

一种基于能量补给的无线传感器网络分簇单跳路由协议

冯 钧¹ 孔建寿² 王 刚¹

1 南京理工大学泰州科技学院 江苏 泰州 225300

2 南京理工大学自动化学院 南京 210094

摘要 针对无线传感网网络(Wireless Sensor Networks, WSN)能量受限的特点,为有效弥补传统的路由协议的能量补给不足的缺陷,提出一种面向 WSN 的具有持续能量供应的分簇单跳路由协议(Clustering Single-hop Routing Protocol based on Supply Energy, CSRPE),该算法按轮循环进行,每轮循环包含簇头数量确定、簇头选择机制、非簇头归属以及数据传输几个阶段,具有存活节点数量高、网络消耗能量低等特点。仿真结果表明:与传统的 WSNs 路由协议相比,所提方法具有存活节点数量多、网络能量消耗少等优点,从而验证了所提方法的正确性和有效性。

关键词:路由协议;簇头节点;传感网;能量供应

中图分类号 TP393

Clustering Single-hop Routing Protocol Based on Energy Supply for Wireless Sensor Network

FENG Jun¹, KONG Jian-shou² and WANG Gang¹

1 Taizhou Institute of Nanjing University of Science and Technology, Taizhou, Jiangsu 225300, China

2 Automation Department of Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China

Abstract Aiming at the energy limitation of Wireless Sensor Networks, a cluster single-hop routing protocol based on supply energy with continuous energy supply for Wireless Sensor Networks is proposed to effectively solve the defect of insufficient energy supply of traditional routing protocols. The algorithm is carried out by cycles. Each cycle includes several stages such as cluster head number determination, cluster head selection mechanism, non-cluster head attribution and data transmission. It has the characteristics of high number of surviving nodes and low energy consumption of network. The simulation results show that, compared with the traditional Wireless Sensor Networks routing protocol, the proposed method has the advantages of large number of surviving nodes and less energy consumption of network, thus verifies the correctness and effectiveness of the proposed method.

Keywords Routing protocol, Cluster head node, Sensor network, Supply energy

1 引言

近年来,微电子、计算机、无线通信等技术的进步,推动了低功耗多功能传感器的快速发展,并且孕育了微机电系统(Micro-Electro-Mechanism System, MEMS)技术支持下的无线传感器网络(Wireless Sensor Networks, WSN)。目前,WSN的路由协议正是国内外研究的热点,由于WSN的应用场合、特点众多,找到一种通用的路由协议非常困难,因此各种路由协议在不同的应用环境和性能评价指标下各有千秋。当前国内外科研人员已设计多种面向WSN的路由协议,涌现出了一些有代表性的路由协议算法。

泛洪(Flooding)协议是一种传统的路由协议,不要求维护网络的拓扑结构以及进行路由计算,接收到消息的节点以广播形式转发分组,但是该协议具有消息的内爆(implosion)和重叠(overlap)等固有缺陷。Hedetniemi等^[1]提出了Gossiping协议对Flooding协议加以改进,有效避免了消息的“内爆”现象,但有可能增加端到端的传输延时和代价。

SPIN协议^[2]是以数据为中心的自适应路由协议,通过协商机制来解决泛洪协议中的“内爆”和“重叠”问题。传感器节点仅广播采集数据的描述信息,当有相应的请求时,才有目的地发送数据信息。

定向扩散(directed diffusion)协议是Estrin等^[3]专门为无线传感器网络设计的路由策略,节点用一组属性值来命名它所生产的数据, Sink节点发出的查询业务也用属性的组合来表示,逐级扩散,最终遍历全网,找到所有匹配的原始数据。该协议的优点是:采用多路径方式,健壮性好;使用数据聚合减少了数据通信量。缺点是:不适合环境监测等应用;建立梯度开销很大,不适合多Sink点网络;数据聚合采用时间同步技术,带来了较大开销和时延。

MIT的Chandrakasan等^[4]提出了一种低功耗自适应聚类路由算法(Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy, LEACH),该算法与一般的平面多跳路由协议相比,网络生命周期延长了15%。该算法的优点是避免过分消耗能量,延长了网络生存时间。其缺点是协议要求节点具有较大功率通信

基金项目:江苏省自然科学基金面上项目(BK2016803);教育部博士点基金项目(20153219110028)

This work was supported by the General program of Jiangsu Natural Science Foundation(BK2016803) and Doctory Program of the Ministry of Education(20153219110028).

通信作者:冯钧(fjyixing@126.com)

能力,扩展性差,不适合大规模网络。

PEGASIS^[5]由 LEACH 协议发展而来,它通过检测应答来确定离自己最近的相邻节点。由于每个节点都以最小功率发送数据分组,并有条件完成必要的融合,减小了业务流量。因此,整个网络的功耗较小,生命周期是 LEACH 协议的近两倍,但不足之处在于节点维护位置信息(相当于传统网络中的拓扑信息)需要额外的资源。

除了以上代表性的路由协议之外,目前还涌现出了以数据为中心的 Rumor 协议;分层次的 TEEN 协议、TTDD 协议;基于位置的 GAF 路由协议、GEAR 路由协议;提供数据流和服务质量保障的 SAR 路由协议、SPEED 协议等^[6-11]。

以上大多数路由协议通常只考虑能量约束,尽管节能是无线传感器网络的一个关键问题,但传感器网络的路由协议不仅需要考虑节能等问题,同时需要具有可扩展性、服务质量(Quality of Service, QoS)保证功能。另外,能量补给也是路由协议需要考虑的一个重要方面,因为节点的能源是有限的,无线传感器网络为了最大限度地延长网络的生命周期,必然会以牺牲网络的部分服务质量为代价。因此,需要针对这一情况进一步研究可扩展性好、提供 QoS 的保证和充足能量补给的分簇路由协议。

本文在分析无线传感器网络各类已有路由协议的基础上,综合考虑了节点密度集和能量均衡等因素,提出了一种具有能量持续补给的基于减法聚类的分簇单跳路由协议(Clustering Single-hop Routing Protocol based on Supply Energy, CSRPSSE),它的基本思想是通过随机选择簇头,将整个网络的能量负载平均分配到每个传感器节点,从而达到降低网络能量消耗、延长网络生命周期的目的。在分簇的形成阶段,该算法在考虑能量补给的因素下制定新的簇头选择机制和非簇头归属机制;在数据传送阶段与 LEACH 相近。与之前的分簇路由算法相比,CSRPSSE 充分考虑了传感器节点通过环境获取能量补给时能量的随机变化,节点能量的补给水平和能量水平改善了非簇头归属机制,使得无线传感器网络中的能量消耗的更加均衡,从而延长了网络的生命周期。

2 分簇单跳路由协议 CSRPSSE

本文提出的 CSRPSSE 算法,按轮循环进行,每一轮分为初始化阶段和稳定工作两个阶段。其中,初始化阶段又可分为确定簇头数量、选择产生簇头节点、非簇头归属机制、簇形成等阶段;而稳定工作阶段是节点传送数据的阶段。

2.1 簇头数量的确定

CSRPSSE 协议通过对数据处理和通信能量的分析来确定。假定在 $M \times M$ 大小的区域内分布了 N 个传感器节点,CSRPSSE 则从中选取 k 个节点作为簇头,从而计算最优的簇头数。簇头主要的能量消耗源自接收簇内节点的数据、信号的数据融合以及将数据传送到 Sink 节点处。

由于簇头离 Sink 节点的距离都相对较远,因此计算能量损耗时采用多路径衰减模型,则一轮中每个簇头节点消耗的能量为:

$$E_{CH} = E_{elec} l \frac{N}{k} + E_{BF} l \frac{N}{k} + l \epsilon_{two-ray} d_{toBS}^4 \quad (1)$$

其中, E_{CH} 为消耗总能量, E_{elec} 为能量消耗基数, E_{BF} 为簇头节点进行数据融合时所消耗的能量, $\epsilon_{two-ray}$ 为消耗系数, d_{toBS} 为

衰减因子,簇内节点的能量主要消耗在将数据发送至簇头节点上,由于距簇头相对较近,则采用自由空间衰减模型^[12],即:

$$E_{non-CH} = l E_{elec} + l \epsilon_{friss} d_{toCH}^2 \quad (2)$$

假设网络中每个簇的覆盖面积为 $\frac{M^2}{k}$,且非簇头节点均匀分布在簇头所覆盖的范围内^[13],则:

$$E_{non-CH} = l E_{elec} + l \epsilon_{friss} E [d_{toCH}^2] = l E_{elec} + l \epsilon_{friss} \frac{1}{2\pi} \frac{M^2}{k} \quad (3)$$

由于节点从环境补给的能量水平是时变的,因此假设节点 i 的能量在 t 时刻的补给水平为 $\alpha_i(t)$,则一轮中(每轮包括 T 个离散时隙)整个网络所采集的能量为:

$$E_{harvest} = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T \alpha_i(t) \quad (4)$$

因此,经过一轮数据传输之后网络中节点总能耗的变化量为:

$$\begin{aligned} E_{total} &= E_{depletion} - E_{harvest} \\ &= k E_{CH} + (N-k) E_{non-CH} - E_{harvest} \\ &= k (l E_{elec} \frac{N}{k} + l E_{BF} \frac{N}{k} + l \epsilon_{two-ray} d_{toBS}^4) + (N-k) (l E_{elec} \\ &\quad + l \epsilon_{friss} \frac{1}{2\pi} \frac{M^2}{k}) - \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T \alpha_i(t) \\ &= l (2 E_{elec} N + E_{BF} N + k \epsilon_{two-ray} d_{toBS}^4 + \frac{N \epsilon_{friss} M^2}{2\pi k} - \\ &\quad k E_{elec} - \frac{\epsilon_{friss} M^2}{2\pi}) - \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T \alpha_i(t) \end{aligned} \quad (5)$$

为确定最佳的簇头数量,将式(5)对 k 求偏导并令其值为 0 ($\frac{dE_{total}}{dk} = 0$)。通过对式(5)求偏导可得:

$$\epsilon_{two-ray} d_{toBS}^4 - E_{elec} = \frac{N \epsilon_{friss} M^2}{2\pi k^2} \quad (6)$$

最终计算可得:

$$k = \sqrt{\frac{N \epsilon_{friss} M^2}{2\pi (\epsilon_{two-ray} d_{toBS}^4 - E_{elec})}} \quad (7)$$

假设簇头节点均匀分布在网络所部署的区域内,则网络中最优的簇头节点数目为:

$$k = \sqrt{\frac{N \epsilon_{friss} M^2}{2\pi (\epsilon_{two-ray} E [d_{toBS}]^4 - E_{elec})}} \quad (8)$$

2.2 簇头选择算法

在进行簇头选择时,为了避免能量较低的节点成为簇头,CSRPSSE 根据能量的补给情况以及节点自身的能量水平,采用减法聚类的方法,在节点密集处选择能量较高的节点为簇头节点。CSRPSSE 算法对阈值进行修正,使得周围密集度高且自身能量水平较高的节点被选为簇头的阈值增大,相应的获选几率就更大;反之,节点周围密集度低且能量水平较低的节点被选为簇头的阈值更小,其获选几率就更小。在选出第一个簇头节点后,从剩余的可能作为簇头节点的节点中继续开始下一轮的选择。

在第 r 轮节点 i 的阈值为:

$$Thresh(i) = \begin{cases} \frac{P}{1 - P \times \{[r \bmod (1/P)]\}} & , i \in G \\ \frac{E_{residual}(i) + E_{harvest}(i, r-1)}{E_{start}} & \\ 0, & i \notin G \end{cases} \quad (9)$$

其中, P 为簇头占有所有节点的百分比,表示网络中所选簇头的比例; $E_{residual}(i)$ 为节点 i 在当前轮剩余的能量; E_{start} 表示节点

的初始能量; $E_{harvest}(i, r-1)$ 表示节点在上一轮所能获取的能量。由于每个节点所处的能量采集环境并非恒定不变, 因此其节点 i 在 t 个单位时间内的能量采集率为 $\alpha_i(t)$, 节点在第 $r-1$ 轮中所能获取的能量水平为:

$$E_{harvest}(i, r-1) = \sum_{t=T(r-1)}^{T(r)} \alpha_i(t) \quad (10)$$

该过程一直持续到所有剩余的数据点作为簇头节点的可能性低于某个阈值时为止。用减法聚类选取簇头节点算法的具体步骤如下^[14]:

Step1 设网络节点 x_1, x_2, \dots, x_n 分别为输入样本的 n 个坐标, 对输入节点进行归一化处理, 如式(11)所示, 每个节点都是簇头节点的候选者。

$$x_i = \frac{x_i - \min(x_i)}{\max(x_i) - \min(x_i)} \quad (11)$$

Step2 计算每个节点的密度指标。

$i=1$

while($i \leq n$)

{对应任意给定 $r_a > 0$, 计算第 i 个节点密度指标为

$$D_i = \sum_{j=1}^n \exp\left[-\frac{\|x_i - x_j\|}{(r_a/2)^2}\right] \quad (12)$$

$i=i+1$

}

依次输出 $D_i (i=1, 2, \dots, n)$ 。

Step3 在 Step2 的结果基础上, 选取 $D_i = \max\{D_i | i=1, 2, \dots, n\}$ 为第一个簇头节点。

Step4 选取参数 r_b 通常大于 r_a , 以避免出现相近的簇头节点, 且取 $r_b = 1.5r_a$ 。

Step5 令 x_{c1} 为选中的节点, D_{c1} 为其密度指标, 那么其他每个节点的密度指标可以用式(13)来调整。

$$D_i = D_i - D_{c1} \exp\left[-\frac{\|x_i - x_{c1}\|^2}{(r_b/2)^2}\right] \quad (13)$$

Step6 确定首个簇头节点后, 修改 $n-1$ 个节点的密度指标, 再确定密度指标最高的节点为第二个簇头节点 x_{c2} 。

Step7 对于任意的 $0 < \delta < 1$, 判断 $\frac{D_{c2}}{D_{c1}} < \delta$ 是否成立, 如果不成立, 则转到 Step5; 如果成立则退出, 这就完成一轮簇头选择。下一轮选择簇头时, 只需要改变 r_a 的值。

2.3 非簇头归属机制

在确定簇头数量和完成簇头选择以后, 所有的非簇头需要自己的归属, 依据是其收到的信息。CSRPE 协议基于 Heinzelman 提出的一阶无线通信模型 (First Order Radio Model, FORM), 假设无线通信信道是对称的, 即从节点 A 传输数据至节点 B 所消耗的能量与从节点 B 传送至节点 A 所消耗的能量是相同的。假设发送或接收电路消耗为 E_{elec} , 传输功放为 ϵ_{amp} , 信号传输则根据传输距离采用自由空间模型 ($\epsilon_{amp} = \epsilon_{friss}$) 或多径衰减模型 ($\epsilon_{amp} = \epsilon_{two-ray}$)。据此模型, 传输长度为 l bit 数据且距离为 d 时消耗的能量为:

$$E_{Tx}(l, d) = E_{Tx-elec}(l) + E_{Tx-amp}(l, d) \\ E_{Tx}(l, d) = \begin{cases} E_{elec}l + \epsilon_{friss}ld^2, & d < d_{thres} \\ E_{elec}l + \epsilon_{two-ray}ld^4, & d > d_{thres} \end{cases} \quad (14)$$

接收 l bit 数据消耗的能量为:

$$E_{Rx} = E_{elec} \times l \quad (15)$$

因此, 当非簇头节点收到多个广播信息之后, 首先根据广

播信息计算相应的代价函数^[15]。

$$\text{cost}(i, j) = D_1^2 + \frac{\epsilon_{amp}}{\epsilon_{friss}} \times \frac{1}{A} D_2^4 \quad (16)$$

其中, D_1 表示本节点 j 与发布广播信息的簇头 i 之间的距离, D_2 表示发布广播信息的簇头 i 与基站 Sink 节点之间的距离; A 表示簇头进行数据融合或压缩的比率。非簇头节点在计算当前加入不同簇的代价函数后, 选择加入代价最小的簇。

由式(16)可以看出, 在 CSRPE 协议中, 节点选择簇头时, 不仅考虑了节省自身能量消耗, 还充分考虑了整个网络的能量均衡性。代价函数与数据在整个网络中传输时所消耗的能量成正比, 使得在选择节点 j 时, 考虑平衡节点与簇头之间距离和簇头与基站 Sink 节点之间的距离两个因素, 从而确保远离基站 Sink 节点的簇头所包含的节点数目不会过多, 将非簇头节点数据在整个网络传输过程中所消耗的能量降至最低。

图 1 给出了 CSRPE 协议的簇形成阶段的过程。

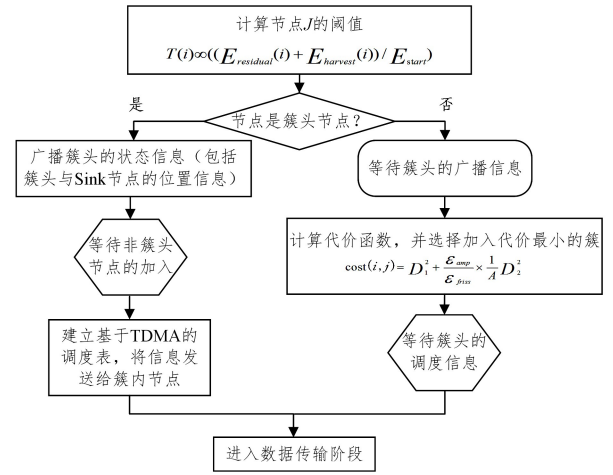


图 1 CSRPE 簇形成阶段图

Fig. 1 Schematic of CSRPE cluster formation stage

2.4 性能评价分析

(1) 容错能力评价

容错能力描述的是网络对故障节点的滤除数量和纠错能力。通过制定数量标准和影响标准来评价算法的容错能力, 具体定义为:

$$N(F_i) = \frac{\alpha}{\beta} \quad (17)$$

$$I(R_i) = \frac{|C(R_i) - T(R_i)|}{|O(R_i) - T(R_i)|} \quad (18)$$

$N(F_i)$ 越大, $I(R_i)$ 越小, 容错能力就越好。其中, $C(R_i)$, $O(R_i)$ 和 $T(R_i)$ 分别表示计算后的数据、原始监测数据、理论数据。

(2) 算法复杂度评价

假设分簇单跳路由算法的轮数为 m , 每轮循环的复杂度为 $O(n^2)$, 则算法的复杂度为 $O(mn^2)$, 本文使用 50 个节点对算法进行模拟实验, 结果 m 不超过 20, 表明算法的复杂度较为理想。

3 仿真分析

本文在 Linux 的 OMnet++ 平台下进行仿真实验。将 50 个节点随机抛撒分布于 $100 \times 100 \text{ m}^2$ 正方形区域内, 参数设置如表 1 所列。

表 1 网络仿真参数
Table 1 Network simulation parameters

网络	网络大小/m ² :100 * 100
	Sink 节点坐标
	初始能量/J:70 000
应用	簇头数目:5
	数据包大小/kB:500
	广播包大小/kB:25
	包头大小/kB:25
	每一轮时间/s:20
无线模型	仿真的轮数:30
	$E_{elec} = 50 \text{ nJ/bit}$
	$\epsilon_{friss-amp} = 10 \text{ pJ/bit/m}^2$
	$\epsilon_{two-ray-amp} = 0.0013 \text{ pJ/bit/m}^4$
	$E_{BF} = 5 \text{ nJ/bit}$
	距离阈值/m:87
	带宽/Mbit/s:1

图 2 给出了第一轮用减法聚类方法选出的簇头和相应的簇。图 2 中,⊕表示簇头节点,+表示一般节点,周围的节点如果相同则属于同一个簇。从图 2 中可以看出,簇头分布比较均匀,簇的形成规模也比较合理。

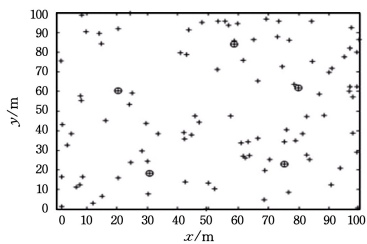


图 2 节点随机分布簇图

Fig. 2 Graph of node random distribution clustering

在 WSN 中,节点存活数 (Number of Node Survival, NSN)是衡量网络寿命和生存时间的重要参数。因此,为了延长网络生存周期,应尽量避免过多的节点失效或死亡,保障存活节点的数量。

图 3 和图 4 中,横坐标是轮数,纵坐标分别是存活节点的数量变化趋势和系统总能量消耗变化趋势。图 3 表明传统 LEACH 算法的存活节点数量在第 6 轮就消失,而 CSRPE 协议在第 12 轮以后才接近 0,因此网络寿命周期大大低于传统 LEACH 算法。

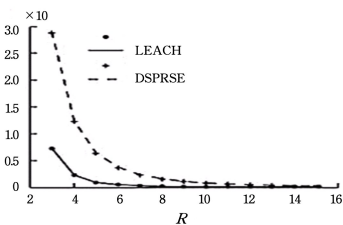


图 3 存活节点随轮数变化的趋势图

Fig. 3 Trend diagram of surviving nodes change with cycle number

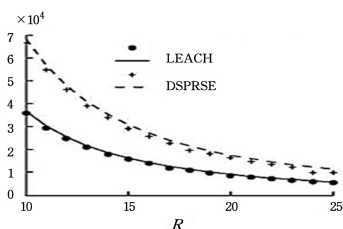


图 4 总能量消耗的趋势图

Fig. 4 Tend diagram of total energy consumption

从图 4 可以看到,LEACH 算法每一轮总能量消耗的变化趋势比 CSRPE 协议高,根本原因在于 CSRPE 协议簇头选择时采用了减法聚类算法。

图 5 显示 CSRPE 协议使簇头节点在节点密集处产生,这种基于节点密度的簇头节点产生方式保证了簇头节点在整个网络中的合理均匀分布,使所产生的簇的规模随网络节点密集度不同而不同,从而高效率地利用簇头节点,在簇的形成算法中,改进了非簇头归属机制,并引入代价函数来计算节点的归属簇,从而使整个网络的能量负载尽可能地平均分配到每个传感器节点。

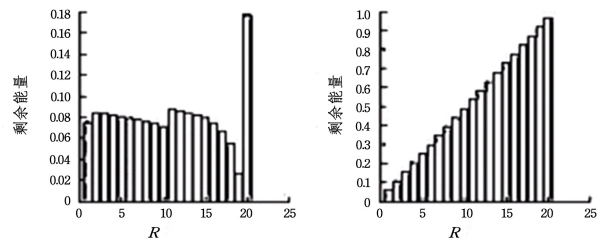


图 5 网络总能量消耗对比图

Fig. 5 Comparison chart of total network energy consumption

图 6 给出本文协议与以数据为中心的分层次 TEEN 协议、以及基于位置的 GEAR 路由协议的横向比较结果,结果表明本文算法在网络能耗方面优于两种对比算法。

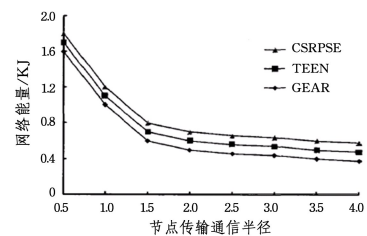


图 6 网络能耗和节点传输通信半径的关系

Fig. 6 Relationship between energy consumption of network and node transmission communication radius

结束语 本文从能量持续补给的角度提出了一种新的路由协议,综合考虑了节点均匀分布和能量消耗等因素,设计并改进了节点簇头选择算法和非簇头归属机制,有效提高了存活节点数量,延长了网络生命周期,仿真结果表明,与传统的一系列路由算法相比,CSRPE 协议在簇头节点的合理分布、存活节点的数量、网络能量消耗等诸多方面都有较大优化。

参考文献

- [1] HEDETNIEMI S, KAMAL A. Routing techniques in wireless sensor networks: a survey[J]. IEEE Wireless Communications, 2014, 11(6): 6-28.
- [2] ZHEN Z W, LIN B, QIAN B P. Research on routing algorithm for wireless sensor network[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2016, 19(2): 463-467.
- [3] ESTRIN J H C, LEANDROS T. Maximum lifetime routing in wireless sensor networks[J]. IEEE Wireless Communications, 2014, 12(4): 609-619.
- [4] CHANDRAKASAN L C, GERLA M. Adaptive clustering for mobile wireless networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2017, 15(7): 1265-1275.
- [5] PEGASIS, HANDY M, TIMMERMAN D. Low energy adap-

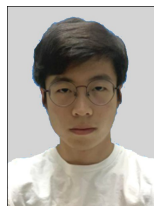
- tive clustering hierarchy with deterministic cluster-head Selection[C]//Proceedings of the 4th IEEE Conference on Mobile and Wireless Communications Networks, San Francisco, USA, 2008.
- [6] INTANAGONWIWAT C, GOVINDAN R, ESTRIN D, et al. Directed diffusion for wireless sensor networking [J]. IEEE Transactions on Networking, 2018, 11(1): 2-16.
- [7] HEINZELMAN W, KULIK J, BALAKRISHNAN H. Adaptive protocols for information dissemination in wireless sensor networks[C]//Proceedings of the 5th ACM International Conference on Mobile Computing and Networks, Seattle, USA, 2009.
- [8] YIN L, YANG R, GABBOUJM, et al. Weighted median filters: a tutorial [J]. IEEE Transactions on Circuits System, 2006, 43(3): 157-192.
- [9] SHEN O, ZHANG S Y, ZHONG Y P. Clustering routing protocol for wireless sensor networks [J]. Journal of Software, 2006, 17(7): 1588-1600.
- [10] YU H B, ZENG P, WANG Z F, et al. Research on communication protocol of distributed wireless sensor network [J]. Journal of Communication, 2004, 25(10): 102-110.
- [11] FAN X P, YANG X, LIU S Q, et al. Clustering routing algorithm for wireless sensor networks with energy supply [J]. Computer Engineering, 2008, 34(11): 120-122.
- [12] YANG X, LIU S Q, FAN X P, et al. Research on multi-path routing of hybrid wireless sensor network based on real-time monitoring [J]. Computer Application Research, 2008, 25(4): 1237-1239.
- [13] PENG L. Wireless sensor network technology [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2011.
- [14] RAMANATHAN R, ROSALES H R. Topology Control of Multihop Wireless Networks using Transmit Power Adjustment [C]//Proceedings of IEEE INFOCOM, 2015: 404-413.
- [15] JAROMCZYK J W, TOUSSAINT G T. Relative Neighborhood Graphs and their Relatives [J]. Proceeding of the IEEE, 2017, 80(9): 1502-1517.



FENG Jun, born in 1983, master's degree, associate professor. His main research interests include wireless sensor network technology and artificial intelligence.

(上接第 272 页)

- [10] LI Y, GAO W. MUVr: Supporting Multi-User Mobile Virtual Reality with Resource Constrained Edge Cloud [C] // 2018 IEEE/ACM Symposium on Edge Computing (SEC). Seattle, WA, 2018: 1-16.
- [11] LIU L, ZHANG X, QIAO M, et al. SafeShareRide: Edge-Based Attack Detection in Ridesharing Services [C] // 2018 IEEE/ACM Symposium on Edge Computing (SEC). Seattle, WA, 2018: 17-29.
- [12] ZAVALYSHYN I, DUARTE N O, SANTOS N. HomePad: A Privacy-Aware Smart Hub for Home Environments [C] // 2018 IEEE/ACM Symposium on Edge Computing (SEC). Seattle, WA, 2018: 58-73.
- [13] TRIMANANDA R, YOUNIS A, WANG B, et al. Vigilias: Securing Smart Home Edge Computing [C] // 2018 IEEE/ACM Symposium on Edge Computing (SEC). Seattle, WA, 2018: 74-89.
- [14] MAO Y, YI S, LI Q, et al. Learning from Differentially Private Neural Activations with Edge Computing [C] // 2018 IEEE/ACM Symposium on Edge Computing (SEC). Seattle, WA, 2018: 90-102.
- [15] EdgeX Foundry. EdgeX Foundry documentatin [OL]. <https://www.edgexfoundry.org>.
- [16] 边缘计算产业联盟(ECC)与工业互联网产业联盟(AII). 边缘计算参考架构 [OL]. <http://www.econsortium.org/Lists/show/id/334.html>.
- [17] OpenEdge. OpenEdge 架构 [OL]. <https://openedge.tech/zh/docs/overview/OpenEdge-design>.
- [18] WU S Y, XIA W W, CUI W Q, et al. An Efficient Offloading Algorithm Based on Support Vector Machine for Mobile Edge Computing in Vehicular Networks [C] // 10. 1109/WCSP. 2018: 1-6.
- [19] SASAKI K, SUZUKI N, MAKIDO S, et al. V-ehicle control system coordinated between cloud and mobile edge computing [C] // 2016 55th Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers of Japan (SICE). IEEE, 2016.
- [20] QUAN Y, ZHOU H, LI J, et al. Toward Efficient Content Delivery for Automated Driving Services: An Edge Computing Solution [J]. IEEE Network, 2018, 32(1): 80-86.
- [21] HU L, MIAO Y M, WU G X, et al. iRobot-Factory: An intelligent robot factory based on cognitive manufacturing and edge computing [J]. Future Generation Computer Systems, 2018: S0167739X1831183X-.
- [22] CHEN B T, WAN J F, CELESTI A, et al. Edge Computing in IoT-Based Manufacturing [J]. IEEE Communications Magazine, 2018, 56(9): 103-109.
- [23] WU X B, YANG Z G. The Concept of Smart City and Future City Development [J]. Urban Studies, 2010, 17(11): 56-60.
- [24] WANG R, TSAI W, HE J, et al. A Video Surveillance System Based on Permissioned Blockchains and Edge Computing [C] // 2019 IEEE International Conference on Big Data and Smart Computing (BigComp). Kyoto, Japan, 2019: 1-6.
- [25] AKMANDOR A O, JHA N K. Smart Health Care: An Edge-Side Computing Perspective [J]. IEEE Consumer Electronics Magazine, 2017, 7(1): 29-37.
- [26] GUHA R. Toward the Intelligent Web Systems [C] // International Conference on Computational Intelligence, 2009.
- [27] SINGH D, TRIPATHI G, ALBERTI A M, et al. Semantic edge computing and IoT architecture for military health services in battlefield [C] // 2017 14th IEEE Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC). Las Vegas, NV, 2017: 185-190.



ZHAO Ming, born in 1996, master's degree. His main research interest includes edge computing.