duty-cycle mode for long life time monitoring. This operating mode makes the communication links in dynamic, which will bring a new congestion in the network—source data congestion (SDC). Source data congestion can lead to a WSNs node to get its buffer overflowed, cause data lost and even make no response to any forwarding requirements. This problem will get worse in the sensor heterogeneous WSNs for some nodes may generate data in a burst mode. Many solutions about network congestion only focus on making data forwarding to bypass the congested node, or controlling the traffic rate. These solutions have no help on the source data congestion because this congestion is caused by the improper duty-cycle mode. According to this situation, this paper analyses the factors that influence the source data congestion, and proposes a model, called conveyor belt model, to describe the probability of source data congestion accurately. Besides, based on this model, we propose a dormant schedule method, aiming at decreasing the probability of source data congestion by reconfiguring the sleeping timer of some nodes. Furthermore, our theoretical analysis and extensive simulation show that the model can exactly predict the source data congestion, and our method can decrease the probability of source data congestion significantly.

Key words congestion control; source data congestion (SDC); dormant schedule; heterogeneous WSNs; congestion probability prediction

摘要 为了能够长期对监测区域进行持续的数据采集,无线传感网通常运行在休眠调度模式,这种模式使得网络的通信连通性处在动态变化之中,造成一种新的网络拥塞现象——数据源拥塞.这种拥塞问题会造成节点缓存区溢出,从而导致数据丢失,甚至造成节点不响应任何数据转发请求,该问题在传感器异构的无线传感网中表现得更为严重.许多典型的拥塞控制方法是令网络中的数据绕过拥塞节点进行传输,也有一些方法是对拥塞节点的通信速率进行控制,但是以上这些方法无法缓解数据源拥塞的影响.分析影响数据源拥塞的因素,建立了描述节点数据源拥塞概率的传送带模型,提出了一种以降低数据源拥塞概率为目的的节点休眠调度机制(district cooperation schedule, DCS).通过理论推导和实验分析,证明该模型可以较准确地预测数据源拥塞概率,同时DCS可以有效降低数据源拥塞现象的发生.

关键词 拥塞控制;数据源拥塞;休眠调度;异构无线传感网;拥塞概率预测

中图法分类号 TP202⁺.1; TP393

收稿日期:2014-07-23;修回日期:2014-10-30

基金项目:国家科技支撑计划基金项目(2013BAK01B02);国家自然科学基金项目(61170218,61272461,61373177)

通信作者:陈晓江(xjchen@nwu.edu.cn)

无线传感网络 (wireless sensor networks, WSNs), 本文简称传感网, 由多个搭载传感器的网络通信节点 (node) 和少量的汇聚节点 (sink) 组成. 传感网通过节点之间的相互通信, 将采集到的信息通过多跳中转的方式发送至汇聚节点, 实现收集检测数据的功能. 由于传感网具有低成本、部署灵活和生命周期长的特点, 被广泛运用于长期性的野生动物监测^[1]、军事侦察^[2]和环境监测^[3]等领域.

在传感网中, 网络拥塞问题一直是制约网络服务质量 (quality of service, QoS) 的一个重要因素. 由于传感网节点主要的耗能模块为射频模块, 为了延长传感网的生存时间, 节点通常工作在休眠调度模式 (duty-cycle mode)^[4]. 这种工作模式令节点的射频模块定时唤醒和休眠, 达到节约能量、延长网络寿命的目的. 当需要相互通信的 2 个节点的射频模块同时处于唤醒状态时, 双方才能进行通信. 若接收方处于休眠状态时, 数据将无法被传递, 传统传感网中由于节点数据量较少, 发送方可以将数据保存在本地以等待接收方唤醒后再建立通信, 若发送方的数据产生速率较高, 发送方就有数据溢出的风险, 导致网络出现一种新的拥塞现象——数据源拥塞 (source data congestion, SDC). 图 1 用一个简单的例子说明了这种现象. 图 1(a) 中给出了一种可能的网络拓扑结构, 虚线圆代表节点的通信范围, 节点 B 是节点 A 的唯一中转候选节点 (candidate), 节点 A 的数据只有通过节点 B 的转发才能发送至 Sink 节点. 节点 A 在连续采集 4 个时隙的数据后, 其缓存区被占满. 2 个节点的工作周期都为 10 个时隙, 工作占空比为 30%. 图 1(b) 反映了节点 A 发生数据源拥塞的过程. 当节点 B 在第 6 时隙进入休眠的同时, 节点 A 检测到事件发生并开始记录事件. 事件总共持续 12 个时隙, 在第 9 个时隙时, 节点 A 的缓存区已满, 但节点 B 再次唤醒的时刻是第 13 个时隙. 因此, 时隙 10~12 的事件无法继续被节点 A 记录, 造成数据丢失.

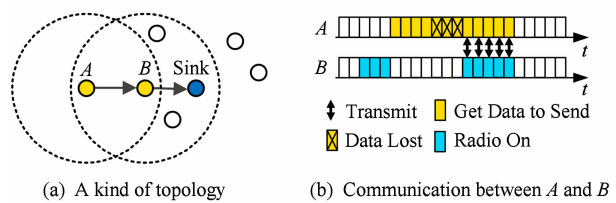


Fig. 1 A case of source data congestion.

图 1 数据源拥塞现象

在以往的研究工作中, 只考虑到由于拓扑因素

导致的网络拥塞^[5], 并没有考虑到源节点 (本文将自身产生数据并处于等待发送状态的节点称为源节点, 将可转发源节点数据的节点称为下一跳候选节点, 下同) 在持续采集数据的过程中, 由于其候选节点无法及时唤醒, 导致源节点数据拥塞的情况. 因此, 本文将网络拥塞分为 2 类: 1) 对于因拓扑结构特殊而产生的拥塞现象, 称为中转拥塞; 2) 对于因候选节点没有及时唤醒导致源节点数据拥塞的现象, 称为数据源拥塞. 已有许多研究对中转拥塞深入分析和论证: 文献[6-7]通过对不同数据赋予优先级, 在网络发生拥塞时可以保证重要数据的可靠传输; 文献[8-9]通过控制拥塞节点的通信速率, 缓解其对网络造成的拥塞; 文献[10-11]使用数据融合的方法, 在节点发送数据的过程中将数据进行处理, 减少总数据量; 文献[12-13]通过建立拥塞感知机制, 使信息绕过发生拥塞的节点进行传输. 而产生数据源拥塞问题的根本原因在于候选节点没有及时唤醒, 因此以上方法无法缓解数据源拥塞. 目前对数据源拥塞问题的研究工作并没有充分开展, 本文将对此问题进行分析讨论.

显然, 休眠调度带给节点的节能效果由工作占空比决定. 因此, 若节点在保证工作占空比不变的前提下, 缩短其休眠周期长度, 即可保证节点依然拥有相同节能效果且数据源拥塞现象将会减少. 但是相对于使用长休眠周期的节点, 短休眠周期会造成节点的射频模块开关操作频繁, 并加重信道竞争的现象, 导致节点单次通信的能量开销提高, 因此降低节点休眠周期的方法并不适用于解决数据源拥塞问题.

传统传感网中, 构成网络的节点类型单一, 数据产生速率较低, 因此不易发生数据源拥塞问题. 随着传感网的发展, 通常在同一个网络中会有多种不同类型的节点共存, 具有这种特性的网络称为异构传感网 (heterogeneous WSNs). 异构传感网有多种类型, 如传感器异构^[14]、通信距离异构^[15]和能量异构^[16]. 本文所讨论的网络为传感器异构网络, 这种网络每个节点产生数据的速率不尽相同. 若对网络中数据产生速率高的节点使用低的休眠周期, 势必造成这类节点的生命周期短于其他节点, 不利于整个网络的长期运行.

针对这种问题, 本文给出了一种调度机制, 称为节点区域协作调度机制 (district cooperation schedule, DCS). DCS 与传统研究调度的工作^[17-20]不同, 传统研究调度信道的目的在于降低碰撞的概率, 缓解信道争用的现象, 达到降低节点功耗的效果; 而 DCS

的目的在于降低数据源拥塞概率. 由于仅通过调整节点休眠时刻, 对工作占空比不作调整, 因此几乎不引入额外能量开销. 本文将通过建模分析和仿真实验, 证明该方法能够显著降低数据源拥塞的概率.

1 系统模型

考虑到传感网类型众多, 为方便问题的分析, 本文以单 Sink 静态传感网为例对数据源拥塞问题展开讨论. 网络中的节点产生数据的模式可分为 2 类: 1) 事件触发型; 2) 周期汇报型. 前者在探测到事件发生时才会产生数据, 节点无法预知事件持续的时间长度和事件的发生概率, 事件持续的时间长度通常不小于节点的休眠周期. 对于后者, 其数据产生的周期是已知, 通常大于休眠周期且每次产生的数据量较少, 一般认为不会发生数据源拥塞. 由于事件触发型节点记录突发性事件时通常会产生大量数据, 因此, 发生数据源拥塞现象主要为事件触发型节点, 本文也将主要讨论事件触发型节点的数据源拥塞问题.

网络中的任意节点都有唯一 ID 编号, 节点记录自身的数据产生速率 V_{data} 和候选节点个数 x . 除汇聚节点不休眠外, 所有节点都有相同的休眠周期 T_{cycle} 、工作占空比 R_{on} 、最大缓存空间 $Buffer_{\text{max}}$ 和通信半径 R . 每个节点与其邻居都有相应的通信成功率 $R_{D_{mn}}$ (指编号为 m 和 n 两节点的通信成功率). 每个节点都有缓存预过载时间 T_f , 表示当节点连续积累了时间长度为 T_f 的数据后, 其缓存已满, T_f 的定义如式(1):

$$T_f = Buffer_{\text{max}} / V_{\text{data}}. \quad (1)$$

对于整个网络, 并不是所有事件触发型节点都会产生数据源拥塞的现象. 对可能会产生数据源拥塞现象的节点, 本文称其为数据爆发型节点 (data burst nodes, DB Nodes). 这类节点需要满足以下条件:

$$T_{\text{awake}} = T_{\text{cycle}} \times R_{\text{on}}, \quad (2)$$

$$T_{\text{cycle}} - T_{\text{awake}} > T_f, \quad (3)$$

其中, T_{awake} 是节点无线模块打开的时间长度. 式(3)描述了最极端的情况: 若源节点只有一个候选节点, 则其因邻居节点休眠而导致数据积累的最大时间长度为 $T_{\text{cycle}} - T_{\text{awake}}$. 如果源节点在这段时间内的持续积累数据可导致缓存溢出, 该节点就有发生数据源拥塞的可能. 为避免由于节点数据发送速率小于数据产生速率而导致拥塞的发生, 本文假设节点发送数据的速率大于节点产生数据的速率. 为了方便分

析讨论, 定义溢出时间比 R_i , 反映节点产生数据的速率:

$$R_i = T_i / T_{\text{cycle}} \times 100\%. \quad (4)$$

本文通过设置本地时钟以描述休眠调度状态. 对编号为 i 的节点, 其本地时钟以 c_i 表示. 例如, 节点的工作周期为 100 个时隙, 工作占空比为 5%. 节点每运行 1 个时隙, 其本地时钟 c_i 增加 1. 当 $c_i = 100$ 时, 节点立刻将其重置为 0, 并打开射频模块. 射频模块打开的时隙长度为 $100 \times 5\% = 5$, 当本地时钟 $c_i = 5$ 时, 节点即关闭其射频模块. 为简化模型, 本文假设节点一旦产生数据, 就立刻打开射频模块寻找接收方. 在通信双方建立通信链接之后, 若非发送方将数据发送完毕或者选择其他节点作为接收方, 则当前被选中的接收方不会因休眠时间到来而单方面中断通信进入休眠模式.

此外, 若某节点启用 DCS, 其协调的对象为该节点的候选节点集, 但是不同路由协议对候选节点集的认定指标不同, 因此, DCS 降低数据源拥塞概率的效果对使用不同路由协议的网络也有差异. 由于本文讨论的网络同时存在中转拥塞和数据源拥塞 2 种现象, 为减少中转拥塞对数据源拥塞讨论的影响, 应使用可以缓解中转拥塞现象的路由协议. TADR 是一个利用场论建立网络数据传输方向梯度的路由协议, 使用该协议发送数据的节点综合考虑候选节点的链路质量、节点在网络中所处的层级以及负载 3 个因素对中转拥塞的影响, 文献[13]已经证明 TADR 适用于解决中转拥塞. 因此, 本文以 TADR 为例, 验证 DCS 的性能.

2 基于休眠调度的数据源拥塞控制方法

由于造成源节点数据源拥塞的根本原因是其下一跳候选节点 (简称候选节点) 无法及时唤醒, DCS 针对这种原因, 通过调度候选节点集的休眠时刻表, 以降低数据源溢出的概率. 本节首先对数据源拥塞现象进行建模, 进而提出降低节点发生数据源拥塞概率的机制, 并对其进行理论证明.

2.1 传送带模型描述

为了对数据源溢出现象作定量分析, 本文建立传送带模型, 该模型将网络中数据的传输过程看作传送带输送货物的行为, 将数据看作传送带上的货物. 对网络中距离汇聚节点最小跳数为 L 的节点, 我们认为其位于网络第 L 层传送带上, 汇聚节点是第 0 层. 货物的运输由高层传送带向低层传送带运

送. 传送带上有定期出现的交换窗, 即通信双方射频模块共同打开的时间. 货物只能通过该窗口改变所处的传送带层级. 除第 0 层传送带外, 其余每条传送带都有最大载货上限, 如果某层传送带的货物没有及时被传输到下一层传送带, 则会在当前层传送带堆积. 若某一层传送带在堆积量超过其最大载货上限的时候依然无法向下一层传送货物, 其将无法接受来自上一层传送带的货物, 上一层传送带的货物将在本层堆积, 以此类推, 直到源节点数据溢出. 图 2 举例说明了在传送带模型中, 一个位于层级 3 的节点记录(运输)3 个事件(货物), 并将数据发送至汇聚节点的全过程, 图 2 中时间轴 t 可看作传送带的运输距离.

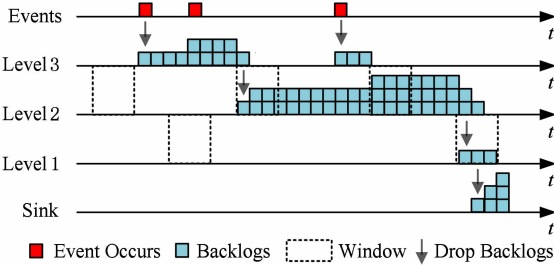


Fig. 2 The conveyor model.

图 2 传送带模型

数据爆发型节点可以位于网络中任何一层. 令 P_{SDC_m} 表示 ID 号为 m 的数据爆发型节点的数据源拥塞概率, 即当前节点的传送带交货性能. 若该节点仅有一个 ID 编号为 n 的邻居, 那么 P_{SDC_m} 可以表示:

$$T_{BSP} = T_{awake} + T_f, \quad (5)$$

$$R_{l_{mn}} = 1 - R_{D_{mn}}, \quad (6)$$

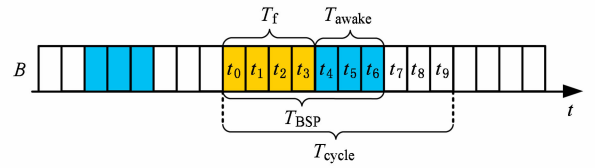
$$h = \min(T_f, T_{awake}), \quad (7)$$

$$P_{D_{mn}} = \frac{1}{T_{BSP}} \left[2 \sum_{i=1}^h R^i + (T_{BSP} - 2h) \times R_{l_{mn}}^h \right], \quad (8)$$

$$P_{SDC_m} = (1 - T_{BSP}/T_{cycle}) + P_{D_{mn}} \times T_{BSP}/T_{cycle}. \quad (9)$$

T_{BSP} , $R_{l_{mn}}$ 和 $P_{D_{mn}}$ 分别为数据爆发安全时间段 (burst saved period, BSP), 通信失败率和因通信失败导致数据源拥塞概率的期望. 依然采用图 1 的场景为例说明以上 3 个参数. 先令节点 A 与节点 B 间的通信成功率为 100%, 节点 A 的 $T_f = 4$, $T_{awake} = 3$. 图 3 截取节点 B 的一个工作周期 $[t_0, t_9]$ 进行分析, 其射频模块打开的时间段为 $[t_4, t_6]$, 若节点 A 在节点 B 射频模块打开的时间段内监测到事件, 则通信链路可以立刻被建立, 因此不会导致数据源拥塞. 同

时, 节点 A 具有一定的数据存储能力, 可最多持续记录 4 个时隙的事件, 若在第 5 个时隙依然无法转发数据, 则导致数据溢出. 所以节点 A 所探测的事件在 t_4 之前的 4 个时隙之内发生, 都不会导致节点 A 发生数据源拥塞. 因此, 节点 A 在 $[t_0, t_6]$ 这段时间产生爆发式数据不会造成数据源拥塞, 用 T_{BSP} 表示. 若事件在 $[t_7, t_9]$ 发生, 则节点 A 必定会发生数据源溢出现象. 此时, 节点 A 在与其候选节点的通信成功率为 100% 的情况下, 发生数据源溢出的概率为 $1 - T_{BSP}/T_{cycle} = 0.3$.

Fig. 3 T_{BSP} .图 3 数据爆发安全时间段 T_{BSP}

显然, 真实情况下节点间的通信成功率通常小于 100%, 由于通信失败会令源节点发送的通信请求无法被接收方正常接收, 进而导致接收方认为发送方无数据发送而进入休眠状态. 因此, 即使事件发生在 T_{BSP} 时间段内, 节点 A 依然有发生数据源拥塞的可能. 本文设置参数 $P_{D_{mn}}$ 用以描述由通信失败造成数据源拥塞的概率. 继续以图 3 为例, 若节点 A 在时刻 t_0 探测到事件, 则其必须与节点 B 在时刻 t_4 成功建立通信, 否则将会造成数据源拥塞, 通信的失败概率为 $1 - R_{D_{mn}}$. 若节点 A 在时刻 t_1 探测到事件, 则节点 A 与节点 B 在 t_4 和 t_5 建立通信都失败才会造成数据源拥塞, 该事件发生的概率为 $(1 - R_{D_{mn}})^2$, 以此类推. 对所有因通信失败而导致数据源拥塞的概率求平均值, 即获得其期望, 用 $P_{D_{mn}}$ 表示. 式(7)(8)的证明属于数列求和公式推导, 本文在此不再赘述. 令本例中通信成功率 $R_{D_{mn}} = 80\%$, 则由于通信失败而导致数据源拥塞的概率为 $P_{D_{mn}} \times T_{BSP}/T_{cycle} = 0.3528$. 则本例中节点 A 的数据源溢出概率为 $(0.3 + 0.3528) \times 100\% = 65.28\%$.

当爆发型节点 m 存在 x 个候选节点, 设候选节点编号分别对应为 1 到 x . 由于其邻居之间的休眠次序相互独立, 根据式(9), 该数据爆发型节点的数据源拥塞概率可写为

$$P_{SDC_m} = \prod_{i=1}^x [1 - (T_{BSP}/T_{cycle})(1 - P_{D_{mi}})]. \quad (10)$$

式(10)综合考虑了节点的通信成功率、工作占

空比、休眠周期、数据产生速率、内存大小以及候选节点个数共 6 个因素,描述了传送带的载货性能. 将式(2)(4)代入式(10),可得式(11):

$$P_{SDC_m} = \prod_{i=1}^x [1 - (R_{on} + R_f)(1 - P_{D_mi})]. \quad (11)$$

2.2 区域协作式调度机制(DCS)的设计

DCS 通过协调数据爆发型节点的候选节点的休眠时刻,以避免候选节点射频模块开启时间重叠,最终达到降低数据爆发型节点数据源溢出概率的目的. 因此,只有当数据爆发型节点的候选节点个数至少为 2,DCS 的协调才有意义. 对于一个使用 DCS 且编号为 m 的数据爆发型节点,设其存在 x 个候选节点,节点 m 需要选择其中 y 个节点进行协调(具体选择方法将在 2.3 节说明),其中 $y \in [2, x]$, $x \in [2, \infty)$,令被协调的 y 个节点依 ID 大小排序,其编号依次为 $\{1, 2, \dots, y-1, y\}$,对于这 y 个节点,其每个节点的本地时钟分别可以对应表示为 $\{c_1, c_2, \dots, c_{y-1}, c_y\}$. DCS 取其中的最小值 $c_0 = \inf\{c_1, c_2, \dots, c_{y-1}, c_y\}$ 作为参照时刻,并计算休眠间隔 $T_{int} = T_{cycle}/y$. 节点 m 创建节点调度表(schedule table, ST) $\{c_0, c_0 + T_{int}, \dots, c_0 + (y-2)T_{int}, c_0 + (y-1)T_{int}\}$,并发给受协调的 y 个节点以修改这些节点的本地时钟. 为确保节点的本地时钟计数值小于 T_{cycle} ,DCS 需要对超出值进行调整. $\forall c_i \in \{c_0, c_0 + T_{int}, \dots, c_0 + (y-1)T_{int}\}$,如果 $\exists c_i \geq T_{cycle}$,则令 $c_i = c_i - T_{cycle}$. 令其他未被 DCS 协调的 $x-y$ 个节点编号为 $\{y+1, y+2, \dots, x-1, x\}$ (例如,当 $x=10, y=6$ 时,此时未被 DCS 协调的节点编号集合即为 $\{7, 8, 9, 10\}$),则经过 DCS 协调后数据爆发型节点 m 的数据源拥塞概率可表示为

$$P_{SDC_m} = D_1 \times D_2, \quad (12)$$

$$D_1 = 1 - (R_{on} + R_f) \sum_{i=1}^y (1 - P_{D_mi}), \quad (13)$$

$$D_2 = \prod_{i=y+1}^x [1 - (R_{on} + R_f)(1 - P_{D_mi})], \quad (14)$$

$$y = \min(x, \lceil T_{cycle}/T_{BSP} \rceil), x \geq 2. \quad (15)$$

若式(13)计算出 $D_1 < 0$,则令 $D_1 = 0$. 式(14)与式(11)同样是描述未受 DCS 协调的候选节点对数据爆发型节点数据源拥塞概率的影响. 式(13)描述的是受 DCS 协调的邻居对数据爆发型节点数据源拥塞概率的影响,若取 $y=0$,则式(12)即为式(11).

式(13)证明. 由于受协调的节点依次唤醒的时间间隔为 T_{int} ,不再是相互独立的事件,它们之间的

唤醒时间相互不重叠,因此,数据爆发型节点在 T_{cycle} 内未被该 y 个候选节点的 T_{BSP} 覆盖的时间长度可表示为 $T_{cycle} - y \times T_{BSP}$,如图 4 所示. 设某受协调节点的编号为 $i, \forall i \in \{1, 2, \dots, y\}$,其对数据爆发型节点 m 的通信成功率为 R_{D_mi} ,则由于通信失败造成数据源拥塞概率的期望值为 P_{D_mi} . 对于节点 m ,在其一个周期长度 T_{cycle} 时间内因通信失败造成数据源拥塞的概率为 $\sum_{i=1}^y (T_{BSP} \times P_{D_mi})/T_{cycle}$. 结合因候选节点未及时开启的情况,最终数据爆发型节点 m 的数据源拥塞概率为 $[T_{cycle} - y \times T_{BSP} + \sum_{i=1}^y (T_{BSP} \times P_{D_mi})]/T_{cycle}$,即得式(13). 证毕.

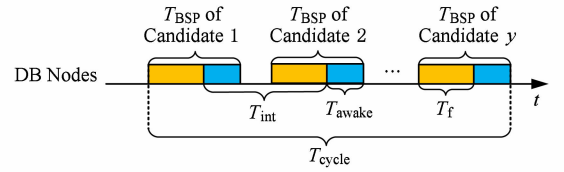


Fig. 4 The duty states of neighbors of a DB node after DCS scheduling.

图 4 数据爆发型节点邻居受协调后的状态

式(15)约束了 DCS 协调节点数量的上下界. 若受协调节点的数量 $y < 2$,则无任何意义,因此 y 不能小于 2. 当 $y = \lceil T_{cycle}/T_{BSP} \rceil$ 时,数据爆发型节点的一个周期已经小于 y 个邻居的 T_{BSP} 总和,假设所有节点之间的通信成功率都为 100%,则 $D_1 \leq 0$,表示 DCS 此时已无法通过增加 y 达到降低数据源拥塞概率的目的,数据爆发型节点与其邻居的通信成功率已经成为制约数据源拥塞概率降低的主要因素.

2.3 DCS 运行机制

实际上并不是所有数据爆发型节点都需要启动 DCS. 式(11)已表明,源节点的候选节点的个数越多,其数据源拥塞概率越低. 设数据源溢出概率的阈值为 P_{th} (该阈值在节点部署前输入节点,可根据监测事件的数据保真度需求确定),若数据爆发型节点 m 计算出 $P_{SDC_m} > P_{th}$ 时,则启动 DCS. P_{th} 的设定直接影响 DCS 协调邻居节点的个数,可以根据不同网络的实际监测需要进行具体设定. 本文将在实验部分讨论 DCS 在不同 P_{th} 的运行效果.

DCS 启动以及运行流程如图 5 所示. 当一个节点 m 被部署于网络时,首先获得其邻居信息(如邻居个数 x ,与邻居 i 的通信成功率 R_{D_mi} 以及邻居 i 的本地时钟 c_i),并根据式(1)(2)(3)判断自身是否

为数据爆发型节点.如果不是数据爆发型节点,则直接进入休眠调度模式;否则,进一步计算当前自身的数据源拥塞概率 P_{SDC_m} . 根据当前的 P_{SDC_m} 与阈值 P_{th} 判断是否启动 DCS. 当节点 m 确定启动 DCS 后,先令所有节点的通信成功率为 100%,计算出需要协调的节点个数 y 并持续广播同步信息,阻止邻居唤醒之后再次进入休眠状态,持续时间长度为 T_{cycle} . 同步结束后,节点 m 选择通信成功率最高的前 y 个

候选节点进行协调,按 2.2 节所述的方法生成 ST,并将其广播. 邻居接收到 ST 时,若发现自身被选中,则修改本地时钟,否则进入休眠调度模式. 由于对于同一个节点,存在收到多个 ST 的可能性,本文旨在验证模型的正确性与 DCS 抑制数据源拥塞的效果,限于篇幅,暂不对该情况作讨论,并假设数据爆发型节点在网络中稀疏分布,任何节点的邻居最多只有一个为数据爆发型节点.

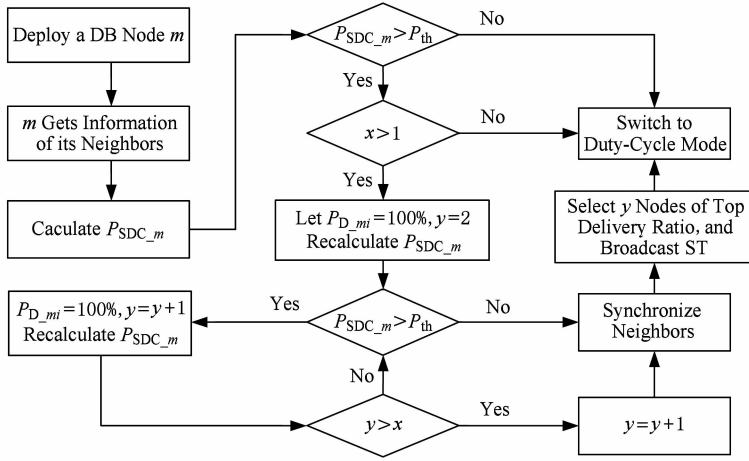


Fig. 5 DCS flow-process diagram.

图 5 DCS 运行流程图

3 实验结果与分析

在各种描述网络拥塞的指标中,数据丢包率是一个重要的指标. DCS 主要用于解决因数据源拥塞造成的丢包现象,由于篇幅限制我们仅关注数据源拥塞比率(source data congestion ratio, SDCR)以及模型误差 err . 其中 SDCR 是数据源拥塞概率的观察值,为发生数据源拥塞次数($times_{SDC}$)与监测到事件发生次数($events_{Total}$)之比. 二者定义式分别如下:

$$SDCR = times_{SDC} / events_{Total}, \quad (16)$$

$$err = |SDCR - P_{SDC}|. \quad (17)$$

为简化问题的讨论,实验采用 MAC 层协议为 X-MAC,节点休眠周期 $T_{cycle} = 100$ 个时隙,事件触发概率以及事件持续的时间长度分别为 1% 和 T_{cycle} . 节点的工作占空比为 $R_{on} = 3\%$,节点的最大存储空间 $Buffer_{max} = 4$ KB,并令一个时隙为 10 ms.

由于模型参数较多,本文主要讨论影响数据源拥塞的 3 个主要参数,分别为 DCS 协调的候选节点个数 y 、节点的通信成功率 R_{D_mn} 和溢出时间比 R_f .

3.1 候选节点数量与数据源拥塞概率的关系

为验证 DCS 在不同 P_{th} 下通过协调数据爆发型节点的邻居,降低数据源拥塞概率的能力,本实验令所有节点的通信成功率为 100%. 实验研究数据爆发型节点在不同 R_f 与候选节点个数情况下数据源拥塞的情况. 其中, R_f 取值为 $[1\%, 100\%]$, 候选节点个数 x 取值范围为 $[1, 100]$. 不同场景下, R_f 和 x 不同,每个场景的节点随机产生 100 000 组本地时钟,对使用不同本地时钟的网络,并模拟其连续运行 1 d 的情况.

令 $P_{th} = 0$, 图 6 为实验的统计结果,反映了数据爆发型节点在不同邻居个数与不同数据产生速率情况下的 SDCR, 纵坐标 R_f 反映了数据产生速率,横坐标为邻居数. 图 6 中色度表示 SDCR 大小. 由图 6 可知, 无论是否使用 DCS, 数据源拥塞现象普遍发生于数据源产生速率过大且邻居节点数量较少的区域. 为比较实验结果, 令 SDCR0 和 SDCR1 分别代表使用 DCS 前和使用 DCS 后数据爆发型节点的 SDCR, 则 DCS 降低数据源拥塞的效果 $P_{improve}$ 可以表示为式(18):

$$P_{improve} = SDCR0 - SDCR1. \quad (18)$$

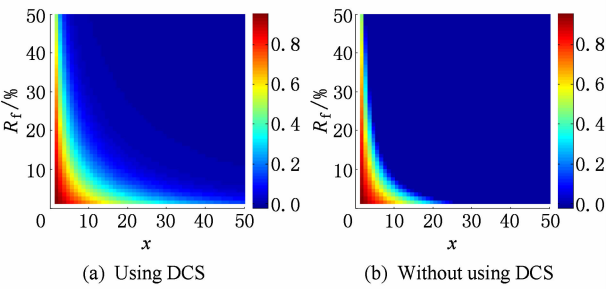


Fig. 6 The SDC probability of a DB node while using DCS or not.

图6 使用 DCS 与否时源节点的 SDC 概率

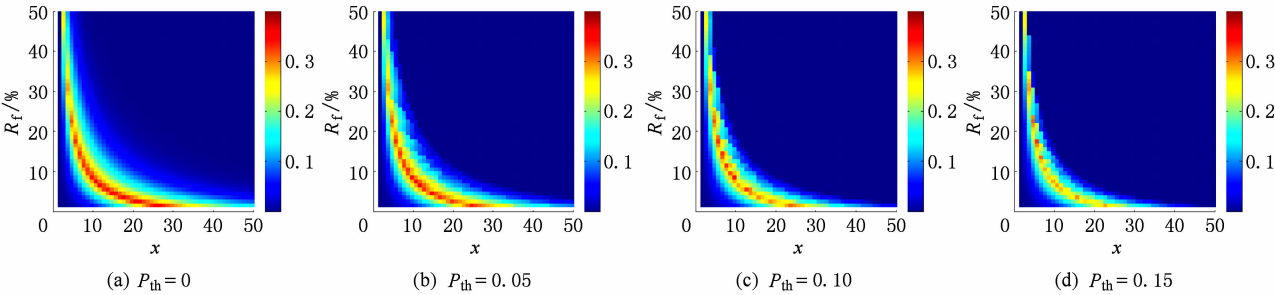


Fig. 7 The improvement of SDC under different P_{th} , while nodes using DCS.

图7 不同 P_{th} 下 DCS 对数据源拥塞改善效果

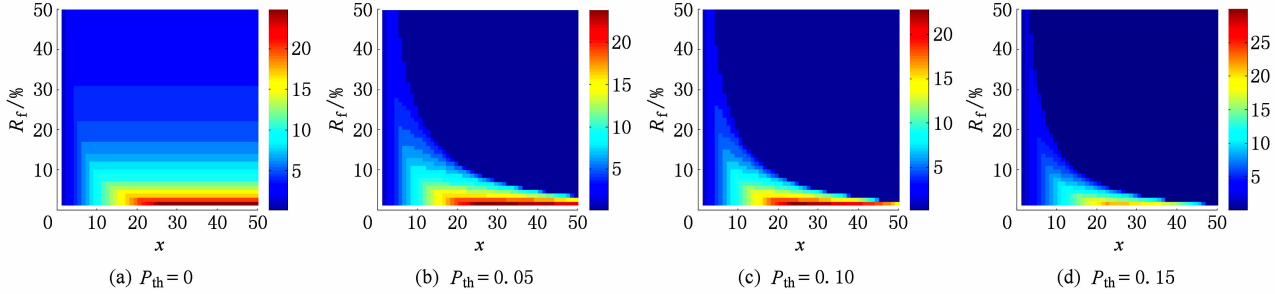


Fig. 8 The number of scheduled nodes under different P_{th} , while nodes using DCS.

图8 不同 P_{th} 下 DCS 所需要协调节点的个数

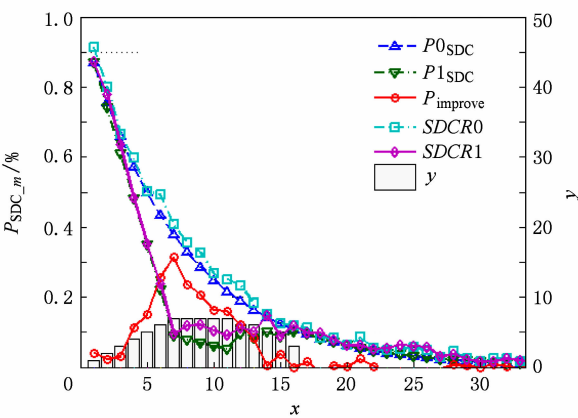


Fig. 9 The influence of the number of candidate nodes on the probability of SDC.

图9 候选节点个数对数据源拥塞概率的影响

在不同的 P_{th} 下,数据爆发型节点调度邻居节点的个数与 DCS 的提高效果如图 7 所示.图 7(a)~(d)是数据爆发型节点在 P_{th} 分别为 0,0.05,0.1,0.15 情况下运行 DCS 的 $P_{improve}$,不同色度表示 $P_{improve}$ 的大小;图 8(a)~(d)分别是数据爆发型节点处于图 7(a)~(d)情况下数据爆发型节点所需要协调的邻居个数,其色度代表所需协调的候选节点个数.

为直观分析,在图 9 中取图 7(c)和图 8(c)中 $R_f=10\%$ 的 XZ 平面组成双纵坐标图,设 P_{0SDC} 和 P_{1SDC} 分别代表数据爆发型节点不使用 DCS 和使用 DCS 时根据式(12)计算出的数据源拥塞概率理论值.

在图 9 中,左纵坐标代表数据源拥塞概率,右纵坐标代表协调节点个数.当候选节点个数为 1 时,DCS 无显著降低数据源拥塞概率作用.随着候选节点个数提高至 7, $SDCR_0$ 和 $SDCR_1$ 分别为 41.633% 和 9.852%,DCS 降低数据源拥塞效果达到最大值 31.781%.此时 P_{1SDC} 理论值为 9%,已小于阈值 $P_{th}=0.1$,故即使 x 增加, y 依然保持不变.随着 x 增加,数据源拥塞概率逐渐减小,当 $x=12$ 时,数据爆发型节点只需要协调 6 个候选节点即可令数据源拥塞概率小于 0.1,因此,受协调的节点个数此后逐渐减少.实验结果显示,数据源拥塞概率的观察值普遍比理论值高,这是由于网络所使用的路由协议决定的.DCS 虽然给节点增加了数据转发的机会,但最终仍

然是由节点使用的路由协议,根据当前的链路质量和下一跳节点负载状况决定是否转发数据.使用TADR路由协议的网络会存在源节点即使有数据要发送且其候选节点唤醒、但不转发数据的情况.图10统计了本实验的误差累计分布概率.

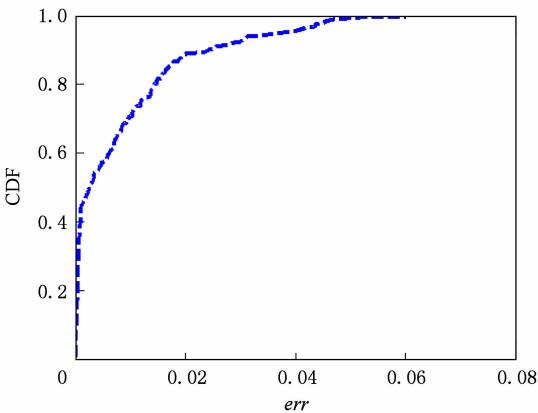


Fig. 10 The CDF of model error *err*.

图 10 模型误差 *err* 累积分布函数图

本次实验 *err* 均值为 0.008 3,最大值为 0.06.结果显示, $err < 0.02$ 的累计概率为 88.549%,结合图 9 观察,实验结果与理论值相差不大,趋势基本一致.因此,本实验验证了传送带模型的正确性.

3.2 通信成功率与数据源拥塞概率关系

2.1 节已论证传送带模型中邻居节点个数 *x*、协调邻居个数 *y* 与溢出时间比 *R_i* 对数据源拥塞概率影响与理论值基本一致,本节主要论证数据爆发型节点与其邻居节点通信成功率对其数据源拥塞概率的影响.因此,需要固定其余参数,具体参数配置如表 1 所示.当这些参数发生变动时,可使用同样的方法进行验证.由于数据爆发型节点 *m* 与候选节点的通信成功率取值随机且相互独立,而数据爆发型节点的数据源拥塞概率是受所有候选节点的通信成功率共同影响.本实验设参数 *R_{D_mean}* 作为 *m* 与其所有候选节点通信成功率的平均值,总体反映链路质

Table 1 Parameters of the Network

表 1 网络参数配置

Parameters	Value
<i>x</i>	10
<i>y</i>	7
<i>R_i</i> / %	10
<i>R_{on}</i> / %	3
<i>R_{D_mi}</i> / %	1~100
<i>P_{th}</i> / %	10

量.本实验随机产生 10 组场景样本,分别对应编号 1~10.在第 *k* 组场景样本中,节点间的通信成功率取值范围为 $[(k-1) \times 5\%, (k+1) \times 5\%]$.10 组场景样本的 *R_{D_mean}* 如表 2 所示.对每个场景样本随机产生 100 000 组本地时间,对使用不同本地时间的网络场景,模拟其运行 1 d 的情况.

Table 2 The *R_{D_mean}* of 10 Samples

表 2 10 个样本的 *R_{D_mean}*

<i>k</i>	<i>R_{D_mean}</i> / %
1	4.6
2	16.2
3	25.1
4	35.9
5	44
6	57.2
7	64
8	75.5
9	85.9
10	95.5

图 11 列出了实验结果,随着候选节点的通信成功率增加,数据爆发型节点的数据源拥塞概率也相应减少,这与本文所提出的模型分析结果趋势一致.该实验中,使用 DCS 的数据爆发型节点的数据源拥塞概率普遍比未使用 DCS 时要高,再次印证了 DCS 对于数据源拥塞的改进效果.此外,本实验中的模型误差如图 12 所示,*err* 最大值为 0.078 8,平均值为 0.024 9,其 $err < 0.04$ 所占的比重为 85.84%.观察值与理论值基本相同,在进一步验证模型正确性的同时,也证明了 DCS 对节点数据源拥塞现象的改善效果.因此,该模型对于数据源拥塞的预测具有重要参考价值.

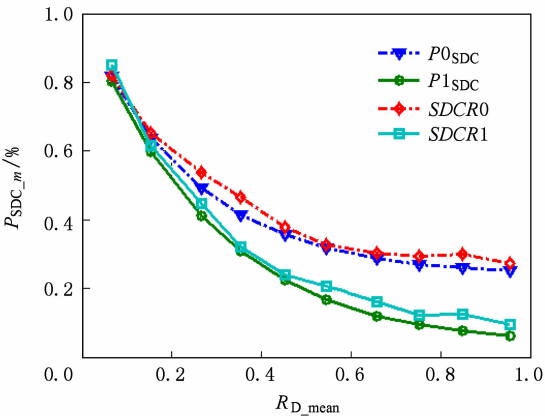


Fig. 11 The influence of delivery ratio on SDC probability.

图 11 通信成功率对数据源拥塞概率的影响

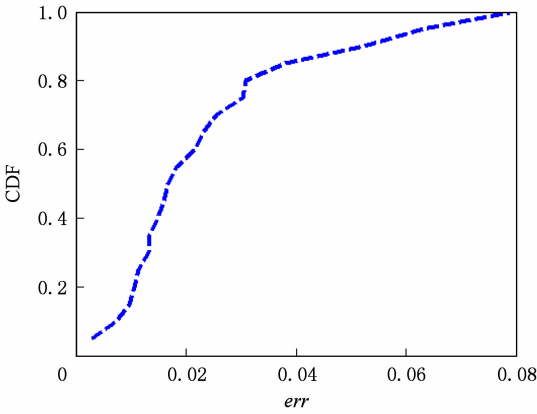


Fig. 12 The CDF of model error *err*.
图 12 模型误差 *err* 累积分布函数图

4 结束语

本文以异构传感网为背景,提出一种新型的网络拥塞现象——数据源拥塞,并通过分析各种对数据源拥塞现象有影响的参数,建立了用于描述数据源拥塞现象的传送带模型,可用于预测节点发生数据源拥塞的概率.同时,本文提出了一种以降低数据源拥塞概率为目的的休眠调度方法 DCS,并在最后的仿真实验中验证了传送带模型的正确性和 DCS 降低数据源拥塞概率的性能,为提高网络服务质量提供了新思路.

然而,DCS 在实际应用中还有若干问题需要解决.如 DCS 对节点时钟的精确性有较高要求,如何应对节点时漂带来的负面影响,是仍需要探讨的一个问题,令节点周期性校对时钟是一种可能的解决办法,这方面的工作正在进行.此外,如何将 DCS 用在高密度的数据爆发型节点网络,同样是一个值得深入思考的问题.这种情况下,存在多个数据爆发型节点协调同一个候选节点的情况,此时需要进行网络资源分配公平性的论证.关于以上问题,我们将在未来工作中继续研究和讨论.

参 考 文 献

[1] Lee S H, Lee S, Song H, et al. Wireless sensor network design for tactical military applications: Remote large-scale environments [C] //Proc of the 28th IEEE Conf on Military Communications. Piscataway, NJ: IEEE, 2009: 911-917
[2] He Tian, Krishnamurthy S, Stankovic J A, et al. Energy-efficient surveillance system using wireless sensor networks [C] //Proc of the 2nd Int Conf on Mobile Systems, Applications, and Services. New York: ACM, 2004: 270-283

[3] Mo Lufeng, He Yuan, Liu Yunhao, et al. Canopy closure estimates with GreenOrbs: Sustainable sensing in the forest [C] //Proc of the 7th ACM Conf on Embedded Networked Sensor Systems. New York: ACM, 2009: 99-112
[4] Polastre J, Hill J, Culler D. Versatile low power media access for wireless sensor networks [C] //Proc of the 2nd Int Conf on Embedded Networked Sensor Systems. New York: ACM, 2004: 95-107
[5] Borasia S, Raisingham V. A review of congestion control mechanisms for wireless sensor networks [G] //Technology Systems and Management. Berlin: Springer, 2011: 201-206
[6] Wang Chonggang, Li Bo, Sohrawy K, et al. Upstream congestion control in wireless sensor networks through cross-layer optimization [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2007, 25(4): 786-795
[7] Yaghmaee M H, Adjeroh D. A new priority based congestion control protocol for wireless multimedia sensor networks [C] //Proc of the Int Symp on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM 2008). Piscataway, NJ: IEEE, 2008: 1-8
[8] Akan Ö B, Akyildiz I F. Event-to-sink reliable transport in wireless sensor networks [J]. IEEE/ACM Trans on Networking, 2005, 13(5): 1003-1016
[9] Yang Xinhao, Lu Jinjun, Wang Zhiqian. Congestion control algorithm based on min-rate in wireless sensor network [J]. Information and Control, 2010, 39 (5): 513 - 518 (in Chinese)
(杨敬豪, 陆锦军, 王执铨. 无线传感器网络中基于最小速率的拥塞控制算法[J]. 信息与控制, 2010, 39(5): 513-518)
[10] Prabakaran N, Naresh K, Kannan R J. ICT and Critical Infrastructure; Proc of the 48th Annual Convention of Computer Society of India-Volume I [M]. Berlin: Springer, 2014: 321-329
[11] Pinto A R, Montez C, Araújo G, et al. An approach to implement data fusion techniques in wireless sensor networks using genetic machine learning algorithms [J]. Information Fusion, 2014, 15: 90-101
[12] Li Shanshan, Liao Xiangke, Zhu Peidong, et al. Congestion avoidance, detection and mitigation in wireless sensor networks [J]. Journal of Computer Research and Development, 2007, 44(8): 1348-1356 (in Chinese)
(李姗姗, 廖湘科, 朱培栋, 等. 传感器网络中一种拥塞避免、检测与缓解策略[J]. 计算机研究与发展, 2007, 44(8): 1348-1356)
[13] Ren Fengyuan, He Tao, Das S, et al. Traffic-aware dynamic routing to alleviate congestion in wireless sensor networks [J]. IEEE Trans on Parallel and Distributed Systems, 2011, 22(9): 1585-1599
[14] Hu Yuefei, Li Wenzhong, Chen Xin, et al. A probabilistic routing protocol for heterogeneous sensor networks [C] //Proc of the 5th IEEE Int Conf on Networking, Architecture and Storage (NAS). Piscataway, NJ: IEEE, 2010: 19-27
[15] Li Han. LEACH-HPR: An energy efficient routing algorithm for heterogeneous WSN [C] //Proc of the IEEE Int Conf on Intelligent Computing and Intelligent Systems (ICIS). Piscataway, NJ: IEEE, 2010: 507-511

[16] Kumar D, Aseri T C, Patel R B. Multi-hop communication routing (MCR) protocol for heterogeneous wireless sensor networks [J]. International Journal of Information Technology, Communications and Convergence, 2011, 1(2): 130-145

[17] Koubaa A, Alves M, Attia M, et al. Collision-free beacon scheduling mechanisms for IEEE 802. 15. 4/Zigbee cluster-tree wireless sensor networks [C] //Proc of the 7th Int Workshop on Applications and Services in Wireless Networks (ASWN). Piscataway, NJ: IEEE, 2007: 1-8

[18] Cano C, Bellalta B, Sfairopoulou A, et al. A low power listening MAC with scheduled wake up after transmissions for WSNs [J]. Communications Letters, 2009, 13(4): 221-223

[19] Jang B, Lim J B, Sichitiu M L. AS-MAC: An asynchronous scheduled MAC protocol for wireless sensor networks [C] // Proc of the 5th IEEE Int Conf on Mobile Ad Hoc and Sensor Systems. Piscataway, NJ: IEEE, 2008: 434-441

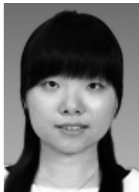
[20] Incel O D, van Hoesel L, Jansen P, et al. MC-LMAC: A multi-channel MAC protocol for wireless sensor networks [J]. Ad Hoc Networks, 2011, 9(1): 73-94



Huang Junjie, born in 1990. Master in Northwest University. His main research interests include wireless sensor networks.



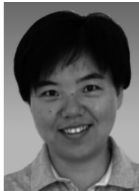
Chen Xiaojiang, born in 1973. PhD and professor in Northwest University. Member of China Computer Federation. His main research interests include wireless sensor networks, ubiquitous computing and network security.



Liu Chen, born in 1986. PhD and assistant engineer in Northwest University. Member of China Computer Federation. Her main research interest is wireless sensor networks.



Fang Dingyi, born in 1959. PhD, professor and PhD supervisor in Northwest University. Senior member of China Computer Federation. His main research interests include wireless sensor networks, distributed system and network security.



Wang Wei, born in 1977. PhD and lecturer in Northwest University. His main research interests include wireless sensor networks.



Yin Xiaoyan, born in 1978. PhD and lecturer in Northwest University. Her main research interests include wireless sensor networks and QoS.



Wu Yueshan, born in 1961. PhD and professor in Northwest University. His main research interests include wireless sensor networks and RFID.