

文章编号: 2095-4980(2021)03-0511-06

移动 WSNs 的能耗区路由

刘丽伟

(郑州工业应用技术学院, 河南 郑州 450044)

摘要: 节点的移动对移动无线传感网络(MWSNs)路由设计提出了挑战。为此, 提出基于接触时间的能耗区路由(CECA)。CECA 路由采用休眠-唤醒机制, 降低了节点能耗。CECA 路由利用源节点与信宿的位置信息构成圆角矩形区域, 且只允许区域内的节点才能参与路由。通过节点移动信息, 计算接触时间, 并利用接触时间设置定时器, 进而通过定时器竞争产生下一跳转发节点。仿真数据表明, CECA 路由的通信连通时间及数据包传递率得到有效的增加和提高。

关键词: 移动无线传感网络; 能耗路由; 圆角矩形区; 接触时间; 移动矢量

中图分类号: TN925

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2019196

Energy consumption based area routing in mobile wireless sensor networks

LIU Liwei

(Zhengzhou University of Industry Technology, Zhengzhou Henan 450044, China)

Abstract: The movement of nodes challenges the design of routing in Mobile Wireless Sensor Networks (MWSNs). Therefore, Contact time-Energy Consumption Area(CECA) based Routing is proposed in this paper. In CECA routing, all the nodes follow a sleep-wakeup pattern to improve energy efficiency. Communication between the source and the sink is established by creating a rounded rectangle region. Only the nodes in rounded rectangle region participate in the routing. The Contact-Time(CT) between source and neighbor node is computed by mobility information, and the timer is set by CT. The next-hop forwarding node is selected by timer. Simulation results indicate that CECA protocol has better performance in term of packet delivery ratio and connection-time of routing.

Keywords: Mobile Wireless Sensor Networks; Energy-Consumption Routing; rounded rectangle region; Contact-Time; mobility vector

无线传感网络(WSNs)已广泛应用于各类检测领域, 如康复医疗、目标检测^[1-2]。通过 WSNs 中的节点实时地感测数据, 检测异常情况。针对这些应用, 主要涉及 2 个问题: 节点能耗; 节点(终端)移动。能耗是多数 WSNs 应用不能忽略的问题^[3]。多数传感节点均有电池供电, 且这些节点又属微型设备, 电池能量有限。并且当电池能量消耗殆尽后, 也不便于更换电池。必须在有限的电池能量环境下, 最大化地提高能量效率。在静态网络中, 一旦部署完毕, 节点就不再移动。而在 MWSNs 中, 节点会随机或按照特定机制移动。例如, 在康复医疗中, 安装在病人身上的传感节点, 会随病人移动, 即节点是移动的^[4]。节点的移动会引起网络拓扑的变化, 加大了 WSNs 的数据收集难度。因此, 针对 MWSNs 网络的路由协议, 必须考虑能耗和节点的移动性问题。特别是在移动环境^[5]中, 节点的移动, 使得传统的基于静态网络环境设计的路由协议不再适用。例如, 传统的路由协议采用建立路由表决策路由, 但是在移动环境中, 实时建立路由表非常困难。文献[6]分析 MWSNs 网络的能耗问题, 并没有有效地处理节点移动问题, 而是假定节点位置可知, 或者是可预知的。文献[7]针对 MWSNs 提出基于簇的能耗路由。然而, 节点的移动加大建立簇的难度。考虑到能耗, 文献[8]引用低功耗易损网络(Low Power and Lossy Network, LPLN)概念, 引用电晕机制处理节点移动问题。该策略存在较大的控制消息冗余问题。文献[9]引用区路由概念, 提出基于蜂窝虚拟网格的 WSNs 的分簇路由。该路由采用正六边形, 并进行网络

收稿日期: 2019-06-14; 修回日期: 2019-07-19

基金项目: 河南省重大科技专项基金资助项目(182102210100)

作者简介: 刘丽伟(1983-), 男, 硕士, 主要研究方向为计算机网络与通信、互联网技术、信息安全。email: huksi_sks@163.com

划分。类似地，文献[10]依据四叉树对监测区进行网格划分。这些策略均采用区路由概念。同时，徐会彬等^[11]针对节点移动问题，提出基于链路寿命路由，通过实时计算链路寿命决策路由。但是，该路由只适用于车联网。而张靖浩等^[12]提出基于局部社会关系的机会网络路由，其通过预测节点的接触时间，决策路由。然而，该路由也只适用于机会路由，并没有考虑到节点能耗问题。针对 MWSNs 的能耗和节点移动问题，提出基于接触时间的 CECA。CECA 路由引用休眠机制，使得不参与路由的节点进入休眠状态。同时，通过节点间的接触时间决策路由，增强路由的稳定性。仿真数据表明，提出的 CECA 路由降低了数据包丢失率，减少了能耗。

1 能耗区路由

1.1 系统模型

假定网络内所有节点能获取自己的位置信息。网络内有 M 个移动节点和一个信宿分布于区域 A 内。令 $(x_{\text{sink}}, y_{\text{sink}})$ 表示信宿位置。移动节点具有休眠-唤醒功能。当不参与路由时，就进入休眠状态，进而保存能量。此外，节点周期地广播 HELLO 包，其包含节点的移动速度和位置信息。通过交互 HELLO 包，节点能够获取邻居节点的速度和位置信息。

在检测区域 A 内，传感节点一旦感测数据，就向信宿传输数据。因此，整个路由就是围绕信宿方向。据此，建立包含信宿的圆角矩形区域^[13]，如图 1 所示。圆角矩形区域的节点可进入休眠。而只有区域内的节点才参与路由。

一旦建立圆角矩阵区域后，源节点就计算与圆角矩阵区域内节点的接触时间(CT)，并依据 CT 选择下一跳转发节点。因此，CECA 路由主要由圆角矩形区构建和数据传输 2 个阶段构成。

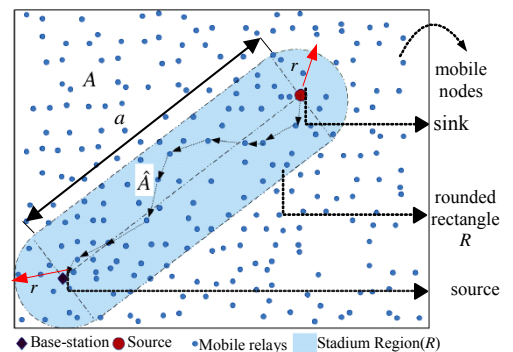


Fig.1 Rounded rectangle

图 1 圆角矩形区域

1.2 圆角矩形区构建

当节点需要传输数据时，进入圆角矩形区构建阶段，将此节点称为源节点。源节点通过圆角矩形区^[14]，向目的节点传输数据。构建过程如下：

首先，源节点、信宿分别以自己位置为圆心，以传输距离 r 为半径，形成一个圆。传输距离是指节点射频信号的覆盖距离。然后，再将 2 个圆对切，各留一半。长为 a 、宽为 $2r$ 矩形连通留下的 2 个半圆，如图 1 所示。

依据解析几何理论，计算圆角矩形区域的面积，如式(1)所示：

$$S = \pi r^2 + 2ra \tag{1}$$

令 Ω 表示圆角矩形区内所有节点集。依据圆角矩形区，可将节点划分为 2 类：区域内和区域外。为此，引用一个二值变量 F 。若移动节点 s_i 在区域内，则 $F_i=1$ ；否则 $F_i=0$ ，如式(2)所示：

$$F_i = \begin{cases} 1, & \text{if } s_i \in \Omega \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \tag{2}$$

式中 $i=1,2,\dots,M$ 。

2 数据传输阶段

2.1 定时器的设置

只有 $s_i \in \Omega$ ，节点才能参与路由。而 $s_i \notin \Omega$ 的节点进入休眠状态，且 $i=1,2,\dots,M$ 。当源节点(假定为节点 s_i)需要传输数据，它需从 Ω 内择优选择一个节点作为下一跳转发节点。

首先，节点 s_i 向其一跳邻居节点广播数据请求包(Data Request, DARE)。当邻居节点(假定为节点 s_j)接收 DARE 后，邻居节点设置定时器。令 T 表示定时器的时长。令 t_{CT} 表示节点 s_i 与节点 s_j 的接触时间。定时器用来计时。通过预设定时时间，当定时时间完毕，就触发事件。

接触时间越长，表示源节点 s_i 与 s_j 间连通性越好，那节点 s_j 具有转发数据包的优先权就越大。因此，节点

s_j 的定时器时长 T 与接触时间成反比, 如式(3)所示:

$$T = \frac{1}{t_{CT}} \quad (3)$$

2.2 接触时间的计算

从式(3)可知, 定时器时长 T 取决于接触时间 t_{CT} 。接下来, 阐述如何计算 2 个节点的接触时间 t_{CT} 。

实际上, 2 个节点间的接触时间表示邻居节点呆在自己通信范围内的时间。令 $X_i(t_0), X_j(t_0)$ 分别表示节点 s_i, s_j 在时刻 t_0 的位置坐标。若 $\|X_i(t_0) - X_j(t_0)\| \leq r$, 则表示 s_j 在节点 s_i 的通信范围内, 其中 $\|X_i(t_0) - X_j(t_0)\|$ 表示节点 s_i 与节点 s_j 间的距离。

由于节点移动, s_j 不再在节点 s_i 的通信范围。当它们间的通信距离 $\|X_i(t_1) - X_j(t_1)\| > r$, 则表明节点 s_j 已移出节点 s_i 的通信范围, 其中 $X_i(t_1), X_j(t_1)$ 分别表示节点 s_i, s_j 在时刻 t_1 的位置坐标。

为了能准确地计算节点 s_i 与节点 s_j 的接触时间, 需第一时间确认时刻 t_1 。时刻 t_1 表示节点 s_j 正离开节点 s_i 通信范围内, 其定义如式(4)所示:

$$t_1 = \min_t \|X_i(t_1) - X_j(t_1)\| > r \quad (4)$$

节点 s_i 与节点 s_j 的接触时间 t_{CT} 等于 s_j 停留在 s_i 通信范围内的时间 $t_{CT} = t_1 - t_0$ 。换言之, t_0 是接触的开始时间, t_1 是接触的终结时间。

若已知节点的移动速度, 便可估算接触的开始时间 t_0 和接触的终结时间 t_1 。令 $\mathcal{G}_i, \mathcal{G}_j$ 分别表示节点 s_i, s_j 的移动速度。 d_0 表示在时刻 t_0 节点 s_i 与 s_j 间的距离。当它们间的距离等于 r , 即出现了时刻 t_1 。因此, 可建立式(5):

$$t_{CT} = t_1 - t_0 = \frac{r - d_0}{|\mathcal{G}_r|} \quad (5)$$

式中 $|\mathcal{G}_r|$ 表示节点 s_i 与节点 s_j 的相对速度 \mathcal{G}_r 的模, 即 $\mathcal{G}_r = \mathcal{G}_i - \mathcal{G}_j$ 。

结合图 2, 对速度 $\mathcal{G}_i, \mathcal{G}_j$ 进行分解。相对速度 \mathcal{G}_r 在 x 轴上的分量 $\mathcal{G}_r(x)$:

$$\mathcal{G}_r(x) = |\mathcal{G}_i| \cos \theta_i - |\mathcal{G}_j| \cos \theta_j \quad (6)$$

同理, \mathcal{G}_r 在 y 轴上的分量 $\mathcal{G}_r(y)$:

$$\mathcal{G}_r(y) = |\mathcal{G}_i| \sin \theta_i - |\mathcal{G}_j| \sin \theta_j \quad (7)$$

依据解析几何理论, $|\mathcal{G}_r| = \sqrt{\mathcal{G}_r(x)^2 + \mathcal{G}_r(y)^2}$ 。

由于 t_0 为 2 个移动节点在彼此通信范围内的初始时刻, 而 t_1 为 2 个移动节点不在彼此通信范围内的第一个时间, 即自 t_1 时刻开始, 2 个移动节点不再在通信范围内, 因此, 等式(5)可表示为:

$$t_{CT} = t_1 - t_0 = \frac{r - d_0}{\sqrt{\mathcal{G}_r(x)^2 + \mathcal{G}_r(y)^2}} \quad (8)$$

2.3 下一跳节点的选择

依上文所述, 当源节点需要传输数据时, 向邻居节点广播请求包 DARE, 其携带了节点的位置、速度信息和目的节点 ID。邻居节点接收后, 首先检测自己是否为目的节点。若是, 回复确认包 ACK(Acknowledge character)。一旦接收了 ACK 包, 源节点直接向发送 ACK 的节点传输数据。图 3 显示了控制包 DARE, ACK 和数据包 Data 的传输过程。

若自己不是数据包的目的节点, 它就竞争成下一跳转发节点。在这种情况下, 接收到 DARE 的节点就用式(8)计算接触时间 CT, 再依据式(3)设置定时器。

当时定完毕后, 并且在定时过程中, 没有监听到其他节点向源节点回复 ACK 包, 在这种情况下, 节点就向

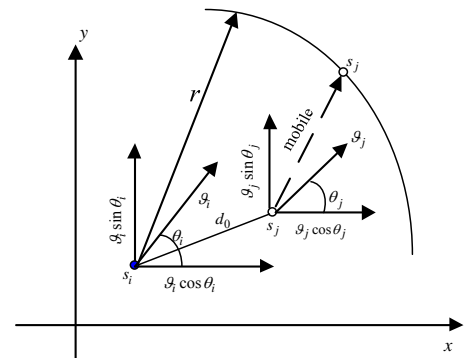


Fig.2 Vector diagram of node position
图 2 节点位置矢量示意图

源节点回复 ACK 包，如图 3 所示。当然，如果监听到其他节点已回复了 ACK 包，表明已有节点的定时器先定时完毕。在这种情况下，节点取消定时，放弃竞争。

图 4 显示了下一跳节点的选择过程。源节点将最先传输 ACK 包的节点作为下一跳转发节点。原因在于：接触时间越长，定时器定时越短，越能最早传输 ACK 包。

3 数值仿真

3.1 仿真环境

引用 Castalia 软件建立仿真平台，分析 CECA 路由的性能。考虑 $A=200\text{ m}\times 200\text{ m}$ 的仿真区域，且 $M=55$ 个移动节点分布于 A 。采用 Random-waypoint 移动模型，节点移动速度在 $0\sim 10\text{ m/s}$ 范围内变化。引用固定数据包尺寸，每个数据包大小为 128 bit 。数据包发送率在 $10\sim 200\text{ packets/s}$ 。

为了更好地分析 CECA 路由的性能，选择典型的路由作为参照，并对分析它们的数据包传递率和路由的连通时间。其中数据包传输率等于信宿所接收的数据包数与网络内所发送的所有数据包数的比值。

选择的 2 个参照路由：a) 基于接收器的机会转发(Receiver based Opportunistic Forwarding, ROF)路由^[15]；b) 贪婪边界转发路由(Greedy Perimeter Stateless Routing, GPSR)^[16]。

作为典型的地理位置路由，GPSR 路由只需局部节点位置信息发现路由，无需掌握全局的网络拓扑信息，控制开销较少，但是 GPSR 路由容易遭受局部最小化问题。在移动环境下，GPSR 路由性能差。与 GPSR 路由不同，ROF 路由是通过竞争机制产生下一跳转发节点。但是，它没有考虑到节点的随机移动问题。

3.2 数值分析

首先分析路由的连通时间随节点移动速度的变化情况，且数据包发送率为 100 packets/s 。节点的移动速度从 $0.5\sim 10\text{ m/s}$ 变化。

图 5 显示了各路由的连通时间随移动速度的变化情况。从图 5 可知，提出的 CECA 路由拓延了路由的连通时间。与 ROF 路由和 GPSR 路由相比，CECA 路由的连通时间得到有效的增加。原因在于：CECA 路由引用链路的接触时间作为路由指标。选择持续连通时间长的节点构建路由，删除容易断裂的链路。而 GPSR 路由只依据局部节点位置信息决策路由，并没有考虑到链路的持续时间。

此外，移动速度的增加减少了路由的连通时间。这主要是因为：移动速度的增加，加速了网络拓扑的变化，缩短了链路的持续时间。

接下来，分析 CECA 路由的数据包传递率性能。先考虑数据发送率对数据包传递率的影响。假定移动速度 0.5 m/s ，数据发送率从 $10\sim 200\text{ packets/s}$ 变化。仿真数据如图 6 所示。

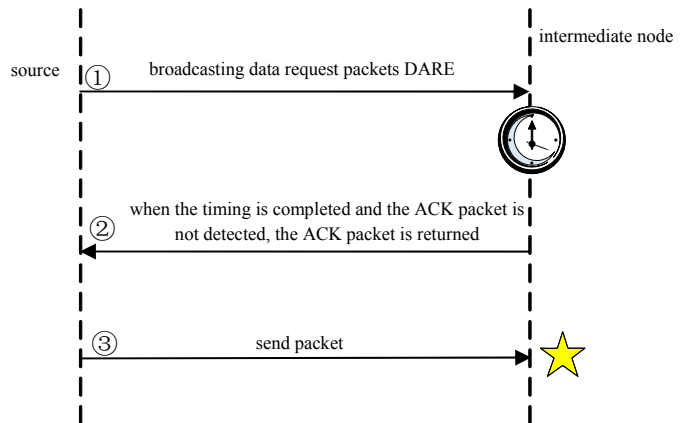


Fig.3 Intermediate node receives the packet
图 3 中间节点接收数据包的示意图

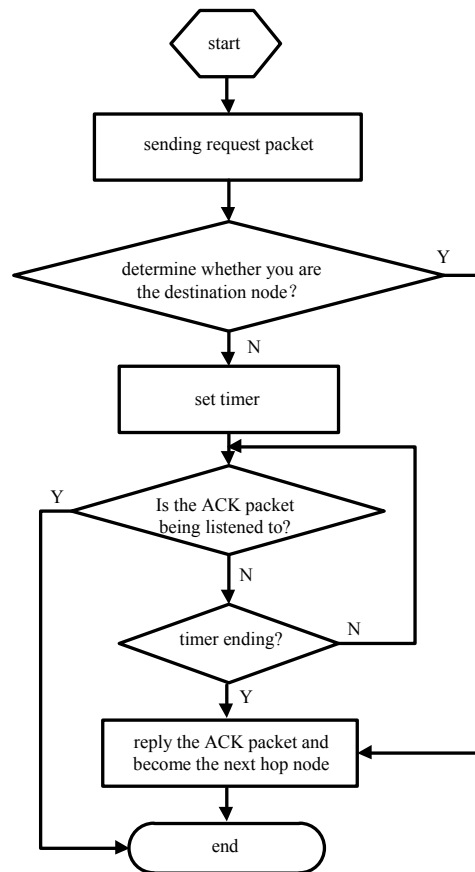


Fig.4 Selection process of next hop node
图 4 下一跳节点的选择过程

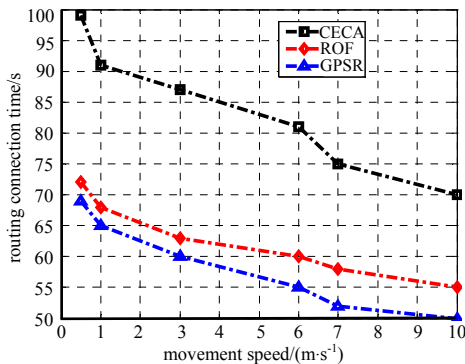


Fig.5 Connection time of routing
图 5 路由的连通时间

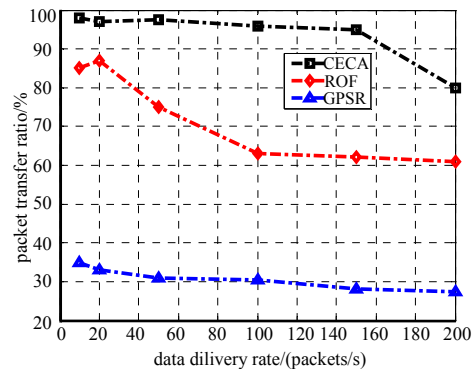


Fig.6 Change of packet delivery rate with data delivery rate
图 6 数据包传递率随数据发送率的变化情况

从图 6 可知, 数据发送率的增加降低数据包传递率。原因在于: 数据发送率的增加, 加大了网络负担, 增加了拥塞率, 进而降低数据包传递率。此外, 与 ROF 路由和 GPSR 路由相比, 提出的 CECA 路由的数据包传递率得到有效提高。这主要是因为: CECA 路由利用源节点与信宿构建圆角矩形区域, 再从区域内选择下一跳转发节点, 同时依据接触时间决策路由, 提高链路的稳定性。

最后, 分析数据包传递率随移动速度的变化情况。数据发送率为 20 packets/s, 节点的移动速度从 0.5~10 m/s 变化, 仿真数据如图 7 所示。

从图 7 可知, 节点移动速度的增加降低了数据包传递率。原因在于: 移动速度的增加加速网络拓扑的变化, 降低了网络连通率, 进而降低了数据包传递率。与 ROF 路由和 GPSR 路由相比, 提出的 CECA 路由的数据包传递率得到有效提高。这主要因为: CECA 路由在决策路由时, 充分考虑了节点的移动问题。

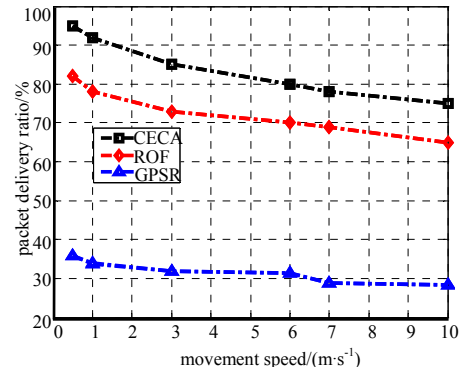


Fig.7 Packet delivery ratio vs. the speed of movement
图 7 数据包传递率随移动速度的变化情况

4 结论

针对 MWSNs 的路由及能耗问题展开分析, 并提出基于接触时间的能耗区路由 CECA。CECA 路由先利用源节点与信宿的位置建立转发区域, 并只从该转发区域内选择下一跳转发节点。同时, 依据节点间的接触时间决策路由, 提高路由的稳定性。仿真数据表明, 与 ROF 路由和 GPSR 路由相比, 提出的 CECA 路由的数据包传递率得到有效提高。后期将进一步优化 CECA 路由, 并扩展其他网络区域, 如车联网。

参考文献:

- [1] 顾剑,李文钧. 轻量级 WSN 分层协议栈的设计与实现[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2018,16(2):312-316. (GU Jian,LI Wenjun. Design and implementation of lightweight layered protocol stack for WSN[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2018,16(2):312-316.)
- [2] SILVA R,SILVA J S,BOAVIDA F. Mobility in wireless sensor networks—survey and proposal[J]. Computer Communications, 2014,52(6):1-20.
- [3] SARA G S,SRIDHARAN D. Routing in mobile wireless sensor network: a survey[J]. Telecommunication Systems, 2014,57(1):51-79.
- [4] BOUBEKRI A,AJIB W,BOUKADOUM M. Eam:energy aware mobility over wireless sensor networks[C]// IEEE 30th Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering(CCECE). Windsor,Canada:IEEE, 2017:1-6.
- [5] 孙毅,孙跃,曾璐,等. 基于最优连通功率控制的 WSNs 跨层路由优化算法[J]. 传感器与微系统, 2014,11(33):135-139. (SUN Yi,SUN Yue,ZENG Lu,et al. Cross-layer routing optimization algorithm for WSNs based on optimal connectivity power control[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2014,11(33):135-139.)
- [6] LUO J,HU J,WU D,et al. Opportunistic routing algorithm for relay node selection in wireless sensor networks[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2015,11(1):112-121.
- [7] SARMA H K,KAR A,MALL R. Energy efficient and reliable routing for mobile wireless sensor networks[C]// IEEE International

- Conference on Distributed Computing in Sensor Systems Workshops(DCOSSW). Santa Barbara,USA:IEEE, 2018:1–6.
- [8] GADDOUR O,KOUB`AA A,RANGARAJAN R,et al. Co-rpl:Rpl routing for mobile low power wireless sensor networks using corona mechanism[C]// IEEE International Symposium on Industrial Embedded Systems(SIES). Toulouse,France:IEEE, 2014:200–209.
- [9] 余修武,胡沐芳,刘琴,等. 基于蜂窝虚拟网格的 WSN 混合多跳分簇路由算法[J]. 传感技术学报, 2018,31(10):1573–1578. (YU Xiuwu,HU Mufang,LIU Qin,et al. An improved clustering routing algorithm with hexagon-based hybrid multi-hop for wireless sensor network[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2018,31(10):1573–1578.)
- [10] 聂云峰,汪涛,鄢化鹏,等. 基于四叉树多层次数据融合的无线传感网络路由协议研究[J]. 传感技术学报, 2018,31(9):1406–1412. (NIE Yunfeng,WANG Tao,YAN Huapeng,et al. Research on routing protocol of wireless sensor network based on quad-tree multi-level data fusion[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2018,31(9):1406–1412.)
- [11] 徐会彬,焦克莹. 车联网中 V2I 通信路由的研究[J]. 传感技术学报, 2018,31(9):1430–1435. (XU Huibin,JIAO Keying. Study on communication routing based on vehicles-to roadside infrastructure in VANETs[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2018,31(9):1430–1435.)
- [12] 张靖洽,叶竹君. 基于局部社会关系预测的机会网络路由协议[J]. 哈尔滨商业大学学报(自然科学版), 2016,32(3): 331–337. (ZHANG Jinghan,YE Zhujun. Opportunistic networks routing protocol based on prediction of local sociality[J]. Journal of Harbin University of Commerce(Natural Sciences Edition), 2016,32(3):331–337.)
- [13] AMUNDSON I,KOUTSOUKOS X. A survey on localization for mobile wireless sensor networks[C]// Mobile Entity Localization and Tracking in GPS-less Environments. Berlin,Heidelberg:Springer, 2009:235–254.
- [14] SREEJITH V,SURVE R,VYAS N. Area based routing protocol for mobile wireless sensor networks[J]. IEEE Communication, 2018,3(6):781–789.
- [15] LI L,SUN L,MA J. A receiver-based opportunistic forwarding protocol for mobile sensor networks[C]// International Conference on Distributed Computing Systems Workshops. Vienna,Austria:[s.n.], 2015:198–203.
- [16] KARP B,KUNG H T. Gpsr:greedy perimeter stateless routing for wireless networks[C]// Proceedings of the 6th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. Washington,USA:[s.n.], 2016:243–254.