# 基于全网能量均衡的 WirelessHART 图路由算法\*

张 盛<sup>1</sup>, 鄢 傲<sup>2†</sup>, 向忠胜<sup>2</sup>, 张国勇<sup>2</sup>, 马天鸣<sup>1</sup> (1. 清华大学 深圳研究生院, 深圳 518055; 2. 清华大学 电子工程系, 北京 100084)

摘 要:如何均衡使用网络节点能量并生成高可靠路由是 WirelessHART 网络研究的一个难题,为此提出了一种 GRAEB(graph routing algorithm based on energy balancing)图路由算法。首先,网络被初始化为连通的图结构, 能够提高丰富的冗余路径。网络管理器根据全网节点剩余能量、通信周期、链路分布等因子生成节点鲁棒系数 矩阵,节点通过比较邻居的鲁棒系数来选择最优路径。另外,规定了邻居节点数的上限阈值,每次路由更新只保 留鲁棒系数最优的邻居。仿真结果表明 GRAEB 不仅提高了网络可靠性,而且延长了网络寿命。 关键词:WirelessHART;图路由;能量均衡;GRAEB 算法;鲁棒系数 中图分类号:TN925+.1 文献标志码:A 文章编号:1001-3695(2014)05-1520-04 doi;10.3969/j.issn.1001-3695.2014.05.057

## Energy aware graph routing algorithm for WirelessHART

ZHANG Sheng<sup>1</sup>, YAN Ao<sup>2†</sup>, XIANG Zhong-sheng<sup>2</sup>, ZHANG Guo-yong<sup>2</sup>, MA Tian-ming<sup>1</sup>

(1. Graduate School at Shenzhen, Tsinghua University, Shenzhen 518055, China; 2. Dept. of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: In WirelessHART network, how to balance the energy consumption while ensuring its reliability is of great challenge. This paper proposed GRAEB algorithm for WirelessHART. First of all, it established the network topology based on graph and it could provide rich redundant paths. The network manager, according to the matrix parameters of the remaining energy, communication cycle and link distribution, created a robust coefficient matrix for nodes to choose the best next hop. Furthermore, the algorithm set an upper threshold to the number of neighbors for each node and only kept the neighbors with higher robust coefficient. The simulation results show that GRAEB not only improves the network reliability, but also prolongs the network lifetime.

Key words: WirelessHART; graph routing; energy-balancing; GRAEB algorithm; robust coefficient

#### 0 引言

WirelessHART 是 HART 基金会于 2007 年推出的专门应 用于工业进程控制、设备健康监测、资产维护等领域的无线 Mesh 网络通信协议<sup>[1,2]</sup>。传输高可靠性和能量有限性是 WirelessHART 网络的重大难题,合理地均衡使用全网能量是 其能工业化的必要举措。现有的路由选择算法大多都不能同 时兼有可靠性和长生命周期,很难直接运用于 WirelessHART 网络。因此,有必要针对 WirelessHART 网络的独特图结构设 计简单的路由算法,在保障网络可靠性的同时,极大地延长网 络寿命。

到目前为止,研究者已经相继提出了很多节能路由协议。 文献[3]通过寻找单路径最小能量损耗的路径来进行数据传 输,但随着通信频次的增加,此条路径能量将迅速耗散殆尽,网 络将分解为多个不连通的子网络。文献[4]提出的方法也是 选择一条固定的路径传输,不适应WirelessHART工业无线组 网的要求。文献[5]提出了一种分布式处理的路由算法,只能 保证局部能量均衡。在文献[6]提出的MCP-PS 算法中,节点 可以动态地自主选择下一跳,而不采用固定的路径,算法不能 保证高可靠性。文献[7]提出了一种最短路径剩余能量选择 图路由算法 ELHFR,但是没有考虑网络的能量均衡。文献[8] 通过节点剩余能量来作为节点选择下一跳的度量,显然忽略了 节点的通信负载。文献[9]提出的能量均衡的路由算法 ME-BRS 能够保证网络的能量均衡,但是该算法所依附的路由结构 不能保证最短路径,且算法的复杂度较大。因此,如何保证网 络的高健壮性以及最优的能量平衡是 WirelessHART 研究的最 大难题。

针对上述情况,本文提出了一种基于全网能量均衡的图路 由算法(GRAEB),算法同时考虑节点通信负载、链路连接和剩 余能量,使网络节点的能量达到了最好的均衡,延长了网络 寿命。

#### 1 GRAEB 算法过程

#### 1.1 拓扑建立算法

初始化网络管理器,建立并初始化网关 GW(gateway),设置 GW 的度为0。假设所有节点的通信半径都是 r,那么 GW 方圆 r 范围内的所有节点就会请求加入网络。接着,网络管理器会为这些新节点分配唯一的地址,并且在节点属性中记录它

收稿日期: 2013-07-08; 修回日期: 2013-08-29 基金项目: 国家科技重大专项基金资助项目(2011ZX03004-001-01)

作者简介:张盛(1975-),男,重庆人,副教授,硕导,博士,主要研究方向为 SOC 芯片设计、无线传感器网络等;鄢傲(1990-),男(通信作者), 湖北天门人,硕士,主要研究方向为 WirelessHART 无线传感网协议栈设计及算法优化(yanao4544323@126.com);向忠胜(1989-),男,江苏扬州人, 硕士,主要研究方向为 WirelessHART 的系统级仿真.

的度为1,同样地,度为1的这些节点就会接收度为2的子节 点加入网络,成为其子节点;此外,度为2的子节点会将刚才连 接的度为1的父节点写入邻居路由表。以此类推,直到所有的 节点遍历一次,形成初始的图路由结构。拓扑建立的过程如图 1所示。



图1 图拓扑建立算法

初始拓扑结构生成遵循以下几个重要原则:

a)度相同的节点称为兄弟节点,它们之间不建立链路连接,这也是出于最短路径的考虑<sup>[10]</sup>。

b)每个节点在初始化过程中都必须有链路连接,每个节 点的初始邻居数不受限制。

c) 在初始的通信中, 节点将剩余能量以及通信周期和邻 居表逐跳发送给网关。此时, 路由的选择根据节点剩余能量 判定。

假设一个 8 节点的 WirelessHART 网络,根据以上拓扑建 立过程得到的初始网络拓扑结构如图 2 所示,节点 0 为网关节 点,设其度为 0。节点 1、2 和 3 处于节点 0 的通信半径内,因此 它们将与网关建立连接,且被网络管理器分配地址和度,设置 它们的度为 1。节点 4 和 5 分别又将与节点 1、2 和 3 建立连 接,因此它们的度为 3;以此类推,直到所有的节点均建立链路 连接且拥有自己的度,则网络拓扑生成过程完毕。



#### 1.2 节点鲁棒系数计算

1.2.1 相关参数说明及分析

1)节点链路矩阵  $S_{N \times L}$   $S_{N \times L}$  是所有节点链路的矩阵表 示形式。其中 N 表示节点的总数,列向量代表了被严格标记 过的每个节点;L 表示所有的链路数,行向量代表了被严格标 记过的每条链路。 $S_{N \times L}$ 中任意一个元素  $S_{ij}(i < N, j < L)$ 表 示第 i 个节点与第 j 条链路的连接情况,  $W_{ij}$  = 1 则有连接,反之 无连接<sup>[9]</sup>。

2)节点剩余能量矩阵  $W_{N \times 1}$   $W_{N \times 1}$  是所有节点剩余能量的集合。

3)节点通信周期矩阵  $P_{N\times 1}$  节点定期向网络管理器发送 自己的通信周期,  $P_{N\times 1}$  则是所有节点通信周期的集合。 $P_{N\times 1}$  中任意一个元素 *P*<sub>a</sub>(*i* < *N*)表示第 *i* 个节点平均的通信时间间隔。

4)节点通信频率矩阵  $F_{N\times 1}$  节点通信频率反映了节点的 负荷量。 $F_{N\times 1}$ 中的任意一个元素  $F_{a1}$  (i < N)指的是每个节点 每秒钟的通信次数。 $F_{N\times 1}$ 可以根据节点通信周期矩阵  $P_{N\times 1}$ 得 到,其中

 $F_{i1} = \frac{1}{P_{i1}} \tag{1}$ 

5)链路通信频率指数矩阵  $T_{L\times1}$   $T_{L\times1}$ 反映了每条链路的 使用频率。频率越高,则负载越大,耗能越快;频率越低,则负 载较小,耗能较慢。由于链路通信频率与链路两端节点有关, 且其与节点选择密切相关,合理的估计链路通信频率显得尤为 重要。这里,采取几何距离法:设链路 l 两端的节点分别为 p和 q,则它们的通信频率为  $F_{p\times1}$ 和  $F_{q\times1}$ ,链路 l 的通信频率指数  $T_{L\times1}(l < L)$  估算如下:

$$T_{l1} = \sqrt{F_{p1}^2 + F_{q1}^2} \tag{2}$$

6)节点耗能因子矩阵  $B_{N\times 1}$   $B_{N\times 1}$ 是对节点单位时间内相 对耗能的评估。其中的任意一个元素  $B_{11}(l < N)$ 表示节点 *i* 的 耗能效率。

7)节点鲁棒系数矩阵  $R_{N\times 1}$   $R_{N\times 1}$ 同时考虑了节点的耗能 效率和剩余能量值,是节点鲁棒性的综合体现。

1.2.2 鲁棒系数矩阵 R<sub>N×1</sub>算法

通过周期性地收集节点的剩余能量、通信周期、路由表中 的邻居信息等,网络管理器能够迅速计算出各个节点的节点鲁 棒系数,并且将其广播给所有的子节点。网络管理器分析计算 *R*<sub>N×1</sub>的步骤如下所示:

a)通过式(1)计算出节点通信频率矩阵  $F_{N \times 1}$ 。

b)通过式(2)得到链路通信频率指数矩阵  $T_{L\times 1}$ 。

c)将节点链路矩阵  $S_{N\times L}$ 与式(2)中得到的  $T_{L\times 1}$ 相乘,得 到了节点耗能因子矩阵  $B_{N\times 1}$ ,计算式如下:

$$\boldsymbol{B}_{N\times 1} = \boldsymbol{S}_{N\times L} \cdot \boldsymbol{T}_{L\times 1} \tag{3}$$

d)节点鲁棒系数矩阵  $R_{N\times 1}$ 中的任意一个元素可由以下算 式得到

$$R_{i1} = \frac{W_{i1}}{B_{i1}}$$
(4)

#### 1.3 拓扑更新及路由选择算法

为了保证网络性能稳定,网络管理器需要周期性地更新路 由及拓扑结构。中间节点则通过比较邻居节点的鲁棒系数,剔 除性能较差的邻居,保留或者增加较优秀的节点作为新的邻居 节点(邻居节点数设定最大阈值 N<sub>max</sub>)。

网络中节点编号依次向下,首先从编号最大的节点开始,如果节点邻居个数大于阈值 N<sub>max</sub>,则通过比较邻居的鲁棒系数 择优选取 N<sub>max</sub>个邻居,剔除其余的节点;反之,则转移到下一个 节点,继续上述过程。算法的流程如图 3 所示。



选取图 2 的网络进行研究,选取 N<sub>max</sub> = 2,网络拓扑结构更 新如图 4 所示。具体过程如下,节点 4 的邻居节点分别为 1、2 和 3,通过上述算法对比这些邻居节点的鲁棒系数,假设 1、2 的鲁棒系数较优,则节点 4 将把节点 3 从它的邻居表中剔除。 同样地,节点 5 也将节点 1 从其邻居表中剔除,完成了全网的 拓扑更新。



图 4 初始网络拓扑结构

拓扑更新完成后,假设任意节点j需要寻找到达网关的最 优路径。该节点会检查自己路由表中存储的邻居节点的鲁棒 系数信息,并对比选择鲁棒系数最优的节点作为下一跳地址, 依此类推,直到到达网关。路由选择的过程如图5所示。



#### 2 GRAEB 算法性能分析

GRAEB 图路由采取了改进的 BFS(广度优先搜索)算法, 提供了跳间冗余,保证了高可靠性。而本文图拓扑建立机制删 除了兄弟节点之间的链路连接,能够保证每个节点到达网关的 跳数最短,缩短延时,此是其一。本文算法不仅能够实现最小 跳数,还能实现路由质量的筛选。

传统的拓扑构建算法以度分层,仅仅考虑了最大限度的网络拓扑生成,忽略了邻居节点的可靠性,而且带来路径选择的困境<sup>[10]</sup>。GRAEB图路由则对邻居节点的数量进行了限制,源节点通过比较下一跳节点的鲁棒系数,剔除性能较差的邻居节点,保留或者增加较优秀的节点作为邻居节点,并且设定了邻居上限。该机制不仅精简了路由表大小,而且最大限度地保证了全网能量均衡。

对于能量均衡的改善,相对于剩余能量选择算法ELHFR<sup>[7]</sup>, 本路由选择机制兼顾了全网剩余能量和节点通信负载。根据 此机制,健壮性较优的节点被优先选择,且避免了最优秀节点 频繁被选择,保证了全网能量的均衡,延长了网络寿命,这对于 WirelessHART工业无线传感器网络而言,具有非凡的意义。

除此之外,WirelessHART 网络在执行工业高可靠任务时 也能取得很好的效果。为了证明本文图路由算法的高可靠性, 首先定义几个参数:*P*。指的是由于噪声(主要指高斯白噪声) 的引入导致的正常信号错误接收和由于媒体介入冲突或者各 种衰落导致的接收失败的概率;*P*。指节点由于能量过低、缓存 溢出或其他外界干扰导致的节点失效的概率;*m*是每个节点的 邻居节点的个数;*n*指的是节点由源节点到达网关的最小跳数 (在算法中已经实现了跳数最短);*P*graph指该图路由在由源路 由向网关的上行链路过程中成功传输的概率。 n 跳后,信息仍能正确传输的概率为

 $P_{\text{graph}} = \{ 1 - [1 - (1 - P_e)^2 (1 - P_d)]^m \}^n$ (5)

然而,现阶段运用较多的 AOMDV 多路径路由算法提供多 条不交叉的冗余路径<sup>[11]</sup>。假设系统性能参数仍与 GRAEB 图 路由相同,下面定义 AOMDV 路由经历 *n* 跳后信息仍能正确传 输的概率为 *P*<sub>AOMDV</sub>。

很显然,根据串行链路概率算法,能得到<sup>[7]</sup>

 $P_{\text{AOMDV}} = (1 - P_d)^2 \{ 1 - [1 - (1 - P_e)^n (1 - P_d)^{n-1}]^m \}$ (6)

#### 3 GRAEB 算法性能仿真

#### 3.1 网络寿命仿真

不考虑重传以及由于非噪声因素导致的误码等情况,对 GRAEB 算法与最大剩余能量选择算法 ELHFR 进行 MATLAB 对比仿真,每次无线通信能耗的计算由文献[12]获得,其余相 关参数设置如表1所示。

表1 仿真参数设置

参数类型	取值	参数类型	取值
仿真区域	200 ×200	初始能量 $E_0$	1
拓扑个数	10	$F_{N \times 1}$	0
网关位置	(0,0)	传输比特率 $R_0$	2  Bps/Hz
噪声功率	– 70 DBM	吞吐量 $\eta_0$	1.9  Bps/Hz

仿真在 10 个不同的图拓扑中进行,根据两种算法随机选择源节点寻找到达网关的最优路径,直至节点能量全部消耗殆尽。然后取这 10 个拓扑结构得到的平均传输次数作为两种算法的平均网络生命周期。仿真结果如图 6 所示。



图 6 说明随着网络节点数量的增加,两种算法下的网络寿 命均有明显改善,且本算法的网络寿命约是 ELHFR 算法的两 倍。根据走势来看,随着网络节点进一步增加,本算法的优势 愈加突出。这是由于 ELHFR 算法总是选择剩余能量最多的节 点作为下一跳,这样会导致这些节点被频繁选择,而其他节点 则处于闲置状态;本算法则兼顾剩余能量和通信负载,节点剩 余能量较多且通信频次较少的节点会被优先选择,该机制有效 地平衡了各个节点的能量,延长了网络寿命。

#### 3.2 可靠性仿真

对比多路径路由 AOMDV,根据式(5)和(6),相关参数值 选取为: $P_e = 0.03$ , $P_d = 0.03$ ,m = 3,可以得到两种算法的传输 可靠性。同时还得到了不同的 m 值对于 GRAEB 图路由通信 可靠性的影响。仿真结果如图 7、8 所示。

图 7 说明 GRAEB 图路由相对于 AOMDV 多路径路由而言 具有相对更高的可靠性,并且随着路由跳数的增加,GRAEB 图 路由的优势愈发明显。当 n = 20 时,GRAEB 信息准确接收的 概率为 0.986 8,几乎能达到无失真传输;而 AOMDV 则降低至



图 8 描述的是不同的邻居节点数目条件下丢包率的情况。 从图中可以看出,随着邻居节点 m 数量增大,通信的可靠性进 一步提升,尤其是当 m = 4 时几乎可以实现无失真传输。这个 实验解决了一个实际的工业问题,即当路径的丢包率较大、网 络通信质量较低劣时,增加拓扑结构中的邻居节点数量可以实 现数据的高可靠传输。可是,m 的增大就会带来路由表开销以 及鲁棒系数计算的复杂度,同时也会导致能量耗散更快。有关 m 取值以及能量最优性之间的平衡需要在实际项目中视情况 而定,更优秀的算法也有待进一步研究。

### 4 结束语

针对 WirelessHART 工业组网的应用需求,本文提出了一种能量均衡的图路由算法 GRAEB。首先,网络根据图算法生成最短路径拓扑结构,接着节点根据鲁棒系数矩阵来进行路由选择和拓扑更新。同时,算法还限制了每个节点邻居个数,周期性地剔除性能较差的邻居,保证了传输可靠性。GRAEB 算法解决了 WirelessHART 实际应用中能量均衡和高可靠性同时兼顾的难题,充分保障了网络的负载均衡,延长了网络寿命,同时提高了通信的可靠性。

## 参考文献:

- FOUNDATION H C. HCF SPEC 290 revision 1.0, Wireless devices specification [S]. 2007.
- REAVES B, MORRIS T. Analysis and mitigation of vulnerabilities in short-range wireless communications for industrial control systems [J]. International Journal of Critical Infrastructure Protection, 2012, 5(3): 154-174.

#### (上接第1519页)

#### 参考文献:

- 罗涛,王昊.车载无线通信网络及其应用[J].中兴通讯技术, 2011,17(3):1-7.
- [2] KAKARLA J, SATHYA S S. A survey and qualitative analysis of multi-channel MAC protocols for VANET[J]. International Journal of Computer Applications, 2012, 38(6):38-42.
- [3] 王东,彭鑫,李仁发,等. 车载自组网动态频谱分配技术研究进展
  [J]. 计算机工程与应用, 2012,48(4): 9-12.
- [4] SUBRAMANIAN A P, GUPTA H, DAS S. Minimum interference channel assignment in multi-radio wireless mesh networks [EB/OL].
   (2008-06-18) [2013-06-12]. http://www.cs. sunysb. edu/ ~ hgupta/ps/channel.pdf.
- [5] KO B, MISRA V, PADHYE J, et al. Distributed channel assignment in multi-radio 802. 11 mesh networks [EB/OL]. (2007-12-06) [2013-06-12]. http://research.microsoft.com/~padhye/publica-

- [3] INTANAGONWIWAT C, GOVINDAN R, ESTRIN D, et al. Directed diffusion for wireless sensor networking [J]. IEEE/ACM Trans on Networking, 2003, 11(1): 2-16.
- [4] LINDSEY S, RAGHAVENDRA C S. PEGASIS: power-efficient gathe-ring in sensor information systems [C]//Proc of IEEE Aerospace Conference. 2002: 1125-1130.
- [5] CHATZIMILIOUDIS G, CUZZOCREA A, GUNOPULOS D, et al. A novel distributed framework for optimizing query routing trees in wireless sensor networks via optimal operator placement [J]. Journal of Computer and System Sciences, 2012, 79(3): 349-368.
- [6] HUANG S C, JAN Rong-hong. Energy aware, load balanced routing schemes for sensor networks [C]//Proc of the 10th International Conference on Parallel and Distributed Systems. 2004:419-425.
- [7] ZHAO Jin-dong, LIANG Zhen-jun, ZHAO Yao-pei. ELHFR: a graph routing in industrial wireless mesh network [C]//Proc of International Conference on Information and Automation. [S. l.]: IEEE Press, 2009:106-110.
- [8] DANG Kui, SHEN Ji-zhong, DONG Li-da, et al. A graph routebased super frame scheduling scheme in WirelessHART mesh networks for high robustness [J]. Wireless Personal Communications, 2012, 12(3): 1-14.
- [9] DAI Ya-wen, WANG Quan, LI Xiao-qiang. MEBRS: energy balancing route scheduling in centralized wireless sensor networks [C]// Proc of the 1st Asia Symposium on Quality Electronic Design.
   [S.1.]: IEEE Press, 2009: 270-275.
- [10] FERRARI P, FLAMMINI A, RINALDI S, et al. Performance assessment of a WirelessHART network in a real-world testbed [C]//Proc of Instrumentation and Measurement Technology Conference. 2012: 953-957.
- [11] CAI Jing, LIU Kun. An improved AOMDV routing protocol based on prediction of link stability[C]//Proc of the 4th International Conference on Machine Vision. 2011:1-6.
- [12] IBRAHIM A, HAN Zhu, LIU K J R. Distributed energy-efficient cooperative routing in wireless networks[J]. IEEE Trans on Wireless Communications, 2008, 7(10): 3930 - 3941.
- [13] ZHU Xiu-ming, LIN T, HAN Song, et al. Measuring WirelessHART against wired fieldbus for control [C]//Proc of the 10th IEEE International Conference on Industrial Informatics. [S. l.]: IEEE Press, 2012: 270-275.

tions/wene2007.pdf.

- [6] KYASANUR P, VAIDYA N H. Routing and link-layer protocols for multi-channel multi-interface Ad hoc wireless networks [J]. ACM Sigmobile Mobile Computing and Communications Review, 2006,10(1): 31-43.
- [7] 彭鑫,李仁发,刘禄骄. 多信道车载网络带宽调制算法[J]. 通信 学报,2010,31(11):123-129.
- [8] 李磊,易平.两次更新 NAV 防止信道抢占攻击的研究[J].技术研究, 2011(12):31-35.
- [9] 陆阳,谢凯,官骏鸣,等. 一种基于信道性能的 MR-MC Ad hoc 网络信道分配算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2010, 24(5): 430-436.
- [10] FAZIO P, RANGO F D, SOTTILE C. A new channel assignment scheme for interference-aware routing in vehicular networks [C]// Proc of Vehicular Technology Conference. [S. l.]: IEEE Press, 2011:1-5.