

任 鹏,张剑英,冯小龙. 能耗均衡的煤矿井下巷道 WSN 跨层路由协议[J]. 煤炭学报,2016,41(2):522-530. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2015.0745

Ren Peng, Zhang Jianying, Feng Xiaolong. Energy efficient cross-layer routing for wireless sensor network in coal mine roadway[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(2): 522-530. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2015.0745

能耗均衡的煤矿井下巷道 WSN 跨层路由协议

任 鹏,张剑英,冯小龙

(中国矿业大学 信息与电气工程学院,江苏 徐州 221116)

摘 要:为了适应煤矿井下巷道窄长的空间结构和复杂的环境,提高网络的稳定性和传输效率,提出一种能耗均衡跨层 WSN 路由传输协议(EBUCR)。分析数据传输不对称造成的网络能量空洞现象,提出基于有效密度函数 $\rho(x)$ 的非均匀分簇算法,并在此基础上结合跨层设计思想,将下一跳路由节点的链路可用带宽和节点负载容量作为选取路由节点的重要因素。仿真实验表明,与 LEACH, HEED 和 EEUC 三种算法比较,EBUCR 满足非均匀分簇策略,有效的优化了网络的能量消耗,延长了网络的生命期,提高了网络吞吐量和传输率,更适用于井下巷道内大规模部署的传感器节点数据传输控制。

关键词:无线传感器网络;簇首生成密度;能耗均衡;跨层设计

中图分类号:TD655.3

文献标志码:A

文章编号:0253-9993(2016)02-0522-09

Energy efficient cross-layer routing for wireless sensor network in coal mine roadway

REN Peng, ZHANG Jian-ying, FENG Xiao-long

(School of Information and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: In order to adapt to the space structure and environment characteristics of coal mine roadway, and improve the performance and prolong the lifetime of a network, this paper presents an energy efficient cross-layer routing mechanism for wireless sensor network in the environmental monitoring in coal mine roadway. The authors theoretically analyze the problem of unbalanced energy exhaustion among cluster heads in the whole network, and calculate the effective density function ($\rho(x)$) which is used for cluster head selection. The authors also present a cross-layer routing scenario with the cluster heads selection strategy, which considers available link bandwidth and available queue buffer length of routing nodes. Simulation results show that the proposed scheme outperforms other algorithms in terms of the energy balance of average node, prolongs the network lifetime and improves network throughput and packet delivery ratio. The EBUCR is more suitable for the monitoring in coal mine roadway.

Key words: WSN; density of cluster heads distributing; balancing energy consumption; cross layer design

目前无线传感器网络(WSN)已应用于煤矿井下的环境监测,(如:针对巷道,掘进面,采空区等区域的温度、湿度、瓦斯体积分数、风速、烟雾等数据的监

测),由于 WSN 价格低廉,方便快速部署和自组织网络的优点,它更适用于煤矿井下抢险救灾和大规模部署。然而,煤矿井下地形地质环境比较特殊,如巷道

窄长的空间受限结构和巷道墙壁煤岩地质特征。如何优化网络性能和数据传输,构建稳定可靠的无线传感器网络对智慧矿山建设具有重要意义。文献[1]对矿山井下的拓扑关系,从节点部署方面进行研究,然而,随着节点数量的增加和数据采样精度的提高,节点部署问题将面临巨大挑战。文献[2]针对煤矿工作面 WSN 的定位,从中继节点部署和节点能耗方面分析,实现移动目标定位和延长网络生命。文献[3]针对 WSN 在矿井巷道监测系统中的应用,利用分簇技术将网络成分层拓扑结构,进行组网控制。由于煤矿井下巷道为两侧狭窄、长距离的空间结构特征,使其 WSN 节点分布成带状。另外,加之巷壁煤岩对电磁波的反射、衍射、散射及多径传播所造成的频率选择性衰落,单跳链路传输无法适应井下巷道复杂的环境要求。分簇多跳网络相比平面网络结构更适应井下网络传输需求^[4]。

在多跳分簇网络中,簇首节点除了收集本簇内成员节点的信息外还要作为路由节点转发其他簇集的数据,同时簇首也构成了传感器网络的上层骨干网。以汇聚节点为中心,数据传输按照多对一的模式进行,致使靠近 Sink 基站的节点能耗消耗过大,节点过早的“死亡”,以至于 Sink 基站周围出现网络拓扑断裂,即“能量空洞”问题,降低了网络的稳定性和存活时间。Soro 等首次提出 UCS 算法^[5],利用非均匀分簇的方法来解决能耗不均衡,但文中考虑的是异构网络,簇首为超级节点,不具一般性。文献[6]提出的 EECS 算法和文献[7]提出的 EEUC 算法考虑了网络中簇首节点可能会承担更多的通信任务,单位时间内消耗的能量较多,设计一种大小不同簇集,使能耗较多的区域形成较小的簇集,来均衡网络中各节点的能耗。其中 EEUC 算法是把节点距离 Sink 节点的距离和节点剩余能量作为簇首选择的加权参数,构建大小不均的簇集,簇间路由仍然以距离代价和剩余能量作为判别依据,没有考虑中继节点缓冲队列是否出现积压和数据包丢失现象,进而可能引发多次重传造成资源的浪费。

针对井下多跳传输网络中数据传输不对称性造成的区域内节点能耗不均衡,本文在分簇策略和跨层路由设计做了研究,提出一种能耗均衡的非均匀分簇跨层路由机制(EBUCR, Energy-Balance Unequal Clustering Routing Scheme)。从成簇规则和簇间路由由两方面考虑,设计一种能耗均衡的非均匀分簇跨层路由方案。与已有的研究相比,本文主要的创新工作有:①通过分析簇间数据传输不对称,构造能耗均衡模型,

提出簇首有效生成密度,来作为簇首选举的重要参考因子,设计一种非均匀分簇算法;②簇间路由采用跨层设计技术,考虑节点负载均衡,预防数据传输时出现数据积压队列引发网络拥塞,造成资源的不必要浪费和网络延迟。

1 系统模型与问题描述

1.1 网络模型

无线传感器网络节点分布可分为随机分布和按照一定密度的均匀分布。为了提高对巷道监测区域信息的采样精度和准确全面,网络节点按照一定密度均匀分布。图 1(a)为节点在巷道内的 3D 分布图,为了便于分析,将其映射到二维坐标下,如图 1(b)所示。实际上,二维坐标下节点间的关系并没有发生变化。

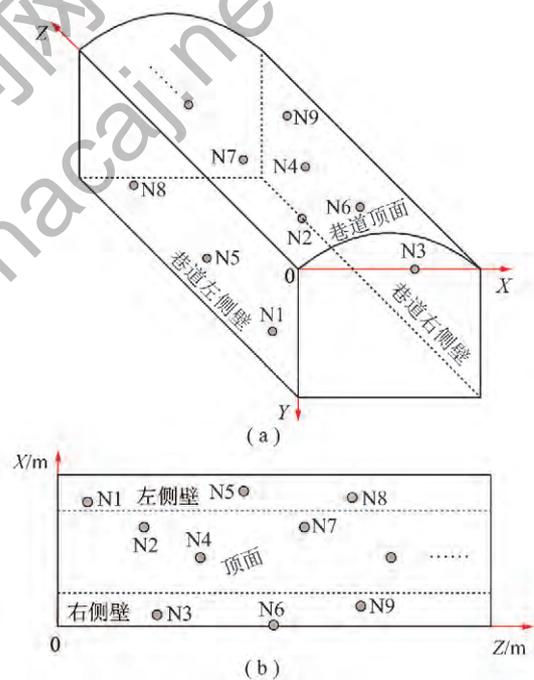


图1 节点在巷道中的分布

Fig. 1 Sensor nodes deployment in tunnel

本文假设有 N 个传感器节点均匀分布于巷道监测区域内,且网络遵循如下规则:①网络节点较为均匀地部署与巷道两侧巷壁和顶面,且固定不变;②网络节点同构型,且有唯一的 ID 号,在网络中地位和作用都一样具有相同的初始能量 E_0 ;③网络采用分簇技术,簇内为单跳通信方式,簇间为以簇首为路由节点的多跳通信方式;簇内数据传输考虑数据融合数据融合率为 θ ,簇间数据传输不考虑数据融合;④网络节点发射功率可根据需要调节;⑤网络中只有一个基站,固定于巷道的入口或者出口处与井下以太网相连,能量不受限制。

1.2 无线通信模型

本文采用与文献[7]类似的无线通信能量消耗模型,若节点向距离为 d 的节点发射 k 个数据包时,其数据发送能耗为

$$E_{Tx}(k, d) = \begin{cases} ke_{elec} + k\varepsilon_{fs}d^2, & d < d_0 \\ ke_{elec} + k\varepsilon_{mp}d^4, & d \geq d_0 \end{cases} \quad (1)$$

其中, e_{elec} 为发射电路损耗的能量。若传输距离小于阈值 d_0 , 功率放大损耗采用自由空间模型; 当传输距离大于等于阈值 d_0 时, 采用多路径衰减模型。 ε_{fs} , ε_{mp} 分别为这两种模型中功率放大所需的能量。

节点接收 k 个数据消耗能量为

$$E_{Rx}(k, d) = E_{Rx-elec}(k) = ke_{elec}$$

1.3 能耗不均衡问题

从数据传输模式的角度分析, 多跳传输中由于路由节点传输数据量不等造成网络节点间能耗不均衡的问题。因为无线传感器网络节点间通信距离为两个节点间的直线距离, 本文简化模型仅从二维坐标角度考虑。如图2模型所示, 无线传感器节点分布的巷道 A 被划分成 n 个区域 $A = [A_1, A_2, \dots, A_n]$, n 数值越大表明其区域距离汇聚节点越近。由于网络采用多跳传输, A_n 区域内簇首节点不仅发送本区域内采集到的数据还要转发 A_{n-1} 区域内发送来的数据, A_n 区域内传输的数据量 $D_{A_n} = \sum_{i=1}^{n-1} D_{A_i} + B_{A_n}$, B_{A_i} 表示 A_n 区域内自身采集需要发送给基站的数据。 $D_{A_i} > D_{A_{i-1}}$, 由1.2节可知簇首节点能耗: $E_{total}(k, d) = k(E_{Tx} + E_{Rx})$, $E_{A_i}(D_{A_i}, d) = D_{A_i}(E_{Tx} + E_{Rx})$, 且 $E_{A_i} > E_{A_{i-1}}$, 所以靠近汇聚节点较近的区域内簇首节点能量消耗要大于远离汇聚节点区域的簇首能量消耗。解决此问题的方法就是在靠近 Sink 节点周围网络生成较多的簇首(即: 路由节点), 将不同区域内簇首承担数据传输量趋于均匀, 这样不至于出现靠近 Sink 节点的节点过早的消耗完能量, 进而实现网络生命最大化。问题归纳为如下数学模型:

解决此问题的方法就是在靠近 Sink 节点周围网络生成较多的簇首(即: 路由节点), 将不同区域内簇首承担数据传输量趋于均匀, 这样不至于出现靠近 Sink 节点的节点过早的消耗完能量, 进而实现网络生命最大化。问题归纳为如下数学模型:

解决此问题的方法就是在靠近 Sink 节点周围网络生成较多的簇首(即: 路由节点), 将不同区域内簇首承担数据传输量趋于均匀, 这样不至于出现靠近 Sink 节点的节点过早的消耗完能量, 进而实现网络生命最大化。问题归纳为如下数学模型:

$$\begin{aligned} & \max \quad \{T_{net}\} \\ \text{s. t.} \quad & \frac{E_{A_n}}{Q_{A_n}} = \frac{E_{A_{n-1}}}{Q_{A_{n-1}}} = \dots = \frac{E_{A_1}}{Q_{A_1}} \end{aligned} \quad (2)$$

其中, Q_{A_n} 为 A_n 区域内簇首节点生成数量, 它与簇首生成密度、区域距离汇聚节点的距离及区域面积有关系。簇首生成密度节点这一问题将在下一节做具体的介绍。

1.4 簇首密度函数

通过构造的数学模型来分析簇首节点能量消耗不均衡问题。假设系统网络模型中生成的簇首节点

集合为 CH , $CH = \{CH_1, CH_2, \dots, CH_M\}$ 路由节点分布如图2所示, 在基站 Sink 节点一侧, Sink 节点位于坐标原点。实际中 $M = Np_0$, p_0 为簇首生成率; M 为网络中生成簇首的总量。数据到达率一般有泊松到达、确定性到达、均匀分布到达3种情况可应用来描述。本文采用确定性到达模式, 即假设路由节点单位时间内产生数据速率为 λ 比特。传感器节点能耗主要集中在数据传输上, 设节点发送 1 bit 数据消耗的能量是 $e_{Tx}(1, d)$, 接受 1 bit 数据消耗的能量是 $e_{Rx}(1, d)$ 。假设簇首节点能达到下一跳的通信距离为 $L/2$, $L/2$ 为网络总的部署区长度, 参数也可表示为距离汇聚节点最远的节点距离值, S 为距离 Sink 节点较近的簇首节点距离, $\rho(x)$ 为到汇聚节点距离为 x 的簇首节点密度函数, $\rho(x)$ 决定着不同区域内簇首的分布数量或簇首形成密度, A_n 区域内簇首数量为

$$Q_{A_n} = \int_{S-L/2}^{S+L/2} \rho(x) dx \quad (3)$$

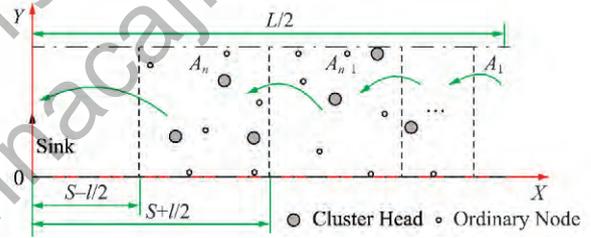


图2 上层骨干网多跳模型

Fig. 2 Upper backbone network multi-hop model

A_n 区域内簇首节点生成的数据速率为 λ , 所以在单位时间 t 内, 位于 A_n 右边区域的节点发送数据时需要通过 A_n 区节点来转发数据, 所以区域 A_n 的能量消耗为

$$E_{A_n}(t) = \left[(e_{Tx} + e_{Rx}) \int_{S+L/2}^{L/2} \lambda \rho(x) dx + e_{Tx} \int_{S-L/2}^{S+L/2} \lambda \rho(x) dx \right] E_0 \quad (4)$$

A_n 区右侧的能量消耗为

$$E_{rA_n}(t) = \left[(e_{Tx} + e_{Rx}) \int_{S+L/2}^{L/2} \lambda \rho(x) dx - e_{Rx} \int_{S-L/2}^{S+L/2} \lambda \rho(x) dx \right] E_0 \quad (5)$$

A_n 区右侧的簇首生成数量为 $Q_{rA_n} = \int_{S+L/2}^{L/2} \rho(x) dx$

了使系统网络中各节点能耗趋于平衡, 则 A_n 区各节点和其右侧的节点簇首节点平均能耗近似相等。则有

$$\frac{E_{A_n}}{Q_{A_n}} = \frac{E_{rA_n}}{Q_{rA_n}} \quad (6)$$

由于区域内节点均匀分布密度相差不大,且当在大范围区域内, $S \gg l$ 时,有 $S+l/2 = S-l/2 = S$ 则

$$\rho(x) = \text{Arg} \left(\frac{(e_{Tx} + e_{Rx}) \int_{S+l/2}^{L/2} \lambda \rho(x) dx + e_{Tx} \int_{S-l/2}^{S+l/2} \lambda \rho(x) dx}{\int_{S-l/2}^{S+l/2} \rho(x) dx} = \frac{(e_{Tx} + e_{Rx}) \int_{S+l/2}^{L/2} \lambda \rho(x) dx - e_{Rx} \int_{S-l/2}^{S+l/2} \lambda \rho(x) dx}{\int_{S+l/2}^{L/2} \rho(x) dx} \right) \quad (8)$$

从而得:

$$\rho(x) = (L - 2S) \frac{\lambda(e_{Tx} + e_{Rx})}{2lE_0} \quad (9)$$

由前面假设可近似认为

$$\int_0^{L/2} \rho(x) dx = M \quad (10)$$

通过式(8)和(9)求解方程,得出:

$$\rho(x) = \frac{2(L - 2S)C}{L^2} \quad (11)$$

其中, C 是一个常量,由 λ, e_{Tx}, e_{Rx} 和 E_0 决定。通过分析式(11)可知,为了达到区域内簇首节点的平均能耗相同,区域内簇首密度与其距离汇聚节点的距离呈递减关系。即:距离基站越近的地方,传感器路由节点的密度越高,距离基站越远的地方,传感器路由节点的密度越低。

由此可知,如果要使网络内各处节点能耗趋于均衡即生命期趋于相同,则簇首节点分布应遵循分布密度为 $\rho(x)$ 的不均匀分布,才能实现簇间路由由节点的能耗均衡。文献[8]给出了非均匀分布下实现网络能耗绝对均衡的不可能性,但是,如果簇首节点分布能遵循分布密度为 $\rho(x)$ 的不均匀分布,可以实现次优的能耗均衡,此密度称为有效生成密度。此有效生成密度函数将用于后面簇的生成以及簇间路由数据包分发的重要参考度量。

2 簇首非均匀分布的跨层路由算法

井下巷道人员、设备流量大,同时受到温度、湿度、烟雾等因素的影响,无线信号传输具有时变性,这使得无线网络协议各层之间具有较强的耦合性。为了达到路由节点在业务传输中公平性,并有效的防止数据积压造成的拥塞现象,需要对每个簇首节点的当前状态进行实时的检测,并在路由选择中加以考虑。传统的分层网络协议设计,在无线网络时变特性的影响下,并不是有效的设计方法^[9]。这主要是因为传统的 OSI 分层参考模型不能够对无线网络资源进行整体管理,网络业务负载的均衡性和资源分配的公平性较差。跨层设计思想从全局出发^[10],考虑各方面性能的折中,从而进一步提升网络的性能。本文跨层

$$\int_{S-l/2}^{S+l/2} \rho(x) dx = \int_{S-l/2}^{S+l/2} \rho(s) ds \quad (7)$$

将式(7)代入式(6)推出:

路由协议采用如图3所示的思想,在网络层与逻辑链路层、MAC 增加跨层管理模块,将 MAC 可用带宽信息和节点可用剩余负载容量(即:队列长度),反馈给网络层路由代理,通过信息共享将物理层获得的节点剩余能量信息提供给网络层和数据链路层,所有这些为网络路由节点的选择提供判别准则。

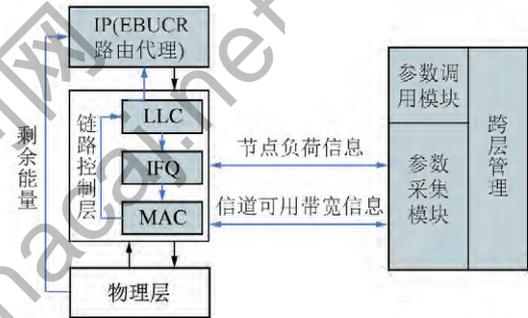


图3 跨层路由协议结构

Fig. 3 Construction of cross layer protocol

2.1 簇的形成策略

在网络初期, Sink 节点以最大的功率向网内各节点广播一个消息,确保每个节点都可以收到信息,根据定位算法计算出它与 Sink 的距离 d 。采用簇首“轮换”思想,簇首“轮换”的时间间隔可以根据簇内成员数目的具体情况而事先设定。所有节点选取一个阈值来判断自身是否充当簇首,将节点生成的随机数 $a(a \in [0, 1])$ 与阈值进行比较。若 a 小于阈值,则此节点声明自己当选簇首,反之则放弃这轮簇首的竞争。阈值 T_i 为

$$T_i(r) = P[\alpha(E_0 - E_i(r))/E_0 + (1 - \alpha)\rho_i(d)/\rho_{\max}] \quad (12)$$

i 与节点的 ID 号一一对应 $\alpha \in [0, 1]$, 其中, P 为节点成为簇首的初始概率,其与 LEACH 算法一样设为簇首竞选阈值, α 为 $[0, 1]$ 内常系数,经大量实验验证,最佳值设为 0.3,下文仿真实验将作出解释。 $E_i(r)$ 为当前节点的第 r 轮时的剩余能量, E_0 为初始能量, $\rho_i(d)$ 为节点按照理想状态下非均匀布点时的密度值, ρ_{\max} 为生成簇首的最大密度值。 ρ_{\max} 的计算可由距离 Sink 节点最近的簇首节点传输半径代入式(11)求得。权值 $E_i(r)/E_0$ 的引入可避免电能过低

的节点充当簇首,而增大 $\rho_i(d)/\rho_{\max}$ 权值,可以增大靠近 Sink 的节点成为簇首的可能性,使离 Sink 节点越近,簇的数目越多,从而使由簇首节点构成的上层骨干网节点形成较能遵循分布密度为 $\rho(d)$ 的不均匀分布。簇首当选后,向邻节点广播当选为簇首的消息,所有未被当选簇首的节点根据收到当选簇首广播信号的强弱,选择信号强的簇首加入其簇集。具体簇集建立过程如图4流程所示,分簇完成后网络进入稳定阶段,簇间通过基于信道竞争的 CSMA 协议进行数据传输。

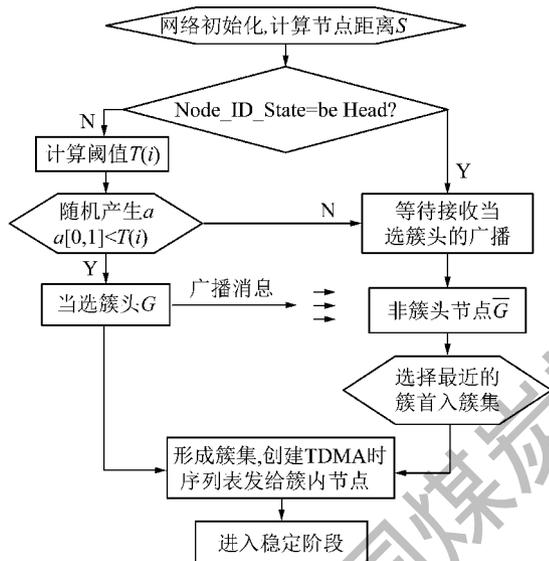


图4 簇首选举流程

Fig. 4 Flowchart about election of cluster heads

2.2 跨层参数选取与优化

路由机制中路由节点的选择对能耗均衡也起着重要作用,由于簇首节点数据传输的不对称性,容易出现网络部分区域拥塞和资源分配不均,若采用只考虑最短路径,会在某一条路径上出现拥塞和能耗“热点”问题。

定义1 簇间路由,下一跳候选路由节点集合 $CH_i \cdot R_{\text{candidate}}$:

$$CH_i \cdot R_{\text{candidate}} = \{CH_j | d(CH_j, BS) < d(CH_i, BS) \text{ AND } d(CH_i, CH_j) \leq bCH_i \cdot R_c\}$$

其中 b 使得 $CH_i \cdot R_{\text{candidate}}$ 为非空的最小整数,若不存在 b ,则 $CH_i \cdot R_{\text{candidate}} = \emptyset$, CH_i 以单跳方式直接与汇聚(sink 或者 BS)节点通信。

簇首节点 CH_i 在候选路由节点集合 $CH_i \cdot R_{\text{candidate}}$ 中应该考虑节点的 MAC 层的节点状态信息。EBUCR 通过跨层设计综合采用了节点 2 个参量:链路可用带宽 (CH_j_BW), 节点队列“有效负载容量” ($CH_j_Available_load$)。 CH_j_BW 和 $CH_j_Available$

$_load$ 越大说明节点承担传输任务的能力越强。在网络传输中节点状态随业务量和时间变化,每个簇首节点承担通信任务也不相同,通过对这两个参量的引入,在路由决策中路由节点可通过协议底层的信息反映出节点在网络传输中的实际状况。通过决策机制来动态调整数据流的流向,达到流量均衡的目的。

通过 MAC 层的虚拟载波监听,感知节点传输信道的忙闲状态,来计算可用带宽。采用文献[11]改进后的可用带宽评估算法,区分节点自身收发和周围节点发送引起的信道繁忙情况,将这两种情况视为不可用,考虑节点必须等待和退避时间造成的信道浪费,提高可用带宽的准确计算。

$$CH_j_BW = \left(1 - \frac{DIFS + B}{T_{\text{total}}}\right) \left(\frac{T_{\text{total}} - T_{\text{busy}} - T_{\text{sense}}}{T_{\text{total}}}\right)$$

式中, B 为退避过程消耗的时间; T_{total} 为信道总的采样周期; T_{busy} 为“忙”状态时间; T_{sense} 为“感知”状态时间; $DIFS$ 为 DCF 帧间隔时间。

为了对节点在网络中承担的通信负载准确地评估,利用节点 CH_i 在时刻 t 的历史时刻 $t-1$ 信息和当前采集的节点状态信息联合进行预测评估,节点队列“有效负载容量”用节点当前可用队列长度和前一时刻可用的剩余队列长度值两者加权平均计算而得。为了避免所得期望值突发抖动带来较大误差的影响,采用加权移动平均算法进行平滑。 $CH_j_Available_load = Total_Q_j - Cur_Q_j$, $Total_Q_j$ 为节点队列的总长度, Cur_Q_j 为节点当前队列长度。

定义2 有效负载容量为节点队列 $CH_j_Available_load(t)$:

$$CH_j_Available_load(t) = \beta CH_j_Available_load(t-1) + (1 - \beta) CH_j_Available_load_{\text{sample}}$$

$CH_j_Available_load_{\text{sample}}$ 为当前时刻节点接口队列的剩余长度; $CH_j_Available_load(t-1)$ 为上一时刻接口队列长度有效使用值。为了更好地反映节点当前状态,给 $CH_j_Available_load_{\text{sample}}$ 更大的优先权, β 为调节期望负载容量的权重,参照文献[12]取 $\beta = 0.3$ 。

定义3 拥塞控制度: $Congest_value_j = (\chi CH_j_BW + (1 - \chi) CH_j_Available_load)$ 且 $\chi \in [0, 1]$, χ 为一经验值,是平衡可用带宽和有效负载容量的权重系数。可通过自适用调节来改变 $Congest_value_j$ 值的大小。如果节点负载容量变小就减小 χ 取值,增大负载容量对拥塞控制度的权重,反之增大 χ 取值来增大可用带宽的权重,进而影响拥塞控制度。

2.3 跨层路由发现和维护

上述定义中的链路可用带宽、节点负载容量和节点剩余能量信息均可以通过跨层调用机制被网络层获取,在网络层的控制报文包中增加3个扩展域,如图5所示, $E_i(r)$, CH_i_BW 和 $CH_i_Available_load$ 为扩展域中的3个跨层调用信息。在路由发现阶段,节点通过控制报文包(如:RREQ, RREP 和 RERR),调用 RREQ 扩展域中的跨层信息,通过计算按照一定的规则,实现路由的选择。

源节点 ID	目的节点 ID	路由节点 ID	$E_i(r)$	CH_i_BW	$CH_i_Available_load$
--------	---------	---------	----------	------------	-------------------------

图5 RREQ 包结构

Fig. 5 RREQ packet structure

传感器节点功率可调,在整个路由阶段动态地维护节点发射功率。路由发现过程:

Step 1 源节点簇首 CH_i 以最大的发射功率级 P_{max} 广播1条消息控制报文包 RREQ $CH_MSG(ID, E_i(r), CH_i_BW, CH_i_Available_load)$ 。

Step 2 邻簇首 CH_j 根据 RSSI 读数获取接收功率 P_{rec} , 根据文献[13]计算最小的发射功率级别 P_{mintra} , 然后查看自身 ID 与否与目的节点 ID 一致,若一致,则向源节点发送 RREP 消息,否则,将自身 ID 加到路由记录,直至到达目的节点。

$$P_{mintra} = \frac{P_{max} R_{threshold}}{P_{rec}}$$

式中, $R_{threshold}$ 为接受一个数据包所需要的最小 RSSI 值。

Step 3 目的节点会从不同的路由节点上收到多个 RREQ 包。目的节点按照式(13)选择一条最优的路径。

$$Congest_valve_{path} = \max_R \left[\sum_{j \in R} Congest_valve_j \right] \quad (13)$$

然后,目的节点创建一个 RREP 包,沿着所选路径通过单播方式回复源节点。在 RREP 传回源节点同时,最优路径上所有中间路由节点侦听 RREP 消息并更新它们的路由表信息,如果目的节点收到相同的 $Congest_valve_j$ 值,则选择能量最多和跳数最少的一条路径。

3 EBU CR 协议消息复杂度分析

EBUCR 协议消息复杂度为 $O(N)$ 。

证明:簇首生成率为 p_0 ,所以共有 Np_0 个簇首向周围节点广播 Np_0 条消息,而有 $N(1-p_0)$ 个非簇首节点广播申请加入簇集消息,同时在路由选择阶段,簇

首广播 Np_0 个 $CH_MSG(ID, E_i(r))$ 消息,每个簇首回复 Np_0 个 $CH_NXTHOP_MSG(ID, E_j(r), Congest_value_j, P_{mintra})$ 消息,所以网络中总的消息开销为 $Np_0 + N(1-p_0) + Np_0 + Np_0 = (1+2p_0)N$ 。

所以 EBU CR 算法消息复杂度为 $O(N)$ 。证毕。

4 仿真结果分析

为了验证 EBU CR 协议更适应于巷道的窄长空间结构网络部署,本文节点分布3种区域, A1 为模拟巷道的带状区域长宽为 200×8 , 基站坐标 $[220, 4]$; A2 为矩形区域尺寸为 200×200 , 基站坐标 $[100, 220]$; A3 正方形区域尺寸为 200×200 , 基站坐标 $[100, 100]$ 。通过在 NS2 仿真平台进行实验验证,并与 LEACH^[14], HEED^[15], EEUC 三种算法进行仿真比较。网络节点初始能量为 0.6 J, 其中 E_{elec} 为 50 nJ/bit, $\epsilon_{fs} = 50$ pJ/(bit · m²), $\epsilon_{mp} = 0.0013$ pJ/(bit · m⁴), $E_{DA} = 5$ nJ/(bit · signal), 数据包长 4 000 bits, 控制数据包长 100 bits, 数据发送速率 12 packet/s, 节点数量为 100, 200, 400。

4.1 簇首节点分布情况

表1列出了4种算法中在距离 Sink 节点不同区域内的簇首节点分布统计结果。结果显示在 LEACH 算法中,簇首分布不均且不规律,具有随机性。HEED 簇首分布改变了 LEACH 协议中的随机性,在簇首选举时,考虑节点剩余能量和通信代价,但生成簇首数目不如 EBU CR 和 EEUC 协议理想。EBUCR 中簇首分布与 Sink 节点的距离成一定的关系,即距 Sink 节点越远,簇首数越少,这一表现与 EBU CR 设想基本一致。

表1 簇首节点在不同区域内分布

Table 1 Statistical results of cluster heads

算法	0 ~ 50 m	50 ~ 100 m	100 ~ 150 m	150 ~ 200 m
LEACH	3	3	1	2
HEED	2	1	2	1
EEUC	1	2	3	3
EBUCR	1	2	2	4

4.2 参数 α 的选取

α 参数为非均匀成簇的重要参数,它们也决定了成簇的规模,通过对它们在 $[0, 1]$ 之间以 0.1 个单位为间隔取值,以网络首个节点死亡时间为判断标准,发现 α 参数设定为 0.3 时较为理想。图6中, α 参数在 0.5 以前比它在 0.5 之后首个节点死亡的时间要早,这是由于 EBU CR 采用多跳通信协议, α 参数在

0.5之前有效的缓解了簇首间能耗不均衡问题。此外,在相同区域内,从节点部署的总量来看,当网内部署400个节点时(即: $N=400$),网络中出现首个节点能量耗完的时间要远长于 $N=100$ 和 $N=200$,这表明本文所设计的协议更适应于密集部署的传感器网络。

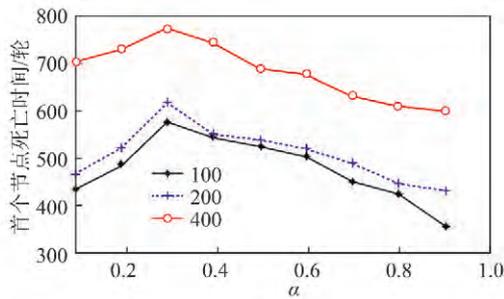


图6 首个节点“死亡”与参数 α 的取值关系
Fig. 6 Impact of α on first node die

4.3 簇首节点平均能耗

图7分析了簇首能耗对比,不难看出采用多跳通信的EBUCR,EEUC和HEED三种协议的簇首消耗的能量比较低,其中采用EBUCR和EEUC协议的簇首节点平均能耗更低,这是因为在EBUCR和EEUC这2种协议中,不仅采用多跳通信,还在拓扑控制方面采用非均匀分簇策略,有效地克服了簇首能耗不均。LEACH协议中由于簇首直接与Sink节点通信,而且每轮选举出的簇头数量及分布较不稳定,因此簇首消耗的能量之和有较明显的波动,导致能量消耗增大。

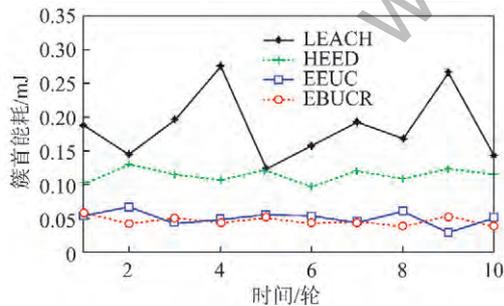


图7 簇首节点的平均能耗
Fig. 7 Energy consumption of cluster heads

4.4 数据传送情况对比

图8(a)给出4种协议下,基站接收数据量随着轮数变化时的比较。LEACH簇首节点采用单跳传输直接与Sink基站通信,由于其收节点通信距离的限制,基站的数据接受情况最少。HEED算法中虽采用了多跳传输方式,但在路径选择时没有考虑节点MAC状态,且受簇首节点数量的影响数据传输率常有波动。EEUC虽也采用了非均匀分簇策略和多

跳通信,其路由节点只考虑了节点剩余能量,没有考虑到数据传输时节点负荷情况。EBUCR由于采用了跨层设计思想考虑到了下一跳路由节点的可用带宽信息和节点可用剩余负载容量,使得网络中簇首节点向基站传输数据时更加顺畅,网络拥塞情况大大减少。所以网路中,基站接收数据近似线性速率增长。不难看出采用EBUCR协议时在相等时间内信息传送量多于其他3种算法,系统稳定性也比较好。

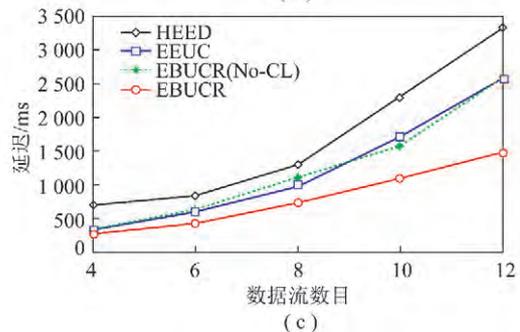
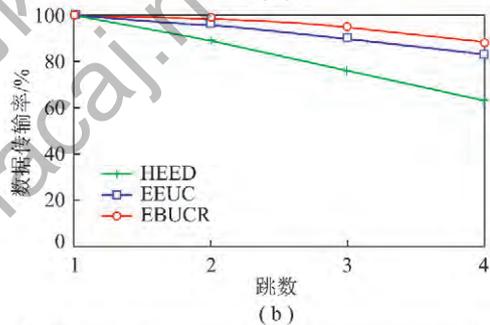
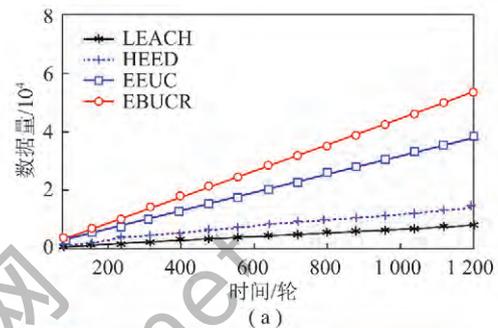


图8 数据传输情况的对比

Fig. 8 Comparison of data transmission

由图8(b)可知,在一跳传输范围内3种协议的包转发率差别不大。然而随着跳数的增加,HEED的包转发率明显下降,这是因为HEED在多跳传输中没有考虑跳数增加后路由节点需要转发的数据量增加许多,势必会出现数据传输增长,进而发生拥挤情况。在EEUC和EBUCR中,由于采用非均匀分簇策略,在跳数增加后有更多的路由节点可供选择,不会发生数据量传输增加后包转发率急剧下降。此外,EBUCR采用跨层技术,在簇间路由节点选择时考虑到链路的拥塞情况,其在跳数增加时包转发率也要好于EEUC。

为了分析链路可用带宽和节点负载容量在跨层路由中发挥的作用,在增加业务传输量的情况下分析端到端数据延迟情况,图 8(c)可以看出在数据平均时延方面 EBUCR 协议明显优于其他 3 种协议,仿真中 EBUCR(No-CL)为采用本文非均匀成簇策略,但未将链路可用带宽和节点负载容量作为参考因素,只考虑了节点剩余能量和最短路径的协议。随着需要发送数据的源节点数目的增加,EBUCR 跨层路由选择策略有效地避开有可能造成网络拥塞的路由节点,主要原因是其充分考虑链路可用带宽和节点负载容量作为参考因素,图 8(b)中在传输跳数较多时,数据传输率上也能充分体现这一优点。随着跳数的增加,路由节点所处的区域更加靠近基站,其所面临需要承载传输数据量也在增多,EBUCR 协议充分考虑网络拓扑结构和网络路由节点 MAC 状态信息,在网络层和链路连接方面实现负载均衡。

4.5 网络生命期

图 9(a)给出了 400 各节点分布于 A1 区域中的网络生存时间对比,由图中不难看出 EBUCR 网络生命期比 LEACH 和 HEED 更长,尤其是在系统稳定性方面(即网络中首个节点死亡时间)明显优于 LEACH 和 HEED。这是由于 EBUCR 采用能量均衡策略使簇首间的大能量消耗得到均衡,从延缓了网络首个节点死亡的发生。EEUC 协议在网络的稳定性稍次于 EBUCR 协议,但在网络的整体存活期 EBUCR 协议要明显优于 LEACH 算法。以网络稳定性来看,EBUCR

算法网络稳定性比 EEUC, HEED 和 LEACH 分别提高了 13%, 120%, 160%。以网络剩余 30% 节点时视为网络失效,由图中可以看出 EBUCR 也要优于其他 3 种协议,尤其,EBUCR 生命期比 LEACH 延长了 45% 以上,比 HEED 延长了近 19%。图 9(b)表明 EBUCR 协议更适应于巷道的窄长空间结构模型。分析出现此种结果的原因是:LEACH 协议中簇首遵循一定概率的随机选取,而且未将节点的剩余能量作为簇首选举的参考指标,而 HEED 协议虽然考虑了节点的能量消耗因素,却忽略了簇首节点在网络区域内的有效分布情况,而 EEUC 在路由节点选择上仅考虑剩余能量作参数没有考虑 MAC 层对数据传输的影响,EBUCR 协议以节点部署区域为窄长带状区域为背景,考虑簇首节点有效分布密度和数据不对称传输,同时在路由节点选择时考虑链路层因素,在节点大规模部署的巷道内有效保障数据传输均衡和到达率。

5 结 语

针对井下巷道窄长的空间结构特征,利用分簇技术在多跳传输模式下,通过分析数据多对一的不对称性问题,提出一种簇首有效分布密度的方法,来解决这种网络能耗不均现象,并在簇间路由选择时采用跨层设计路由协议。实验结果表明,EBUCR 算法较为稳定性较好,有效均衡簇首能耗,同时保证了在下一跳较多路由节点时,选择最优路由节点实现网络吞吐量和生命期的最大化,更适应密集部署于窄长区域的节点传输协议。能耗均衡是无线传感器网络的研究热点问题,这需要多方面共同解决,既需要节点的硬件研发上,还需在网络节点部署及传输协议等多因素考虑。今后可以在井下异构网络部署和多基站分布传输控制方面进一步研究。

参考文献:

- [1] 王珂. 矿井无线传感器网络节点部署关键技术的研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2011:9-10.
Wang Ke. Research on key technologies of mine wireless sensor networks node deployment [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2011: 9-10
- [2] 胡青松,吴立新,张申,等. 煤矿工作面定位 WSN 的部署与能耗分析[J]. 中国矿业大学学报,2014,43(2):351-355.
Hu Qingsong, Wu Lixin, Zhang Shen, et al. Placement of positioning WSN in coal face and energy consumption analysis [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2014, 43(2): 351-355
- [3] 杨维,王彬. 矿井巷道多层次型无线监测无线传感器网络的实现[J]. 煤炭学报,2008,33(1):94-98.
Yang Wei, Wang Bin. Realization of hiberarchy wireless sensor net-

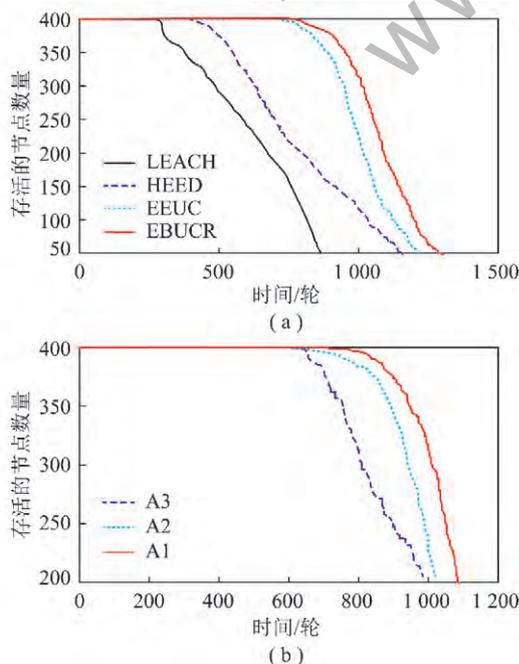


图9 网络生命期对比

Fig. 9 Lifetime comparison

- work for mine laneway monitoring[J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(1): 94-98.
- [4] 周公博, 朱真才, 陈光柱, 等. 矿井巷道无线传感器网络分层拓扑控制策略[J]. 煤炭学报, 2010, 35(2): 333-337.
Zhou Gongbo, Zhu Zhencai, Chen Guangzhu, et al. Hierarchy topology control of wireless sensor networks in coal mine laneway[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(2): 333-337.
- [5] Soro S, Heinzelman W. Prolonging the lifetime of wireless sensor networks via unequal clustering[A]. Proceedings of the 5th International Workshop on Algorithms for Wireless Mobile Ad Hoc and Sensor Networks[C]. Denver Co, 2005: 417-456.
- [6] Ye Mao, Li Chengfa, Chen Guihai, et al. An energy efficient clustering scheme in wireless sensor networks[J]. Journal of Frontiers of Computer Science & Technology, 2007, 3(2-3): 535-540.
- [7] 李成法, 陈贵海, 叶懋, 等. 一种基于非均匀分簇的无线传感器网络路由协议[J]. 计算机学报, 2007, 30(1): 27-36.
Li Chengfa, Chen Guihai, Ye Mao, et al. An uneven cluster-based routing protocol for wireless sensor networks[J]. Chinese Journal of Computers, 2007, 30(1): 27-36.
- [8] Wu Xiaobin, Chen Guihai. The energy hole problem of nonuniform-node distribution in wireless sensor networks[J]. Chinese Journal of Computers, 2008, 31(2): 253-261.
- [9] Goldsmith A, Wicker S. Design challenges for energy-constrained ad hoc wireless networks[J]. IEEE Wireless Communications (S1536-1284), 2002, 9(4): 8-27.
- [10] Iannone R, Khalili K, Salamatian, et al. Cross-Layer routing in wireless mesh networks[A]. International Symposium in Wireless Communication Systems (ISWCS'04)[C]. Mauritius: Institute of Electrical and Electronics Engineers Computer Society, Piscataway, United States, 2004: 319-323.
- [11] Zhao Haitao, Emiliano Garcia-Palacios, Wei Jibo, et al. Accurate available bandwidth estimation in IEEE 802.11-based ad hoc networks[J]. Elsevier Computer Communications, 2009, 32(6): 1050-1057.
- [12] 宋文, 方旭明. 无线 Mesh 网络公平感知路由算法设计与仿真[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(18): 4320-4325.
Song Wen, Fang Xuming. Design and simulation of fairness-aware routing algorithm in wireless mesh networks[J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(18): 4320-4325.
- [13] Rhee K, Kwak J, Kims, et al. Challenge-response based RFID authentication protocol for distributed database environment[A]. Proc. of the 2nd Int. Conf. on Security in Pervasive Computing[C]. Berlin: Springer, 2005: 70-84.
- [14] Heinzelman W, Chandrakasan A, Balakrishnan H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2002, 1(4): 660-670.
- [15] Younis O, Fahmy S. HEED: A hybrid, energy efficient, distributed clustering approach for ad hoc sensor networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2004, 3(4): 660-669.