

doi:10.11830/ISSN.1000-5013.201605075



采用时分多址的主动式高动态 传感器路由协议

朱超军^{1,2}

(1. 四川大学 计算机学院, 四川 成都 610000;
2. 四川司法警官职业学院 司法信息管理系, 四川 德阳 618000)

摘要: 提出一种基于移动无线传感器网络(MWSN)的主动式高动态传感器路由(AHDSR)协议. 通过简单的跳数度量,使数据朝移动环境中的汇聚节点路由时保持动态和鲁棒. AHDSR 协议使用时分多址(TDMA) MAC 层保持移动环境中梯度指标,同时,使用盲转发技术将信息以多途径的方式在网络中传递. 运用 OP-NET 建模模块进行仿真,并提供一种离散时间仿真器. 仿真结果表明:与其他同类方法相比,提出的协议在数据包投递率、平均数据包时延、吞吐量和开销方面的表现更加适合多种移动网络场景.

关键词: 移动无线传感器网络; 路由协议; 时分多址; 鲁棒性; 动态

中图分类号: TP 393 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2017)05-0710-06

Active High Dynamic Sensor Routing Protocol Using Time Division Multiple Access

ZHU Chaojun^{1,2}

(1. College of Computer Science, Sichuan University, Chengdu 610000, China;
2. Department of Judicial Information Management, Sichuan Judicial and
Police Officers Professional College, Deyang 618000, China)

Abstract: Concerning the poor reliability of most existing routing protocols used in mobile wireless sensor networks (MWSN), active high dynamic sensor routing (AHDSR) based on MWSN is proposed. The proposed protocol is based on a simple hop metric, which enable the data to remain dynamic and robust when routing the sink node in the mobile environment. AHDSR maintains a gradient metric in mobile environments by using a global time division multiple access (TDMA) MAC layer. It also uses the technique of blind forwarding to pass messages through the network in a multipath manner. The effectiveness of the proposed protocol is verified by the simulation results. Compared with other similar methods, data packet delivery ratio, average packet delay throughput and overhead of the proposed protocol are more suitable for a variety of mobile network scenarios.

Keywords: mobile wireless sensor networks; routing protocols; time division multiple access; robust; dynamic

无线传感器网络^[1](WSN)由大量能够进行无线通信的节点组成,在静态 WSN 中,一旦部署了节点就几乎不会移动.然而,在一些场景中,传感器节点需要是动态的,即移动无线传感器网络(MWSN)^[2].

收稿日期: 2016-05-23

通信作者: 朱超军(1975-),男,副教授,主要从事计算机网络、网络安全的研究. E-mail: zhuchaojunsc@126.com.

基金项目: 四川省科技支撑计划项目(2012GZ0091)

与静态传感器网络相比,针对 MWSN 的研究仍非常有限.本质上,根据现有协议,MWSN 是 WSN 和移动自组织网络^[3](MANET)的重合部分.MWSN 的路由协议可分为 2 个范畴:层次式和平面式.层次式路由协议分配任务给不同节点,而在平面路由协议中所有节点执行相同任务^[4].主动式 MANET 路由协议对于 MWSN 来说并不合适^[5].在 MWSN 场景中,最常使用的是自组网请求式距离向量(AODV)路由协议^[6]或其相似协议.Aronsky 等^[7]提出了以数据为中心的编织多路径(DCBM).Salehi 等^[8]提出一种地理机会路由(GOR)^[8].GOR 不需要分配拓扑信息,这是因为节点将数据转发给更靠近汇聚节点的网格而不是节点.然而,如果在预期网格中没有节点得到传输,那么,数据会通过处于较近网格中的节点转发^[9].周颖芝^[10]针对具有移动能力的 Sink 节点,解决 Sink 周围传感器节点能量瓶颈问题.Cakici 等^[11]提出移动自适应跨层路由(MACRO).根据反应式协议,通常路由的发现会导致初始延迟.然而,与主动式协议比较,该延迟相较于路由表的洪泛延迟非常小.因此,本文提出一种基于时分多址^[12](TDMA)的主动式高动态传感器路由协议.

1 提出的 AHDSR 协议

使用固定时隙分配的方式产生一种自由冲突的全局 TDMA MAC 层,而不需要任何动态调度.该方法会降低所需开销和计算效率,并要求全局同步.Nedev^[13]说明了可用方法的选择,由于汇聚节点也分配到一个时隙,所以,可以向所有传感器节点传输高功率网络范围信标.该信标可以提供同步和网络范围控制命令.在目标应用程序中,由于汇聚节点是具有大型电力供应的固定地面站,所以额外的动力开销并不是大问题.

为了允许节点转发从其他节点接收到的数据,一个数据包必须具有可变容量.数据包的容量表示为帧,帧数为数据包中可用数据域的数量.数据包结构显示了 2 种帧数据包,如表 1 所示.表 1 中: n 为节点数; F 为帧数,规定了可以从其他节点同时转发多少帧; L_{data} 为应用程序数据区域所需大小,规定每帧中的数据量,以及这些数据来自哪些传感器、传感器的地理坐标和节点的状态信息; L_p 为区域总大小.由表 1 可知:类型 1(帧 1)通常针对传输中的节点数据和协议开销,并且包含 4 个领域;类型 2(帧 2)只有 3 个领域.根据所需帧的数量,节点可能根据需要重复类型 2(帧 2)的结构.

表 1 AHDSR 数据包结构
Tab.1 Packet structure of AHDSR

| 区域名字 | 帧 1 | | | | 帧 2 | | |
|----------|---|--------------------------|------------|---------|------------|-------|--------------------------|
| | 节点 ID | 跳跃总数 | 生成数据 | 转发节点 ID | 帧数据 | 帧的优先级 | 帧的时间标识 |
| 区域大小/bit | $\lceil \log_2 n \rceil$ | $\lceil \log_2 n \rceil$ | L_{data} | n | L_{data} | 1 | $\lceil \log_2 n \rceil$ |
| L_p | $\lceil \log_2 n \rceil + F(L_{data} + 1 + \lceil \log_2 n \rceil) - 1 + n$ | | | | | | |

如果节点有来自 4 节点的数据要转发,就会用其拥有的数据满足类型 1(帧 1),然后 4 次重复类型 2 的帧结构,每增加一个,需要传输的额外数据段就进行一次.转发节点 IDs 区域表明数据包中存在的哪个节点数据,是通过使用单一字节表示每个节点实现.如果第 3 个和第 6 个字节设置较高,表示数据包中含有 2 个额外的帧,分别包含来自节点 3 和节点 6 的数据.

为了计算最小容许时隙的长度,需要对节点传输的帧数设置上限.因为距离汇聚节点更近的节点将会需要更多空间,而距离较远的节点需要的较少.然而,变化的拓扑结构意味着节点的需求会随着时间变化.同样,如果最大帧数太低,那么瓶颈作用将会导致数据丢失.如果数据包最大,尺寸太大,将会浪费宽带.较大的时隙长度将会减少传输频率,并节约能源.

为了确定恰当的帧数最大值,度量 α 表示为

$$\alpha = 2^{1-n} \cdot \sum_{c=n-F}^{n-1} \frac{(n-1)}{c}. \quad (1)$$

式(1)中: n 为网络中的节点总数; F 为一个数据包的最大帧容量; α 值对于给定 n 和 F 不会遭受瓶颈作用的可能拓扑结构的分数.

在一个具有 5 个节点的网络中,有 1 024 种可能拓扑结构.其中,拓扑结构的数量为 $2^{n(n-1)/2}$, n 为节点的总数.允许每个节点转发各自数据和和其他 2 个节点数据,使得帧容量为 3.在 1 024 个可能拓扑结构

中,有 704 个不会遭受瓶颈作用,通过公式计算获得,即

$$T = 2^{(n-1)(n-2)/2} \sum_{c=x}^{n-1} \binom{n-1}{c}. \quad (2)$$

即有 $1\,024 - 704 = 320$ 种可能拓扑结构,那么帧容量为 3 就不能满足要求.该例子中 α 为 0.687 5,即 68.75% 的拓扑结构将不会因为瓶颈作用而受到损失.用这种方式可以使用式(1)基于网络中节点数量和给定可接受的 α 值选择合适的 F 值.

在 AHDSR 中,每次传输都由所有传输节点的邻节点接收,允许所有节点收集局部拓扑信息,即节点邻居的跳跃总数.节点使用该信息确定各自跳跃数量,比其邻居最低跳跃总数大 1.所以,如果一个节点有 3 个邻居,跳跃总数为 2,4 或 5,那么,该节点将会设置跳跃总数为 3.由于使用一种确定的整体 TDMA 方案,节点将在每次循环中获得来自每个邻居的单一传输.即节点可以每次循环更新跳跃总数,这将使梯度指标能够在整个网络中得到维持而不会泛滥.这大大降低了协议开销,也是其最大的优势.

AHDSR 使用跳跃总数梯度执行盲转发,一个节点的传输会被所有邻居听到,并且这些节点独立决定是否应该转发任何接收到的数据.即当节点听到一个传输时,将比较传输节点和自己的跳跃总数.如果接收的跳跃总数低于自己的,那么,传输节点距离汇聚节点更近且该数据包可以忽略.如果接收的跳跃总数高于自己的,那么,该传输节点距离汇聚节点更远,所以从数据包中提取该数据并储存.如果接收的跳跃总数等于自己的,那么,该传输节点距离汇聚节点的距离与自己的相同,则从数据包中提取该数据,评估并且储存或丢弃.

每个帧都有一个状态,指定为优先状态的帧即为优先帧,而没有优先权的帧并没有被丢弃,而认为是多样性的数据.传输节点产生的帧自动认为是优先帧,而转发的帧通过一种帧的优先位为其指定优先权.当一个节点为了传输而收集数据包时,首先,将用优先数据填充可用帧;然后,任何空的帧将会用多样性数据填满.这允许节点使用更多可用数据包的容量.通过广播,接收器做出转发帧的决定,由于对数据包进行了广播所以多个节点都会接收到数据.这在本质上创建了一种多路径的方案,其中,相同数据沿着多个路由转发到汇聚节点.路由分集的使用提高了可靠性,这是因为如果一个路径没能送出一段数据,而其他路径可能会成功送出.即网络中将会创建多个数据复制,这可能造成堵塞.然而,这个的权衡是在成功送出数据的可能性增加的情况下进行.

为了允许协议保持最小内存需求并且处理高水平通信量而丢弃作废的帧.即如果一个节点接收到两段源自相同节点的数据,那么,就会忽略老的片段支持新的片段.如果一个节点接收的数据比已经在队列中的数据老,那么,就认为接收的数据过期并且将其丢弃.

单一节点在每个时隙操作的流程图,如图 1 所示.节点确定当前时隙是否是其专用时隙,如果是,则编辑来自队列帧及其自身数据的数据包.首先,储存优先数据;然后,用多样性数据填充剩余空间;最后,将数据包散播给任何处于传输半径内的节点.

通常不是节点专用的时隙都需要侦听数据包,节点在接收一个数据包时,会提取传输跳跃总数,且在需要时进行自我更新.恢复相关数据并储存用于转发. AHDSR 分别对待每个节点,即不同帧可以采用多种不同路径穿过网络.同时,通过只共享拓扑信息意味着维持最小开销,并且将梯度度量维持在高移动环境中.

2 仿真实验与分析

利用 OPNET 建模^[14]模块进行仿真,提供了一种离散时间仿真器.传输半径为 250 m,收发器的传输速率为 $250 \text{ kbit} \cdot \text{s}^{-1}$.模仿一种低成本、低功率的收发器,节点移动性使用随机路点模型控制,暂停时间设置为 0,且通过 $0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和最小值之间的均匀分布设置速度.所有节点包括汇聚节点都会移动.每个传感器节点认为是一种资源,并且可以以这种速度产生数据.数据长度是一个固定参数,对于仿真 32 bit,包含了节点的空间坐标和抽取的传感器数据.

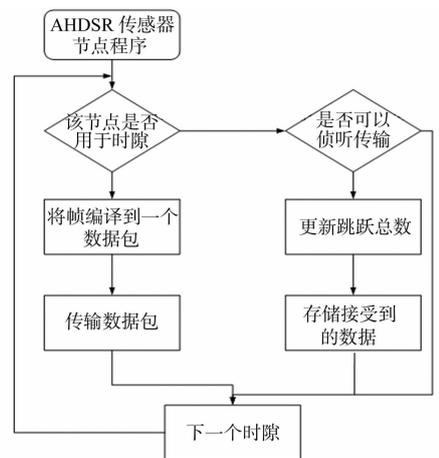


图 1 运行 AHDSR 协议的传感器节点的流程图

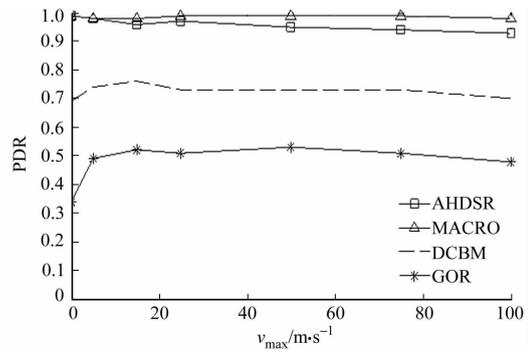
Fig. 1 Flow chart of sensor node when running AHDSR protocol

为了表征不同参数下协议性能,采用平均端到端延迟(τ)、数据包投递率(PDR)、吞吐量、开销(B)和能量损耗(P)进行评估。

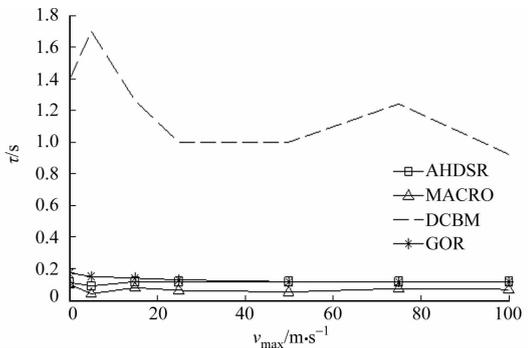
2.1 不同节点最大速度

不同最大速度时,各路由协议的结果如图 2 所示.图 2 中: v_{\max} 为最大速度.节点数固定为 25,每个节点的数据产生速率设定为 $1 \text{ pk} \cdot \text{s}^{-1}$ (pk 为数据包数目).同时,网络大小为 $600 \text{ m} \times 600 \text{ m}$.由图 2 可知:随着节点最大速度的增加,各个协议的 PDR 和吞吐量均呈下降趋势,因为错误估计节点速度的增加会导致更多的数据包丢失,从而降低 PDR.相比其他几种协议,MACRO 虽然具有较高的 PDR,但其网络吞吐量低于所提的 AHDSR 协议。

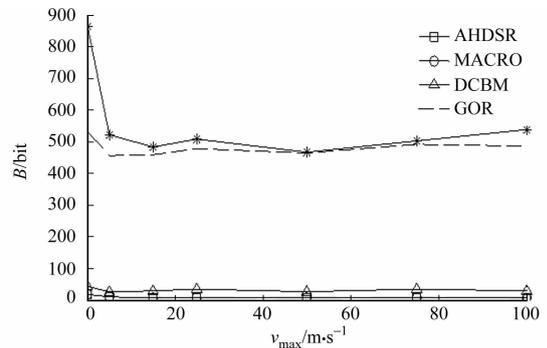
在 PDR 和吞吐量方面,DCBM 和 GOR 的性能较差.DCBM 和 GOR 较大的开销是由路由发现和拓扑信息共享导致,同时也导致了网络的堵塞,产生了较大延迟和数据包丢失.此外,仿真中增加速度意味着拓扑结构改变更加频繁,因此,需要更大开销来维持更新路由.开销的分析结果非常接近 AHDSR 的仿真结果,即当速度增加时,两种度量增幅最小.延迟结果在速度较高时增加较小,预期结果比仿真结果的延迟时间稍高.DCBM 有最长的延迟时间,而 GOR 的平均延迟时间比 AHDSR 小.GOR 的低 PDR 意味着丢弃了许多数据包,因此,网络中有更少数据包,即传送的数据包在网络中的速度更快,MACRO 比 AHDSR 显示出稍好的延迟,但是,AHDSR 提高了开销水平且有更好的能量性能.通常 DCBM 和 GOR 在这些情景中的性能较差,这是因为其并不适用于这些较高速度的类型.而 AHDSR 和 MACRO 性能更好。



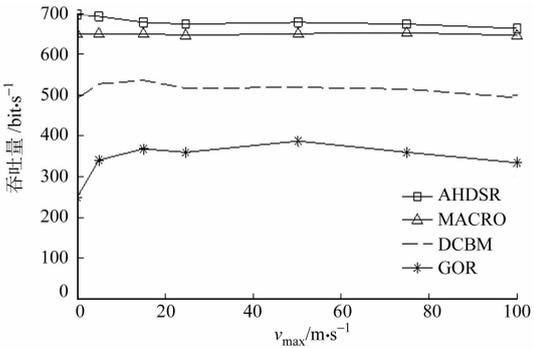
(a) PDR



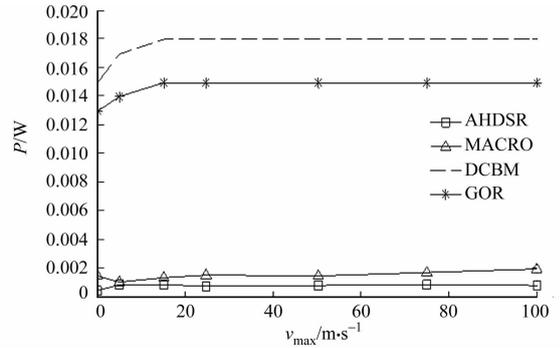
(b) 平均端到端延迟



(c) 开销



(d) 吞吐量



(e) 平均能量损耗

图 2 不同最大速度的各路由协议的结果

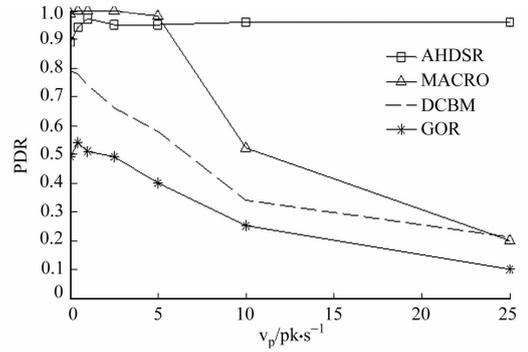
Fig. 2 Result of each protocol with different maximum speed

2.2 不同流量负荷

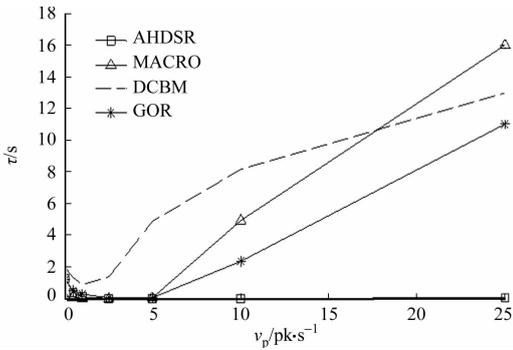
不同流量负荷时,各路由协议的结果如图 3 所示.图 3 中: v_p 为数据包产生速度;节点数固定为 25 个;最大速度为 $25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.每个传感器节点都产生数据,全网流量负载为 $2.4 \sim 586.3 \text{ pk} \cdot \text{s}^{-1}$.最大产

生速度 $24.4 \text{ pk} \cdot \text{s}^{-1}$ 表示最大允许数据传输速率. 这是由 TDMA 循环的长度指示, 由于一个节点值能够在一次循环中传输一次, 所以其最大数据产生速度为 $1/\Delta n$, 导致全网数据产生速度为 $1/\Delta$.

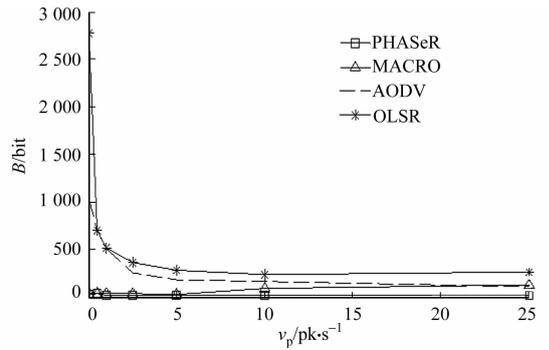
关于辐射映射应用, 概念数据产生速度可以控制映射的分辨率. PDR 通常较高且对于更高数据产生速率显著增加, 这种增加的结果是 TDMA 循环时间等于数据产生速度的倒数. 在实践中, 通过均匀延迟完成每个时隙, 即在较低数据包速率的情况下, 循环时间很长, 使梯度指标更新较慢. 当数据产生速度为 $0.1 \text{ pk} \cdot \text{s}^{-1}$, 循环时间为 10 s , 且平均链接寿命 t_{av} 为 12.73 s 时, 没有定期更新梯度场. 然而, 由于 $0.5 \text{ pk} \cdot \text{s}^{-1}$ 的循环时间为 2 s , 所以只有一种可能具有较低数据产生速度, 能够在拓扑结构改变的情况下维持梯度场. 通过延长时隙以适应所需数



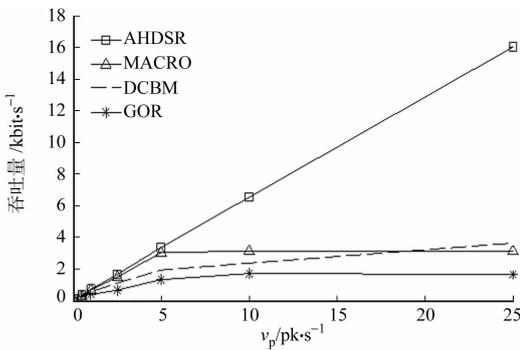
(a) PDR



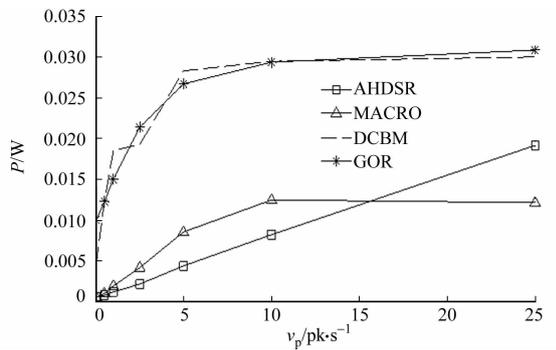
(b) 平均端到端延迟



(c) 开销



(d) 吞吐量



(e) 平均能量损耗

图3 不同流量负荷的各路由协议结果

Fig. 3 Result of each protocol with different traffic load

据生成率, 从而节约能量. 能量消耗结果显示, 当网络中数据包增加时, 平均能耗也会随之增加.

相比之下, 即使在较低的数据包速度下, DCBM 和 GOR 也使用大量能量, 当数据产生速度增加时, 能量损耗稍有增加. 在更高数据包速度下, MACRO 能量损耗有所增加, 然而, 由于饱和在 $10 \text{ pk} \cdot \text{s}^{-1}$ 之后停滞, AHDSR 分析结果稍微高估了能量增加. 开销结果显示, DCBM 和 GOR 即使在没有太多数据传输的情况下, 也产生大量开销, 但是由于引进了更多数据, 数据比特和开销之间的比率均等.

AHDSR 显示了持续低量的开销, 通过分析结果近似预测. MACRO 在开销方面显示了轻微增加, 但是其吞吐量在数据包产生速度大于 $5 \text{ pk} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 似乎达到了饱和限度. AHDSR 吞吐量在数据产生速度增加时, 平稳升高. DCBM 和 GOR 的吞吐量在越来越多数据包丢失时开始进入稳定阶段. 延迟结果显示, AHDSR 持续较低延迟, 实际上, 当产生更多数据时减小. 这是因为循环时间的减小, 允许每个节点更频繁地进入介质, 所以数据包可能更快地穿过网络. 相比之下, MACRO 在 $5 \text{ pk} \cdot \text{s}^{-1}$ 之后, 其延长时隙急速上升. 总之, AHDSR 在 $1 \text{ pk} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上表现出持续较高的性能水平, 其他 3 个协议当通信量水平增加时退化明显.

实验结果显示,AHDSR 适合于广泛的场景,包括模拟具有 UAV 的辐射映射的应用。DCBM 和 GOR 的结果在这些场景中的性能水平较低。与 MACRO 相比,AHDSR 的能量损耗更大。然而,MACRO 在一些场景中的 PDR 水平显著提高。在延迟方面,AHDSR 端到端延迟与 MACRO 相似。

3 结束语

提出一种针对 MWSN 设计的路由协议,AHDSR 通过使用全局 TDMA MAC 层,降低开销的方法维持梯度指标,并使用盲转发技术,允许数据同时通过多路径穿过网络。该协议适用于各种高动态的数据网络场景。仿真分析表明:该协议在各种不同移动性、延展性和通信量水平的情况下都有效,性能表现优异。由于节点能够将数据从多个节点传输到单一数据包中,所以未来研究可能关注于使用聚合技术组合接收,进一步研究协议性能信道衰减的影响。

参考文献:

- [1] 梁娟,吴媛.采用 WSVM 的三维无线传感器网络节点定位[J].华侨大学学报(自然科学版),2016,37(1):79-83.
- [2] 马睿.移动无线传感器网络路由协议的分析与研究[D].北京:北京邮电大学,2011:9-23.
- [3] 吴大鹏,武穆清,甄岩.移动自组织网络可用带宽估计方法研究进展[J].通信学报,2010,31(4):103-115.
- [4] 毛万东.移动无线传感器网络节点定位技术研究[D].合肥:中国科学技术大学,2014:13-25.
- [5] LAMBROU T P,PANAYIOTOU C G. A Survey on routing techniques supporting mobility in sensor networks [C]//International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Networks. Wuyishan:IEEE Press,2009:78-85.
- [6] KOMATHY K,NARAYANASAMY P. Trust-based evolutionary game model assisting AODV routing against selfishness[J]. Journal of Network and Computer Applications,2008,31(4):446-471.
- [7] ARONSKY A,SEGALL A. A multipath routing algorithm for mobile wireless sensor networks[C]//Wireless and Mobile Networking Conference. Budapest:IEEE Press,2010:1-6.
- [8] SALEHI M,BOUKERCHE A. Trust-aware opportunistic routing protocol for wireless networks[C]//Proceedings of the 10th ACM Symposium on QoS and Security for Wireless and Mobile Networks. New York:ACM,2014:79-86.
- [9] 班冬松,温俊,蒋杰,等.移动无线传感器网络 k-栅栏覆盖构建算法[J].软件学报,2011,22(9):2089-2103.
- [10] 周颖芝.移动无线传感器网络路由协议的研究[D].南京:南京邮电大学,2014:24-35.
- [11] CAKICI S,ERTURK I,ATMACA S, *et al.* A novel cross-layer routing protocol for increasing packet transfer reliability in mobile sensor networks[J]. Wireless Personal Communications,2014,77(3):2235-2254.
- [12] 周得敏,刘芸江,李曼,等.一种基于令牌的短波网动态 TDMA 协议设计与仿真[J].重庆邮电大学学报(自然科学版),2015,27(5):595-601.
- [13] NEDEV M D. Time synchronization in sensor networks[J]. Program Systems Institute of RAS,2011,37(4):71-84.
- [14] 李晓汀,丁凡,熊华钢.基于 OPNET 的 CAN 网络建模与仿真[J].北京航空航天大学学报,2009,35(3):284-287.

(责任编辑:黄晓楠 英文审校:吴逢铁)