



## 油田监测系统的 ZigBee 路由算法节能优化

李纪扣, 高 凯

(天津科技大学计算机科学与信息工程学院, 天津 300222)

**摘 要:** 根据油田监测网络的部署特点, 对 ZigBee 路由算法进行节能优化. 给出了节能优化算法的实现方法, 不但考虑路径的长度, 还充分考虑节点剩余能量, 减少网络瓶颈节点. 采用 NS-2 软件进行仿真分析, 仿真表明, 优化算法可以延长网络生存期.

**关键词:** ZigBee; 节能; 路由算法优化; 油田监测系统

**中图分类号:** TP393      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1672-6510(2011)04-0065-05

### An Energy-Saving Optimization for ZigBee Routing Protocol in Oil Filed Detection Systems

LI Ji-kou, GAO Kai

(College of Computer Science and Information Engineering, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300222, China)

**Abstract:** According to features of oil field detection network, an energy-saving optimization routing algorithm based on ZigBee routing algorithm was proposed. Path length, residual energy of node and reduction in network bottlenecks nodes were all considered in the optimization algorithm. The results of NS-2 simulation show that the optimization algorithm can extend the network lifetime.

**Keywords:** ZigBee; energy-saving; optimized routing algorithm; oil field detection system

ZigBee 技术是一种新兴的针对于无线传感器网络的短距离通信技术, 具有功耗低、成本低、工作频段灵活等特点, 因此该技术为无线传感器网络最具潜力的应用技术之一, 具有广阔的应用前景<sup>[1]</sup>.

ZigBee 技术支持路由功能, 采用了 Cluster-Tree 与 AODVjr(AODV junior)相结合的路由算法, 即 ZigBee 路由(简称 ZBR)算法. AODVjr<sup>[2]</sup>是对按需距离矢量路由(ad-hoc on-demand distance vector routing, 简称 AODV<sup>[3]</sup>)的简化, 具有 AODV 的主要功能. 因为传感器供电方式为电池供电, 电池的更换不易操作, 所以保证电池的长时间供电对于油田监测系统有着重要意义.

现在路由算法的节能优化研究主要有两种思路: 选择总能耗最少的路径或均衡网络的能量消耗. MTPR<sup>[4]</sup>(minimum total transmission power routing)是

第一种思路的典型代表. 假设网络的源节点与目的节点距离较远, 路径上的节点接收能耗相比发送能耗可以被忽略, 只考虑节点发送数据包时消耗的能量. 当节点具有相同的硬件配置时, 跳数最少的路径即是总能耗最少的最优路由. 但是在油田监测网络中, 节点分布较为密集, 接收能耗是不可以被忽略的, 所以 MTPR 不适用于油田监测网络. MBCR<sup>[5]</sup>(minimum battery cost routing)是第二种思路的典型代表. 选路时优选剩余能量多的节点, 保证路径的能量充足, 减少对剩余能量少的节点的使用, 减少节点能量耗尽引起网络分割的发生. 但是 MBCR 不能确保由剩余能量多的节点组成的路径跳数尽量小. 数据传输的时延增加会给油田监测系统的性能表现带来较大影响. 因此, 综合考虑跳数和剩余能量, 拟在 ZBR 算法的基础上针对油田监测系统进行节能优化.

### 1 ZigBee网络和路由算法

#### 1.1 ZigBee网络

ZigBee 网络节点包括 ZC(ZigBee coordinator node, 即 ZigBee 协调器)、ZR(ZigBee routing node, 即 ZigBee 路由器)和 ZED(ZigBee terminal node, 即 ZigBee 终端)三种类型. 其中,ZC 和 ZR 属于全功能设备(FFD), 提供完整的 IEEE 802.15.4 MAC 服务, 可作为任何 ZigBee 设备;而 ZED 属于精简功能设备(RFD), 只提供部分 IEEE 802.15.4 MAC 服务, 仅能作为终端设备. ZigBee 有星形、树形和网状三种拓扑类型, 如图 1 所示.

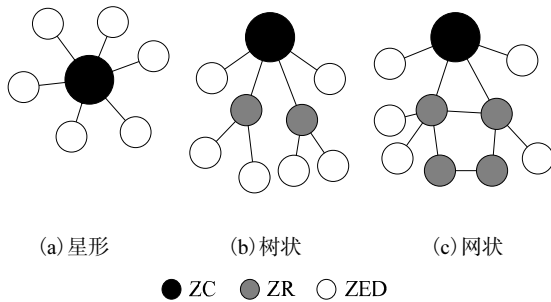


图 1 ZigBee 网络的拓扑类型  
Fig.1 ZigBee network topology type

(1) 星形拓扑: 以协调器为中心, 网络进行通信和扩展, 节点间的数据传输需要通过协调器.

(2) 树形拓扑: 由单个协调器和多个虚拟星型的网络组成. 在虚拟星型的网络中, FFD 担当协调器, 在整个网络中担当路由器.

(3) 网状拓扑: 与树形网络相似, 在 ZR 之间增加了通信连接. 其路由可自动建立和维护, 且具有强大的自组织、自愈能力.

根据文献[6]的网络架构, 结合油田监测系统的实际网络部署, ZigBee 网络拓扑结构为树形拓扑. 大量 ZigBee 节点 RFD 将采集的数据发送给中继 FFD(即 ZR), 然后汇聚到主节点 FFD(即 ZC), 通过 GPRS 通信链路发送数据到远端的主控制室.

#### 1.2 路由算法

路由方式根据网络的拓扑类型不同而不同. 静态路由协议常应用于星形和树形网络拓扑类型, 而动态路由协议则应用于网状拓扑类型. 其中, 树形拓扑类型的典型路由算法是 Cluster-Tree, 而网状拓扑类型的典型路由算法是 AODV 和 AODVjr 等.

ZBR 同时具有 Cluster-Tree 和 AODVjr 的优点, 简化路由算法的同时, 提高了路由效率, 均衡了网络流量, 而且降低了分组传输延时. 当一个节点接收到数据分组后, 根据自身是否具有路由功能来执行相关动作. 如果具有路由功能, 则使用 AODVjr 算法去主动发现路由, 即该节点不按照父子关系转发数据, 而是转发到其通信范围内的其他 ZR, 寻找通往目的节点的最佳路由; 如果节点不具备路由功能, 需按照 Cluster-Tree 转发数据包和控制包.

ZigBee 网络中选择最优路由的标准是通过累积计算路径的开销(数据包数), 最小开销值的路径就是最优的. 如果路径  $P$  长度为  $L$ , 则累积开销为

$$C(P) = \sum_{i=1}^{L-1} C\{D_i, D_{i+1}\} \tag{1}$$

其中,  $C\{D_i, D_{i+1}\}$  为路径  $P$  上从  $D_i$  到  $D_{i+1}$  链路的开销, 计算方法为

$$C\{D_i, D_{i+1}\} = \begin{cases} 7 \\ \min\left(7, \text{round}\left(\frac{1}{\rho_i^4}\right)\right) \end{cases} \tag{2}$$

根据 ZigBee 规定, 式(2)中  $\rho_i$  通过 LQI(link quality indication, 链路质量指示)计算而来, 其大小由 MAC(media access control)层根据信号强度和信噪比计算并提供给上层. round 函数表示四舍六入五取偶.

网络中有 11 个 ZigBee 节点, 根据 ZBR 路由算法, 源节点 8 到目的节点 0(协调器)的数据包转发路径如图 2 所示. 假设每个节点初始能量为 15 J, 收发功率为固定值, 源节点到目的节点的路径总是  $8 \rightarrow 4 \rightarrow 1 \rightarrow 0$ . 因为 ZBR 算法总是选择跳数最小, 且源节点选择 RREQ(route request, 路由请求)最快回复的节点为下一跳, 所以源到目的的路径不会改变, 直到路径上有节点离开网络.

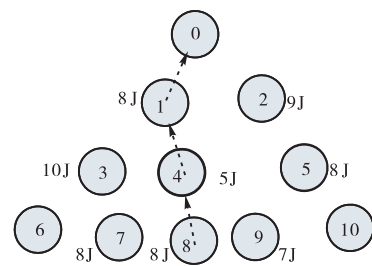


图 2 ZBR 选路  
Fig.2 ZigBee routing

## 2 算法优化和实现

### 2.1 算法优化

考虑到 ZigBee 网络需要在无人环境的油田长期有效地工作, 需要对路由算法进行能量方面的优化. 虽然式(2)中的开销值反映了链路的情况, 但是没有反映出节点的生存状态和网络的能量消耗. 结果就是网络中存在不少“热点”, 几乎许多选路都包含该节点, 导致节点死亡速度相比其他节点快, 网络频繁出现控制分组的泛洪. 因此, 对路由算法进行节能优化(即 ZBR<sup>+</sup>算法), 充分考虑节点电池的剩余能量, 以决定最优路由的选择.

为便于算法描述, 给出如下定义:

(1)  $E_0(i)$  表示节点  $N_i$  加入网络时电池的初始能量. 节点  $N_i$  的剩余能量用  $E_r(i)$  表示.

(2) 每一个节点  $N_i$  监测自身的能量消耗, 引发能量消耗的行为有发送、接收和侦听. 估计接下来  $\Delta T$  时间内的能量消耗, 用  $E_i(\Delta T_j)$  表示:

$$E_i(\Delta T_j) = \alpha \times E_i(\Delta T_{j-1}) + (1 - \alpha) \times E'_i(\Delta T_j) \quad (3)$$

式中:  $j \in \{0, 1, 2, \dots\}$ ;  $0 < \alpha < 1$ ;  $E_i(\Delta T_{j-1})$  和  $E'_i(\Delta T_j)$  分别为之前估算值和最新能量消耗值,  $E'_i(\Delta T_j)$  初值为  $E_0(i) - E_r(i)$ . 为了使最新的能量消耗更优先被考虑, 所以  $\alpha$  取值为 0.3, 使其占有更大的比重.

节点电池  $N_i$  在  $j \times \Delta T$  时刻的开销根据式(4)计算.

$$C_i = \log_2 \left( \frac{E_r(i)}{E_i(\Delta T_j)} \right) \quad (4)$$

式中,  $\frac{E_r(i)}{E_i(\Delta T_j)}$  表示节点的生命周期  $N$ . 式(4)可简化

为  $C_i = \log_2 N$ , 因此  $N = 2^{C_i}$ , 即  $C_i$  越大, 节点的工作时间越长.

(3) 假设  $L = \{L_i | i = 1, 2, \dots, m\}$  为源节点  $N_s$  到目的节点  $N_d$  之间所有可能路径的集合. 对于一条路径, 其权重值可以通过式(5)计算.

$$W(L_i) = \omega_1 \frac{C(L_i) - \bar{C}}{\bar{C}} + \omega_2 \frac{\bar{E}_i - E_i(L_i)}{\bar{E}_i} \quad (5)$$

式中:  $0 < \omega < 1$  且  $\omega_1 + \omega_2 = 1$ ;  $C(L_i)$  和  $E_i(L_i)$  分别表示某条路径的开销和在该路径传输所需的总能量. 为了使路径的生存时间达到最长, 选择路径的平均节点开销和平均总能量作为比较对象, 某条路径开销  $C(L_i)$  比平均值越大,  $E_i(L_i)$  比平均值越小, 其成

为最优路由的可能越大.

开销平均值和总能量平均值的计算公式分别为

$$\bar{C} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m C(L_i)$$

$$\bar{E}_i = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m E_i(L_i)$$

因为节点收发电路消耗的能量是一定值, 而距离的长短影响节点发送端放大电路的能量消耗, 所以通过跳数的累加可以计算出路径消耗的总能量.

在优化算法中, 式(5)取代式(1)成为新的开销函数, 优选数值大的. 剩余能量越大, 跳数越小, 则  $W(L_i)$  也就越大.

### 2.2 算法实现

首先, 为了保证式(3)和(4)可以计算出  $\Delta T$  时间后的  $C_i$  和  $E(\Delta T)$  的值, 所有节点必须存储  $C_i$ 、 $E(\Delta T)$  和最终的剩余能量  $E_r$  3 个变量值. 而  $\bar{E}_i(\Delta T_j)$  是通过  $E_r - E_r$  计算的.

其次, 在 RREQ 分组中增加路径开销和跳数两个字段, 用于分别存储和累加路径的开销和跳数.

最后, 根据 EA-AODV (energy-aware AODV) 对节点剩余能量的划分机制, 划分出 3 个不同的级别: 正常等级(节点剩余能量大于其初始能量的 20%)、警告等级(剩余能量是初始能量的 10% ~ 20%) 和危险等级(剩余能量小于初始能量的 10%). 优化算法引入“警告等级”的概念, 减少低能量节点被频繁使用的可能性. 节点判断自身能量水平为该等级及以下时, 不参与选路过程.

在图 2 的场景中, 根据优化路由算法 ZBR<sup>+</sup>, 源节点 8 到目的节点 0 的数据包转发路径如图 3 所示. ZBR<sup>+</sup>算法根据式(5)计算选路开销, 使源节点到目的节点的路径改为 8→7→3→1→0, 避开了能量低的节点 4.

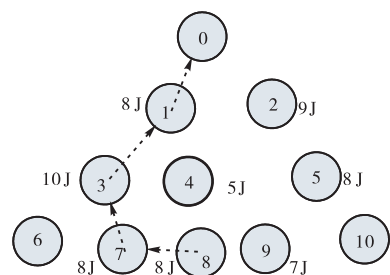


图 3 ZBR<sup>+</sup>选路

Fig.3 ZBR<sup>+</sup> routing

### 3 算法仿真

由真实的网络部署得到仿真拓扑为树形,使用 NS-2.29 进行仿真,仿真场景如图 4 所示. 因为油田监测系统的节点部署后不会移动,所以仿真中节点均静止不动,能耗模型使用一阶无线电模型,不考虑节点移动所消耗能量. 无线电传播模型采用两路传播模型(two ray ground),数据流类型为 CBR(constants bit rate),在 50 m×50 m 的仿真场景中,所有节点均为 FFD,芯片采用 TI 公司的无线网络芯片 CC2430<sup>[7]</sup>. 为了加快仿真速度,设置节点的收发功率为 CC2430 的 10 倍. 仿真时间为 1 000 s. 具体参数见表 1.

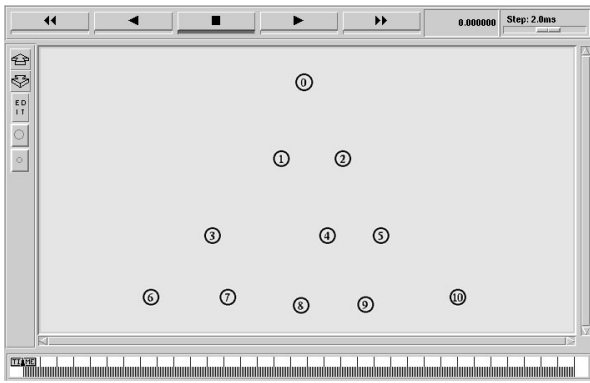


图 4 仿真场景

Fig.4 Simulation scenario

表 1 NS 仿真参数

Tab.1 NS simulation parameters

仿真参数	设定值
CBR 个数	16
邻居节点距离/m	10
数据包大小/Byte	70
节点初始能量/J	160
节点发送功率/W	0.81
节点接收功率/W	0.36
$\Delta T/s$	10
$\omega_1, \omega_2$	0.5

从发包成功率、控制开销和节点剩余能量 3 个方面对比 ZBR 和优化算法. 发包成功率比较见图 5. 可以看出,随着 CBR 个数超过 14,优化算法比 ZBR 发包成功率低的可能性会增大. 因为优化算法选路主要考虑节点的能量,会绕开低能量的节点,出现长路径更优的可能. 跳数增加导致数据包发送成功率降

低. 但是优化算法发包成功率还是维持在 99%以上,说明优化方案并没有对发包成功率产生显著影响.

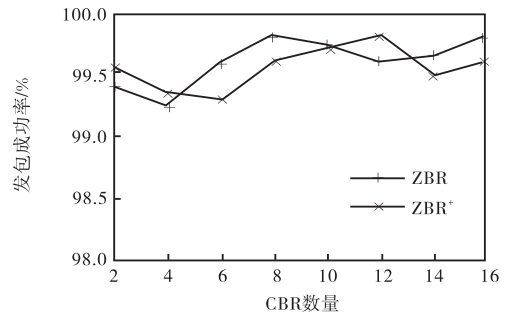


图 5 发包成功率比较

Fig.5 Comparison of packet delivery ratio

控制开销比较如图 6 所示. 可以看出,优化算法的控制开销始终小于 ZBR 算法的控制开销. 这是因为网络能量消耗的均衡化,减少了网络节点迅速死亡的可能性,从而保证了网络的持续收敛,减少了网络中控制分组的泛洪.

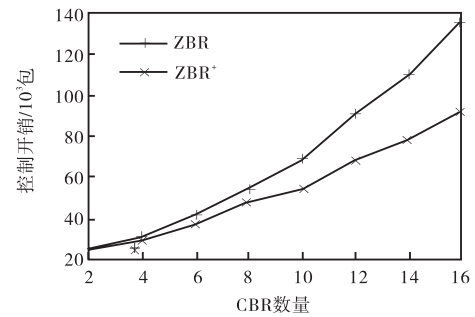


图 6 控制开销比较

Fig.6 Comparison of routing overhead

节点能量剩余比较如图 7 所示. 可以看出,两种算法仿真 1 000 s 后的节点剩余能量差距较为明显,而且优化算法各节点能量之间的差距较小,网络整体能量消耗比较平衡,没有出现 ZBR 算法仿真中的“热点”问题,从而延长了网络的生存时间.

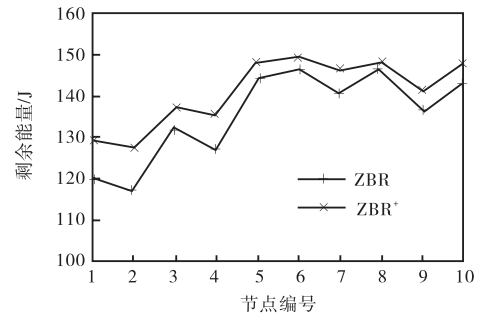


图 7 节点能量剩余比较

Fig.7 Comparison of node remaining energy

## 4 结 语

由于节点是油田监测系统实现和数据采集的关键,所以根据油田中的网络部署特点,在 ZBR 算法的基础上,充分考虑节点电池的剩余能量,提出了优化算法,并进行仿真.从仿真结果可以看出,优化算法保证网络性能的同时,降低了网络中的控制开销,减少了能量过低的节点出现,起到了均衡网络节点能量消耗的目的,延长了网络寿命.

### 参考文献:

- [1] 郦亮. IEEE 802.15.4 标准及其应用[J]. 电子设计应用, 2003(1): 14-16, 22.
- [2] Ian D Chakeres, Luke Klein-Berndt. AODVjr, AODV simplified[J]. Mobile Computing and Communications Review, 2002, 6(3): 100-101.
- [3] Perkins C E, Royer E M. Ad-hoc on-demand distance vector routing[C]//Proceedings of 2nd IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications. Piscataway: IEEE, 1999: 99-109.
- [4] Rodoplu V, Meng T H. Minimum energy mobile wireless networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1999, 17(8): 1333-1344.
- [5] Toh C K. Maximum battery life routing to support ubiquitous mobile computing in wireless ad hoc networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2001, 39(6): 138-147.
- [6] 冯潇,刘秋丽. ZigBee 在油田远程监控系统中的应用[J]. 石油仪器, 2006, 20(5): 68-70.
- [7] 李纪扣,王钢. 基于 ZigBee 技术的油井参数采集系统模块的设计[J]. 微计算机应用, 2009, 30(9): 70-74.
- [4] 谢存禧. 基于人口老龄化的智能化健康护理、监控装备的研发[J]. 电机工程技术, 2010, 39(11): 86-89.
- [5] 赵玉晓,徐志玲,唐川,等. 医院患者无线监控系统的软件设计[J]. 实验室科学, 2011, 14(1): 100-102, 106.
- [6] 张自明. 基于 WinCE 的嵌入式平台的研究与实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2007.
- [7] 张毅,王学思. 基于 WinCE 的流接口驱动程序开发[J]. 工业控制计算机, 2008, 21(6): 47-48.
- [8] 汪兵. Windows CE 嵌入式高级编程及其实例详解[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008: 114-129.

---

(上接第 64 页)