

激光与光电子学进展

基于邻居表的 msstatePAN 路由改进算法

冀常鹏¹, 李超^{2*}, 冀雯馨³

¹辽宁工程技术大学电子与信息工程学院, 辽宁 葫芦岛 125105;

²辽宁工程技术大学研究生院, 辽宁 葫芦岛 125105;

³常熟理工学院电子信息工程学院, 江苏 苏州 215500

摘要 为解决 msstatePAN 协议栈的簇树路由算法(MTR)中数据包传输选择路径不是最优的问题,提出一种基于邻居表的路由改进算法(EMTR)。该算法利用当前节点、目的节点以及邻居表中邻居节点的信息,找到源节点到目的节点传输跳数最少的路径,并通过能量阈值筛选出能量过低的节点,通过比较节点链路质量选出跳数相同情况下的最优路径,同时可以有效避免在路径选择过程中所产生的冲突。仿真实验表明,相对于 MTR 算法,平均传输跳数减少 35.8%,平均网络时延减少 51.5%,仿真结束时,节点能耗节约 16.1%。此算法既提供了近似最优的路由路径,又保持了无路由表维护开销和低内存消耗等优点,在邻居表维护开销有限的情况下,均衡了网络能量消耗,延长了网络生存时间,减少了传输时延和跳数。

关键词 光通信; 无线传感器网络; msstatePAN 协议栈; 邻居表; 最优路径; 簇树路由算法

中图分类号 TP393.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0506002

Improved Routing Algorithm of msstatePAN Based on Neighbor Table

Ji Changpeng¹, Li Chao^{2*}, Ji Wenxin³

¹School of Electronic and Information Engineering, Liaoning Technical University, Huludao, Liaoning 125105, China;

²Graduate School, Liaoning Technical University, Huludao, Liaoning 125105, China;

³School of Electronic and Information Engineering, Changshu Institute of Technology, Suzhou, Jiangsu 215500, China

Abstract This study proposes an improved routing algorithm based on the neighbor table, called EMTR, to solve the problem that the packet transmission path is not being optimal in the tree routing algorithm of msstatePAN. The algorithm uses the information of the current, destination, and neighbor nodes in the neighbor table to find the path with the least number of hops from the source node to destination node, filters the node with a low energy through threshold, selects the optimal path with the same number of hops by comparing the link quality indication of nodes, and effectively avoids the conflicts in the path selection process. Experimental results show that the number of transmission hops is reduced by 35.8%; the network delay is reduced by 51.5%; and the node energy consumption is reduced by 16.1% at the end of the simulation. The algorithm not only provides an approximate optimal routing path but also maintains the advantages of tree routing, such as no routing table maintenance overhead and low memory consumption. In the case of the limited neighbor table maintenance overhead, the algorithm balances the energy of the network nodes, prolongs the network lifetime, and reduces the transmission delays and hops.

收稿日期: 2020-06-24; 修回日期: 2020-07-19; 录用日期: 2020-07-23

*E-mail: 1037836429@qq.com

Key words optical communications; wireless sensor network; msstatePAN; neighbor table; optimal path; cluster-tree routing algorithm

OCIS codes 060.4251; 060.4256; 060.4257

1 引言

近年来, ZigBee 技术以数据传输安全可靠、低功耗、低成本等优势在短距离无线通信技术中得到广泛应用^[1]。目前国内常用的 ZigBee 协议栈, 一般是半开源的或没有可靠的硬件支持, 开发难度较大。msstatePAN 协议栈是精简版的 ZigBee 协议栈, 可以实现 ZigBee 的所有基本功能, 具有代码开源、结构简单的优点, 且具有自组织自恢复的能力^[2]。

msstatePAN 协议栈使用簇树路由算法选择数据包传输路径, 数据包只能沿树形拓扑转发, 无法提供最佳的路由路径, 于是有些研究人员提出利用邻居表信息进行改进。目前, 国内外学者对 msstatePAN 协议栈应用较多, 极少有人对路由算法进行改进。文献[3-5]所有工作均在 msstatePAN 协议栈上完成, 实验结果表明在此协议栈上的各个无线传感器系统运行稳定、功耗低、可靠性高。文献[6]提出了无线自组网的一种基于决策树路由协议的数据挖掘技术, 通过选择沿稳定的单跳邻居到达目的地, 减小了数据丢失率。文献[7]提出了 ZigBee 网络的两跳邻居表路由算法。该算法利用两跳邻居表, 选择跳数最少的两跳邻居节点作为下一个转发节点, 减少了路由跳数。文献[8]使用增强的信标帧和扩展的邻居表, 减少了跳数, 缓解了 ZigBee 网络的拥塞。文献[9-11]利用邻居表、剩余能量和链路质量(LQI)等改进 ZigBee 树路由算法的传输路径, 延长了 ZigBee 网络生存时间。文献[12]使用传输跳数、剩余能量与链路质量三个因素的加权算法(EZTR), 均衡网络能量、延长网络生存周期, 提供了选择下一跳的最简单方式, 但是该算法的传输跳数高于其他邻居表算法。

由于 msstatePAN 协议栈结构简单, 能量和存储容量有限, 不适合使用复杂算法改进路径选择问题, 参考利用邻居表对其他 ZigBee 协议树路由算法的改进方法, 从数据包传输跳数和能量均衡两个角度出发, 将邻居表应用在路由算法改进方面, 通过设定动态能量阈值, 提出在节点能量足够的情况下, 选择沿树传输跳数最少的路径作为下一跳节

点, 并根据 LQI 值选择最可靠路径传输数据包, 提高网络的稳定性和实时性, 改善无线传感器网络的通信性能。

2 msstatePAN 路由算法

簇树路由算法可以实现星型及树型拓扑, 加入网络的任何两节点间都会沿分层树结构成功通信。节点收到数据包后立即将其转发给下一跳, 不需要维护路由表, 减少了路由开销和节点能量消耗, 并且降低了对节点存储能力的要求。

在组网过程中, 协调器节点发起组网, 路由器节点与终端节点发送入网请求, 入网成功后, 由父节点分配短地址。地址分配主要依靠 3 个参数实现, 分别为 C_m (最大子节点个数)、 R_m (最大路由器个数)、 L_m (网络最大深度)^[13-14]。节点的地址偏移量 $C_{\text{skip}}(d)$ 为

$$C_{\text{skip}}(d) = \begin{cases} 1 + C_m \cdot (L_m - d - 1), & R_m = 1; \\ \frac{1 + C_m - R_m - C_m \cdot R_m^{L_m - d - 1}}{1 - R_m}, & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (1)$$

$$A_i = A_p + C_{\text{skip}}(d) \cdot (i - 1) + 1, 1 \leq i \leq R_m, \quad (2)$$

$$A_k = A_p + C_{\text{skip}}(d) \cdot R_m + k, 1 \leq k \leq C_m - R_m, \quad (3)$$

式中: d 为路由器节点深度; A_p 为父节点地址; A_i 为深度为 d 的路由节点为第 i 个路由节点分配的地址, 由于终端节点没有子节点加入, A_k 为第 k 个终端节点的地址。

在簇树拓扑结构中, 节点按照树状传送数据包^[15-16]。若网络地址为 A_p 的路由节点满足

$$A_p < D < A_p + C_{\text{skip}}(d - 1), \quad (4)$$

则目的节点为子孙节点, 节点将数据包按照地址空间发送给它的子节点, 否则将数据包转发给父节点。如果满足

$$D > A_p + R_m \times C_{\text{skip}}(d), \quad (5)$$

则目的节点为终端节点, 下一跳即可到达目的地, 否则下一跳节点地址 A_n 为

$$A_n = A_p + 1 + \left\lceil \frac{D - (A_p + 1)}{C_{\text{skip}}(d)} \right\rceil \times C_{\text{skip}}(d). \quad (6)$$

使用 MTR 算法时, 会严格按照树形结构的父子关系传输数据包, 因此在一些父节点不同、距离

较近的节点之间传递信息时,仍需要多跳来完成。另外,由于深度较低节点的频繁使用,协调器附近节点的电量可能会过早耗尽,故会导致网络的使用时间缩短。

3 msstatePAN 协议栈路由改进算法

本文算法在 IEEE802.15.4 标准体系下,利用能量阈值和邻居表设计适合 msstatePAN 协议栈的路由方式。通过控制更新次数,避免由能量阈值频繁更新导致的路由路径不稳定和能量消耗,并根据树地址索引(TI)值快速寻找节点传输的最短路径。最后,为防止路径冲突,选择链路状态更好的节点转发。EMTR 算法在保证能量均衡的情况下将传输跳数降到最低,既保证了链路的稳定性,还将能量消耗降到了最低。

3.1 邻居表

在无线传感器网络中,将不需要任何中继节点就可以直接相互通信的节点称为邻居节点,每个全功能设备(FFD)节点都维护其一跳通信范围内的邻居表,精简功能设备(RFD)节点不存储邻居表^[17]。在网络发现、连接和重连接过程中,邻居表将存储附近设备状态信息,但这些信息在传输过程中并不会被使用。由于 msstatePAN 结构简单、存储空间有限,为减少维护邻居表的开销,本文邻居表由节点网络地址、设备类型(RFD 或 FFD)、链路质量(LQI)、TI 以及剩余能量水平 P_E 组成。

LQI 表示接收信号的能量与质量,LQI 值是 0 到 255 之间的整数,值越大表明链路质量越可靠。LQI 值过低,会导致数据包多次重传,最终导致网络能量加速耗尽。

TI 表示从协调器到节点的树路径,图 1 中数值为节点的 TI 值^[18]。TI 值的计算方式为

$$I_{TR} = \begin{cases} (l_1 l_2 l_3 \dots l_d 0 \dots 0), & 0 < d < L_m \\ (l_1 l_2 l_3 \dots l_{L_m}), & d = L_m \end{cases}, \quad (7)$$

式中: l_i 表示深度为 $i-1$ 的节点的第 l_i 个子节点,若 $l_k=0$,则当 $j=k+1, k+2, \dots, L_m$ 时, $l_j=0$, 路径终止。例如,D 节点 TI 值为“210”,前两位非零,则深度 d 为 2,D 是协调器的第二个路由于节点的第一个子节点。 P_E 是当前节点能量 E_{node} 与网络能量均值 \bar{E} 的比值,值越大,节点越适合转发数据,计算公式为

$$P_E = \frac{E_{node}}{\bar{E}}. \quad (8)$$

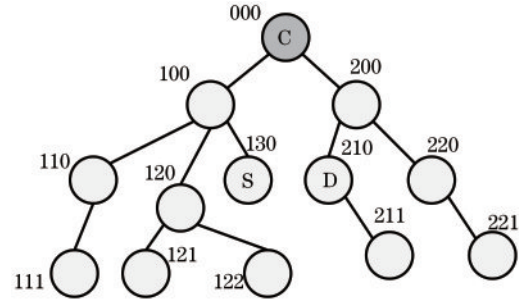


图 1 树地址索引图

Fig. 1 Tree index set

3.2 最佳路径选择

为减小计算复杂度,减少路由开销,利用节点邻居表信息选择最优路径进行数据包转发。路径选择首先通过能量阈值筛选出能量充足节点,通过传输跳数选择路径最短的下一跳节点,最后在跳数相同情况下,通过 LQI 值选择更稳定的路径。

在 msstatePAN 网络能量模型中,节点发送一个 k bit 的数据包,传输距离为 d 所消耗的能量 $E_T(k, d)$ 为

$$E_T(k, d) = kE_{elec} + \epsilon_{elec}kd^3, \quad (9)$$

式中: E_{elec} 为发射电路消耗能量; ϵ_{elec} 为发射放大器消耗能量。若接收电路所需能量 $E_R(k)$ 与发射电路相同,则 k bit 数据 1 跳传输时所需的总能量为

$$E = E_T(k, d) + E_R(k) = 2kE_{elec} + \epsilon_{elec}kd^3. \quad (10)$$

在实际应用中,一些节点频繁被使用,这将导致网络节点能量不均衡,部分节点因能量过早耗尽而失效,最终导致网络数据传输中断。为解决这个问题,设定 FFD 节点的能量阈值 $E_{warning}$, 节点能量高于阈值时,参与邻居节点数据转发,否则,尽量避免数据转发。在实际网络使用时,随着所有节点能量的降低,阈值减幅逐渐减小, $E_{warning}$ 的计算方法为

$$\begin{cases} E_{warning} = \frac{\beta}{f(x)} \sqrt{E} \\ f(x) = \frac{Nx}{N-x}, 1 \leq x < N \end{cases}, \quad (11)$$

式中: β 为减缓阈值减小速度的特定系数,设置为 2 时效果最好; N 为网络中节点总数; x 可视为阈值更新次数,随着 x 值增加, $E_{warning}$ 逐渐减小。

通过使用树地址索引,可以快速计算沿树传输的跳数。从每个邻居节点到目的地的路由跳数为

$$N_{hop} = (d_d - d_{nd}) + (d_n - d_{nd}) = d_d + d_n - 2d_{nd}, \quad (12)$$

式中: d_n 为邻居节点的深度; d_d 为目的节点的深度; d_{nd} 为最大公共父节点的深度。选择下一跳时优先

考虑传输所需跳数最小的节点。

最后,在传输跳数相同的情况下,为提升链路可靠性和避免网络冲突,需选择 LQI 值较大的节点传输。

3.3 改进算法描述

在节点加入网络的过程中邻居表随之建立。网络组建完成后,当图 1 中源节点 S 发送数据包给目的节点 D 时, MTR 算法需要 4 跳来完成,而通过邻居表只需要 1 跳即可完成。EMTR 算法在发送数据包时,当前节点 K 路径选择步骤如下:

- 1) 若 K 是目的节点,则直接接收数据包;
 - 2) 若 K 是 RFD 节点,则不维护邻居表,直接传递给父节点;
 - 3) 查找邻居表,若含有 D 则直接发送;
 - 4) 判断能量阈值,筛选可转发数据包的节点;
 - 5) 计算 K 到 D 沿树传输跳数,路径最短的为下一跳节点;
 - 6) 若传输跳数相同,将 LQI 值大的节点作为下一跳。最后,通过轮询方式选出最佳传输路径。
- 改进算法 EMTR 流程如图 2 所示。

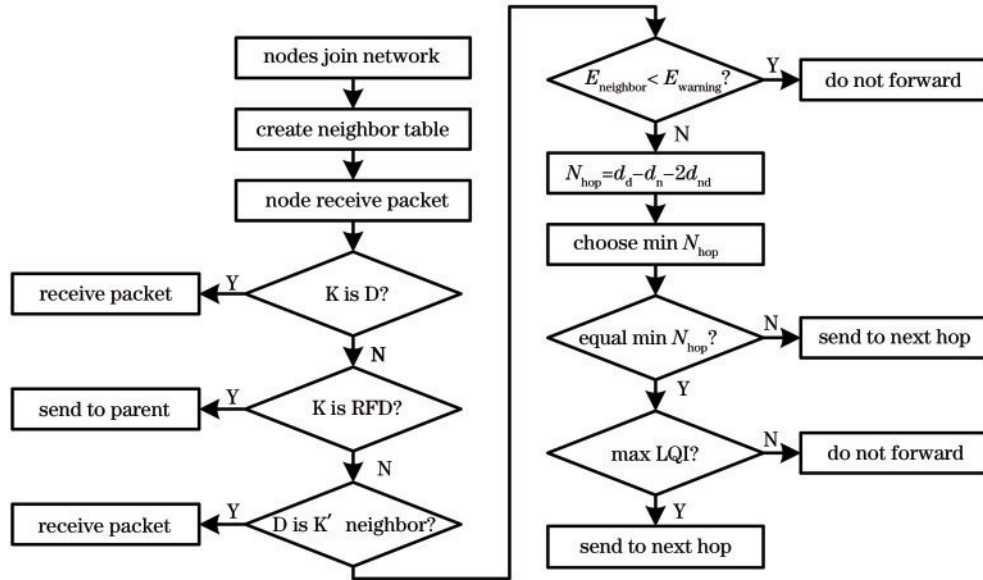


图 2 EMTR 算法流程图

Fig. 2 EMTR algorithm flowchart

4 仿真及分析

4.1 NS2.34 仿真参数设置

为验证 EMTR 优化效果,使用 NS 2.34 进行环境仿真,仿真参数设置见表 1。

表 1 仿真参数设置

Table 1 Simulation parameter setting

Simulation parameter	Value
PHY/MAC protocol	IEEE 802.15.4
Network size / (m × m)	100 × 100
Position of coordinator	Center
Number of nodes	10, 20, ..., 100
$C_m/R_m/L_m$	4/4/6
Max communication distance / m	25
Max carrier sensing range / m	30
Simulation time / s	300

协调器节点发起组建网络,其他节点搜索邻域内潜在的父节点,发送入网请求。节点成功入网后,分配短地址和树地址索引,建立邻居表。利用 IEEE 802.15.4 PHY/MAC 协议比较 MTR、EZTR (文献[12])和 EMTR 的网络性能。将节点随机分布在 100 m × 100 m 的仿真区域中,设节点间最大直接通信距离为 25 m,使用 cbrgen 产生 CBR 数据流,每秒钟发送一个数据包,数据包大小为 80 Byte,链路传输带宽为 1 Mbit·s⁻¹,仿真过程中使用 NAM 演示动画。

4.2 评价指标定义

在无线网络中,网络传输性能包括路由性能和能量开销。本文性能评价包括传输平均跳数、平均端到端延迟、分组递交率和剩余能量。

平均跳数 \bar{N}_{hop} 是每个数据包从源节点到目的节点的转发节点数量,是评价无线网络能量消耗和

传输实时性的一个重要参数,计算方式为

$$\bar{N}_{hop} = \frac{N_{MAC}}{N_{sour}}, \quad (13)$$

式中: N_{MAC} 为MAC层数据包转发数量,是网络数据包传输总跳数; N_{sour} 为源节点发送数据包数量。

分组传输率 R_{PD} 是目标节点成功接收的数据包与通过源节点发送的总数据包的比率,反映网络的链路质量,表达式为

$$R_{PD} = \frac{\sum_{i=0}^M R_i}{\sum_{j=0}^N S_j}, \quad (14)$$

式中: R_i 为*i*节点接收数据包的数量; S_j 为*j*节点发送数据包的数量。

平均网络时延 T_{delay} 是从源节点开始发送数据包到目的节点完全接收这个数据包的时间间隔,是衡量在线监测系统的实时性的重要指标,表达式为

$$T_{delay} = \frac{\sum_{i=0}^N T_r(i) - \sum_{i=1}^N T_s(i)}{M_r}, \quad (15)$$

式中: $T_r(i)$ 是接收到第*i*个数据包的时间; $T_s(i)$ 是发送第*i*个数据包的时间; M_r 为目的节点接收数据包数量。

剩余能量百分比 P_{re} 是指当前所有节点的剩余总能量与初始网络总能量的比值,是评价网络能耗、网络生存时间的重要指标,表达式为

$$P_{re} = \frac{\sum_{i=0}^N E_i}{M \cdot E_0}, \quad (16)$$

式中: E_i 为节点*i*的当前剩余能量; E_0 为每个节点的初始能量; M 为初始网络节点个数。

4.3 仿真结果及分析

随着网络节点数量的增加,无线网络结构复杂化,三种算法数据包传输平均跳数均有所增加,EMTR算法相对于MTR和EZTR算法分别减少2.37跳和0.50跳,即降低了35.8%和10.5%,如图3所示。由于MTR算法只能依靠父子关系沿树传输,随节点数量增加,跳数增加较为明显。EZTR算法使用加权算法选择下一跳,其传输跳数略高于EMTR。EMTR在邻居节点能量充足的情况下,优先考虑沿树跳数最少的节点,尽量选择最短的传输路径,因此相对于MTR跳数大幅减少。由于EMTR利用邻居表信息选择传输路径,跳数与两节点间距离密切相关,故受节点数量影响不大。

随着节点数量不断增加,网络中干扰信号增

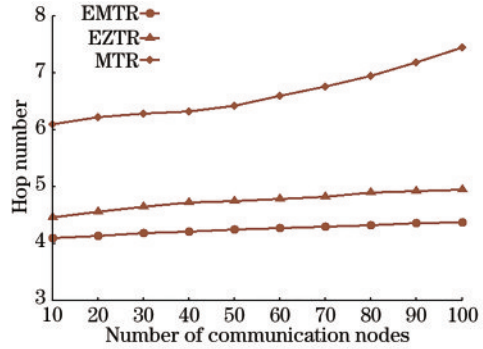


图3 平均跳数随节点数量变化图

Fig. 3 Average hop number varies with the number of nodes

加,分组递交率降低,EMTR相对于MTR和EZTR分组递交率分别提高13.6%和3.1%如图4所示。EMTR算法通过调整阈值来避免能量过低导致的节点转发数据包时造成的丢包现象,通过限制阈值更新次数来保证相同两节点间数据传输时链路的稳定性。同时,EMTR算法的传输跳数最少,降低了网络中数据包转发次数,缩短了数据包排队时间,有效降低了丢包率。最后,在跳数相同的情况下,选择LQI值较大的节点转发,既避免了网络冲突,又对链路质量提供了保障,进一步增加提高了分组递交率。

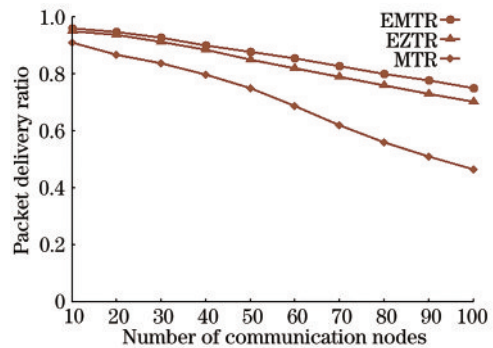


图4 分组递交率随节点数量变化图

Fig. 4 Group delivery ratio varies with the number of nodes

随着网络节点数量的增加,传输跳数增长和邻居节点数量增加导致算法执行时间延长,且平均网络时延随之增长,EMTR算法相对于MTR和EZTR算法,传输时延分别减少51.5%和21.3%,如图5所示。EMTR算法降低了源节点到目的节点跳数,能够有效缩短端到端的延时。能量不足的节点不参与邻居节点数据包的转发,以此方式减少了数据重发次数。最后考虑链路质量对数据包传输的影响,优化了传输路径,改善了网络的实时性。

当节点数量增加时,网络能耗增加。图6为网

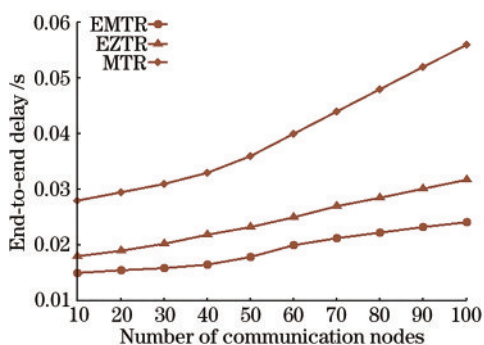


图 5 端到端时延随节点数量变化图

Fig. 5 End-to-end delay varies with the number of nodes

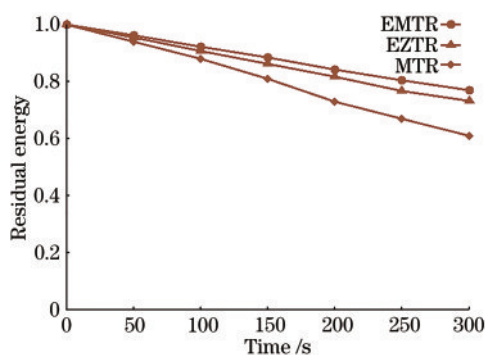


图 6 节点剩余能量随时间变化图

Fig. 6 Residual energy of nodes varies with time

网络中存在 100 个节点时,节点平均剩余能量百分比随时间的变化图。仿真结束时, MTR、EZTR、EMTR 的平均剩余能量百分比分别为 61.1%、73.3%、77.2%。因节点数量增加,邻居表内容复杂化,维护邻居表需要更多的能量,路径选择过程中算法的执行复杂度提升。EMTR 算法大幅降低了节点的转发跳数,减少了能量消耗,并通过阈值均衡网络能量,尽量避免复杂计算,总体上节省了网络能量。由于 msstatePAN 功能简单,相对其他 ZigBee 协议也可以节省一部分能量。

5 结 论

本文提出一种利用单跳之内的邻居表信息改进 msstatePAN 协议栈路由路径的算法。利用邻居表信息和 MTR 算法的父子关系,选出源节点到目的节点跳数最少的路径,同时兼顾节点剩余能量和 LQI 值对数据包传输的影响,通过对节点剩余能量的感知,避免低能量节点过度转发数据包,并选择相同情况下数据链路状态较好的路径。NS2 的仿真结果表明,改进算法性能优于 MTR 和 EZTR 算法,既保留了 msstatePAN 协议栈原有的无路由表开销和网络自恢复能力,又有效减少了网络中传输

跳数,降低了能量消耗,减少了端到端时延,增加了数据包传输成功率,提高了网络实时性和可靠性。

参 考 文 献

- [1] Shi J, Xu D G, Yan D X, et al. Liquid refractive index wireless sensor network based on long period fiber grating and ZigBee[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(3): 030602.
石嘉, 徐德刚, 严德贤, 等. 基于长周期光纤光栅和 ZigBee 组网技术的无线溶液折射率传感网络[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(3): 030602.
- [2] Reese R. A ZigBee-subset/IEEE 802.15.4 multi-platform protocol stack [EB/OL]. (2007-03-05) [2020-06-20]. <http://www.ece.msstate.edu/~reese>.
- [3] Chu H T. Research and design of monitoring system based on msstatePAN protocol stack[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2010: 12-17.
褚洪涛. 基于 msstatePAN 协议栈的监控系统的设计与研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2010: 12-17.
- [4] Song L, Wang G H, Hua S L. Design of local communication system based on ZigBee technology [J]. Electronic Design Engineering, 2017, 25(20): 97-100, 104.
宋璐, 汪贵华, 华斯亮. 基于 ZigBee 技术的局域通讯系统设计[J]. 电子设计工程, 2017, 25(20): 97-100, 104.
- [5] Li M, Xu G S, Zhu Y J, et al. Implementation of lightweight selection cooperation in IEEE 802.15.4 wireless networks using open-source protocol stack and cheap radios [C]// 2016 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC), October 19-21, 2016, Jeju, South Korea. New York: IEEE Press, 2016: 703-707.
- [6] Prakasi O S G, Varalakshmi P. Decision tree based routing protocol (DTRP) for reliable path in MANET [J]. Wireless Personal Communications, 2019, 109(1): 257-270.
- [7] Bai L Q, Wang Y T. Two-hop neighbor table tree routing algorithm for ZigBee networks [C]// 2015 12th International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD), August 15-17, 2015, Zhangjiajie, China. New York: IEEE Press, 2015: 2220-2224.
- [8] Liu Y, Qian K Y. A novel tree-based routing protocol in ZigBee wireless networks [C]// 2016 8th IEEE International Conference on Communication Software and Networks (ICCSN), June 4-6, 2016,

- Beijing, China. New York: IEEE Press, 2016: 469-473.
- [9] Qiu W Z, Skafidas E, Hao P. Enhanced tree routing for wireless sensor networks[J]. *Ad Hoc Networks*, 2009, 7(3): 638-650.
- [10] Kim T, Kim S H, Yang J, et al. Neighbor table based shortcut tree routing in ZigBee wireless networks [J]. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2014, 25(3): 706-716.
- [11] Teng Z J, Zhang M R, Zhang L, et al. Energy-aware tree routing optimization algorithm for ZigBee networks: a cognitive perspective[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2016, 48(11): 109-115.
滕志军, 张明儒, 张力, 等. 认知视角下能量感知的 ZigBee 网络树型路由优化算法[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2016, 48(11): 109-115.
- [12] Chang Y J, Zhang W Y, Li G X. An improved comprehensive weighted routing algorithm based on neighbor tree routing of ZigBee [J]. *Computer & Digital Engineering*, 2018, 46(3): 528-532.
常赞杰, 张位勇, 李桂香. 一种基于邻居表的 ZigBee 树路由综合加权改进算法[J]. *计算机与数字工程*, 2018, 46(3): 528-532.
- [13] Qian Z H, Zhu S, Wang X. An cluster-based ZigBee routing algorithm for network energy optimization [J]. *Chinese Journal of Computers*, 2013, 36(3): 485-493.
钱志鸿, 朱爽, 王雪. 基于分簇机制的 ZigBee 混合路由能量优化算法[J]. *计算机学报*, 2013, 36(3): 485-493.
- [14] Huang Y K, Pang A C, Hsiu P C, et al. Distributed throughput optimization for ZigBee cluster-tree networks [J]. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2012, 23(3): 513-520.
- [15] Kong Y H, Li P Y, Chen Z X, et al. Application of msstatePAN based wireless ad-hoc network in substation grounding wire monitoring system [J]. *Electric Power Information and Communication Technology*, 2016, 14(4): 84-90.
孔英会, 李佩玉, 陈智雄, 等. MsstatePAN 无线自组网在变电站接地线监控系统中的应用[J]. *电力信息与通信技术*, 2016, 14(4): 84-90.
- [16] Yang G S, Wang Z J, Wu C X, et al. One-hop expansion ETR protocol for wireless sensor networks [J]. *Journal of Convergence Information Technology*, 2012, 7(11): 169-178.
- [17] Kim T, Kim D, Park N, et al. Shortcut tree routing in ZigBee networks [C]// 2007 2nd International Symposium on Wireless Pervasive Computing, February 5-7, 2007, San Juan, Puerto Rico. New York: IEEE Press, 2007: 9529865.
- [18] Khatiri A, Mirjalily G, Khademzadeh A. Energy-efficient shortcut tree routing in ZigBee networks [C]// 2012 Fourth International Conference on Computational Intelligence, Communication Systems and Networks, July 24-26, 2012, Phuket, Thailand. New York: IEEE Press, 2012: 117-122.