

文章编号:1000-582X(2009)12-1472-05

一种用于桥梁健康监测无线传感网络的路由协议

杨吉云, 廖晓峰

(重庆大学 计算机学院, 重庆 400030)

摘要:分析了现有无线路由协议不能直接应用于桥梁健康监测无线传感网络的原因,提出了具有针对性的路由协议。该路由协议针对采集模块位置固定的特点,采取了根据模块可靠度调节交换周期的邻居节点路由信息交换。针对路由安全性要求不高,同时也为了提高路由效率,提出了由可变阈值控制中间节点应答路由请求。为了充分利用路由发现的信息,采取了路由备份机制。该路由协议实现了有效的数据转发,适应了桥梁健康监测无线传感网络的应用环境。

关键词:桥梁;无线传感网络;路由交换;中间应答;路由备份

中图分类号:TP751.1

文献标志码:A

Routing protocol of the wireless sensor networks for bridge health monitoring

YANG Ji-yun , LIAO Xiao-feng

(College of Computer Science, Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China)

Abstract: By analyzing the reason that why the existing routing protocols cannot be applied to the wireless sensor networks for bridge health monitoring, a new routing protocol is proposed. Since the locations of the collecting modules are fixed, the proposed protocol exchanges the routing information between the neighbor nodes by adjusting the exchange cycle according to reliability of the modules. For the low routing security requirement, while to increase the routing efficient, the middle nodes replying the routing requirements with variable thresholds is introduced. In order to make full use of information in route discovering procedure, the backup routes mechanism is adopted. The proposed protocol can efficiently forward data and is suitable for the bridge health monitoring.

Key words: bridge; wireless sensor networks; route exchange; middle response; routing backup

桥梁结构状态数据的获取主要是在监测部位埋设传感器,各传感器的原始信号经过处理模块转换后得到所需的数据,然后处理模块再将数据传输到汇聚点^[1-3]。在传感器处理模块与汇聚节点之间采用无线传输方式是桥梁健康监测的发展趋势^[4-6]。

但由于桥梁的特殊结构以及监测布点的要求,使得有些传感器处理模块与汇聚节点有遮挡物,使得它们不能在相互的覆盖范围内。因此构成无线传

感网络的传感器处理模块需要对别的传感器模块的数据进行转发,使得监测的数据都能有效传输到汇聚节点。为此需要合适的路由协议进行有效的数据转发,同时该路由协议还应具有高的路由效率,以降低监测模块的能耗。

目前针对无线传感网络提出了各有侧重的路由协议^[7-16]。桥梁健康监测无线传感网络具有一些固

收稿日期:2009-04-20

基金项目:重庆市自然科学基金资助项目(CSTC,2007BB3169)

作者简介:杨吉云(1975-),男,重庆大学博士,主要从事无线传感网络、信息安全方向研究,(Tel)13983793873;
(E-mail)yangjy@cqu.edu.cn。

有的特征,如果采用表驱动路由为主的协议,虽然与采集模块位置固定的特征吻合,但其固定的路由信息交换不仅增大了模块路由对能耗的开销,也与模块可靠度随时间增大的特征矛盾。如果简单的采用按需路由为主的协议,则会因为大量的路由发现过程浪费能源。因此需要根据桥梁健康监测无线传感网络的特点,提出针对性的路由协议。

1 桥梁健康监测无线传感网络特征分析

桥梁健康监测无线传感网络的任务是采集健康评估所需的数据,因此其各节点的布置以及工作方式必须满足健康评估的要求,从而形成了其独有的特征:

1) 布点位置固定但复杂

桥梁结构复杂,并且桥梁种类较多,作者已经实施的桥梁监测项目就遇到了 4 种类型。同时根据健康监测的需要,传感器的布点需要遍布关键的各个位置,所以健康监测的布点位置复杂,但在工作过程中位置固定。

2) 工作方式特殊

桥梁健康监测需要在野外工作,其电源的供给可能会采用电池,各节点可靠度会随时间的推移逐渐减小。同时根据健康评估的需要,有的传感器需要全天候不间断工作,有的只需要固定时间点工作,所以各节点的可靠度有比较大的差异。

2 路由协议

根据桥梁健康监测无线传感网络的特征,提出了以表驱动路由为主,结合按需路由的路由协议。该协议根据节点可靠度调节获取邻居节点路由的频率,从路由请求包和应答包获取并备份路由信息,采用基于路由跳数和节点能源指数的选路策略,允许中间节点进行路由应答。

2.1 主要数据结构

1) 路由信息表 Route_Table

表结构为 $\langle DA, NA, H, S \rangle$ 。其中 DA 为目的节点地址, NA 为下一节点地址, H 为路由跳数, S 为到 DA 路由的平均剩余能源百分比。

节点能源消耗 E 可表示为

$$E = E_{Op} + E_{Tx} + E_{Rx} + E_D, \quad (1)$$

其中 E_{Op} 为节点数据采集能耗,由节点自身结构决定。

E_{Tx} 和 E_{Rx} 为数据发送和接收能耗,采用文献[17]中提出的无线通信能量消耗模型, E_{Tx} 和 E_{Rx}

表示为

$$E_{Tx}(k, d) = E_{elec} * k + \epsilon_{amp} * k * d^2, \quad (2)$$

$$E_{Rx}(k) = E_{elec} * k, \quad (3)$$

E_{elec} 为传输电路或接收电路时处理每比特数据所消耗的能量,为 ϵ_{amp} 为放大器消耗的能量。

E_D 为电池自放电能量。

2) 最近 RREQ 接收记录 RREQ_Cache

记录的信息有 $\langle TA, SA, RSNO, n \rangle$ 。其中 TA 为发送节点地址, SA 为源节点地址, $RSNO$ 为 RREQ 请求序列号, n 为相同 RREQ 收到的次数。

3) 最近 RREP 接收记录 RREP_Cache

记录的信息有 $\langle PA, PSNO \rangle$ 。其中 PA 为 RREP 生成节点地址, $PSNO$ 为 RREP 序列号。

4) 最近数据转发记录 Forward_Cache

节点保留最近一段时间对数据转发的摘要信息,具体为被转发数据包中的 $\langle SA, TA, DA \rangle$ 。

2.2 最佳路由选择

用 $G(V, E)$ 表达一个桥梁无线传感网络,其中集合 V 为节点集合,集合 E 为边集合,用 x_{ij} 表示节点 i 到节点 j 的边,其中 $i, j \in V$ 。当节点 i 到节点 j 的边被选为路由时, $x_{ij} = 1$, 否则 $x_{ij} = 0$ 。

一条路由 $Path = 1 \rightarrow \dots \rightarrow n$ 的平衡能量消耗 $b(x_{ij})$ 、时延 $t(x_{ij})$ 分别定义如下

$$b(x_{ij}) = \sum_{(i,j) \in P} e_{ij} x_{ij} + \frac{\sum_{i=1}^n (S - \bar{S})^2}{n},$$

$$t(x_{ij}) = \sum_{(i,j) \in P} t_{ij} x_{ij},$$

其中 P 表示由路径 path 的边所组成的集合, e_{ij} 表示 i, j 节点间数据传输的能耗; S 为各节点剩余能量百分比; t_{ij} 表示 i, j 节点间数据传输的时延,由于桥梁无线传感网络节点间距离短,可认为各节点间的传输时延相同,因此 t_{ij} 可转化为节点跳数 H 。

对最佳路由选择的问题转化为最小平衡能耗和最小时延的优化问题,通过建立以下的多目标整数优化模型来求解具有最小平衡能耗和最小时延的路由

$$\min F = [F_1(x) F_2(x)] =$$

$$\left[\sum_{(i,j) \in E} e_{ij} x_{ij} + \frac{\sum_{i=1}^n (S - \bar{S})^2}{n}, \sum_{(i,j) \in P} t_{ij} x_{ij} \right]. \quad (4)$$

$$\text{s. t. } \sum_{(i,j) \in E} x_{ij} - \sum_{(i,j) \in E} x_{ji} = \begin{cases} 1, & i = 1 \\ 0, & i \neq 1, n \\ -1 & i = n \end{cases}. \quad (5)$$

$$x_{ij} \in (0, 1) (i, j = 1, 2, \dots, n), i \neq j.$$

设问题(4)的 2 个目标函数 F_1, F_2 分别在约束

条件下的最优解(最小值)为 x_1^*, x_2^* , 此时目标函数 F_1, F_2 的最小值为 F_1^*, F_2^* , 则称 $F^* = (F_1^*, F_2^*)$ 是问题(4)的理想点。如果 $x_1^* = x_2^*$, 则令 $x^* = x_1^*$, x^* 就是问题(4)的绝对最优解。设目标函数 F_1, F_2 分别在约束条件下的最大值为 F_1^-, F_2^- 。

通过构造目标优化度函数来解决上述优化问题。定义目标 $F_i(x)$ 的优化度函数 $w_i(x)$ 为

$$w_i(x) = \frac{F_i^- - F_i(x)}{F_i^- - F_i^*}, \quad (6)$$

式中: $w_i(x) \in [0, 1]$, 当目标函数达到最优值(最小)时, 优化度函数为 1; 当目标函数达到最劣(最大)值时优化度函数为 0。

在求解优化问题(4)时, 通过构造如下的评价函数

$$\begin{aligned} \max \lambda_1 \cdot w_1(x) + \lambda_2 \cdot w_2(x), \\ \text{s. t. } x \in X, \lambda_1 + \lambda_2 = 1. \end{aligned} \quad (7)$$

将原优化模型(4)的求解问题转换成求解评价函数(7)的整数优化问题, 目标是尽量使各目标函数的优化度函数达到最大。其中, 权值系数 λ_1, λ_2 表示对不同目标的重视程度。

2.3 路由信息交换

根据布点位置固定的特征, 定期与邻居节点交换路由信息, 节点收到路由信息后更新本地路由表。交换周期 T 根据节点可靠度进行调节, 如式(8), 节点可靠度模型如式(9)所示^[18]

$$T = \alpha \frac{1}{R}, \quad (8)$$

$$R(t) = e^{-\alpha t}. \quad (9)$$

式中 α 为可靠度影响因子, t 为时间。

2.4 路由维护

在监测模块利用已有的路由转发数据包时, 可能会由于中间某个监测模块故障, 导致其所在的路由中断。对路由断开的判断方法通常是通过检测对方的应答信息来实现的。

当某个监测模块判断路由由中断时, 该模块产生路由失败信息包 RRFL(RA, TA, SA, DA, FA), 通过 Forward_Cache 向上游节点发送该信息包, 其中 FA 指出了路由中断的模块地址。上游节点收到 RRFL 后, 查找次优路由进行发送, 直至源节点都没有找到次优路由, 则由源节点进行一次路由发现过程。

2.5 路由请求

如果某个监测模块的路由表中没有到达目的节点的路由, 将发起路由发现过程。该过程包括路由

请求信息包 RREQ 的广播、RREQ 的接收与转发、路由请求应答 RREP 的产生、RREP 的接收与转发。

2.5.1 RREQ 的发送

在需要发起一次路由发现过程时, 生成并广播 RREQ(SA, DA, RSNO, {REC₁... REC_k})。为防止路由环路产生, 每个节点维护一个递增的 RSNO 请求序列号。{REC₁... REC_k} 是 RREQ 经历过的节点信息, 用于中间节点快速更新路由表。

2.5.2 中间节点应答的 RREQ 接收与转发

节点在收到 RREQ 时, 首先通过 RREQ 的路由经历进行环路检查以及通过 RSNO 检查 RREQ 是否过时。同时为了防止在生成备份路由时节点有太多的路径通过, 需要在收到第一个 RREQ 后进行时间和数量上的限制, 因此需要 RREQ 接收缓存 RREQ_Cache 和一个定时器, 其中 $RREQ_Cache < TA, SA, RSNO, n >$, n 为相同 RREQ 收到的次数。

对满足不丢弃条件的 RREQ, 利用 RREQ 的节点经历信息更新路由表。然后查看路由表中是否有到 RREQ 中请求到目的节点的路径。如果存在到达目的节点的路径, 将通过式(4)-(7)对所有到目的节点的路径进行计算并找出最优路径, 然后判断所找出的最优路径是否满足生成 RREP 的条件阈值 N_C 。如果存在满足条件的路径, 则直接向源节点生成 RREP。

对 RREQ 详细处理算法描述如图 1 所示。

2.5.3 RREP 的产生

RREP 是对 RREQ 的应答, 包含了到目的节点的路径信息, RREP 产生的情况有: 目的节点收到 RREQ; 中间节点在收到 RREQ, 存在到达目的节点的路径并且满足条件阈值。

节点在生成 RREP 时, 为防止旧的 RREP 在网络中存在以及路由环路的产生, 每个节点维护一个递增的 RREP 序列号 PSNO, 数值越大, 表明 RREP 越新。RREP 将沿着 RREQ 记录的路线将 RREP 传给路由请求节点。

2.5.4 RREP 的接收与转发

中间节点收到 RREP 后, 对比 RREP 接收缓存中关于同一应答节点的 PSNO, 判断收到的 RREP 的新旧, 对过时的 RREP 予以丢弃。对不予丢弃的 RREP, 更新路由表。如果节点不是路由请求节点, 则继续从路由请求经历中反向查找 RREP 的下一节点地址, 然后继续转发 RREP 直至找到路由请求节点。

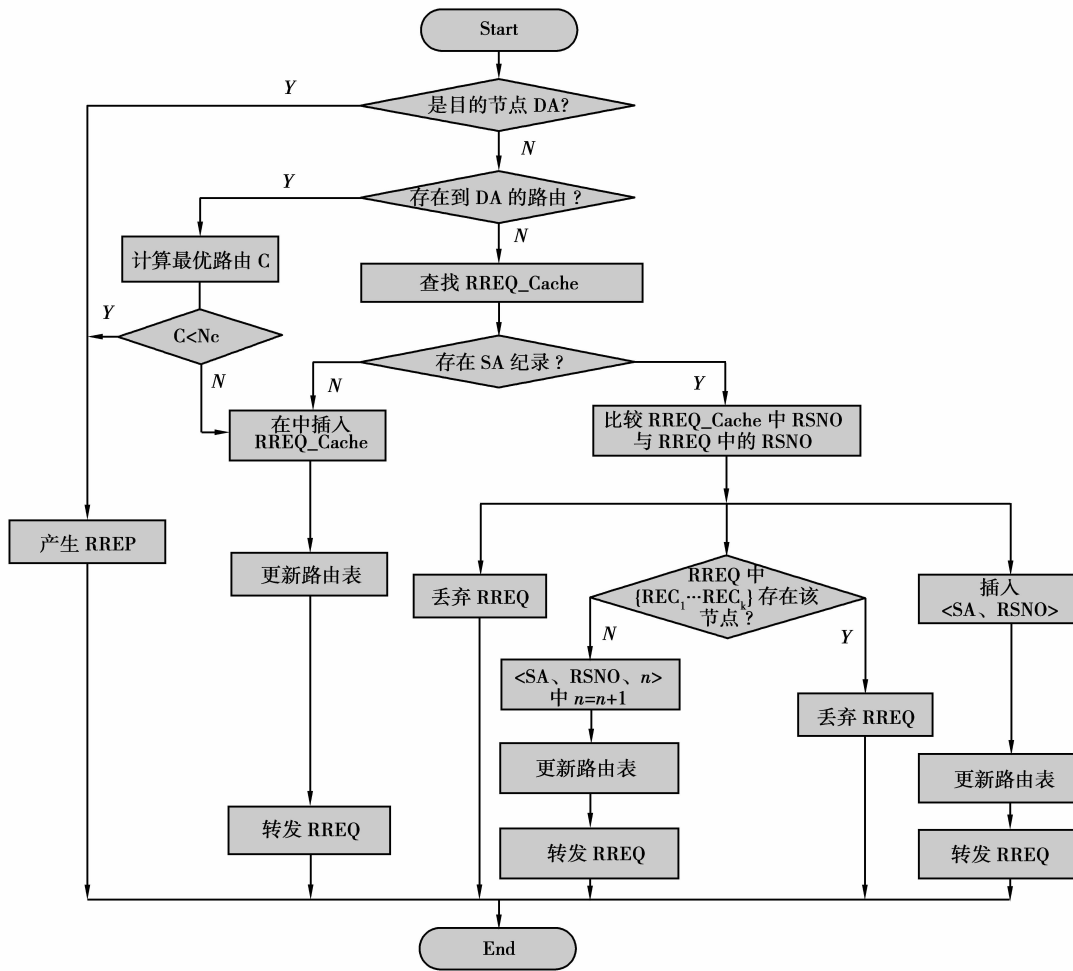


图 1 RREQ 处理算法

3 路由协议分析

设所构建的网络为 N 个节点,路由信息表每条记录为 M bit,每个节点最多含有 $N-1$ 条记录,则每一轮全网路由信息交换所消耗的能量为

$$E_E = N^2 \cdot (N-1) \cdot M \cdot (E_{Tx} + E_{Rx}) \quad (10)$$

假设路由发现过程中信息包的平均长度为 L bits,则一次路由发现过程平均消耗能量为

$$E_F = \omega \cdot N \cdot L \cdot (E_{Tx} + E_{Rx}) \quad (11)$$

式中 $0 < \omega < 1$,为 RREP 产生速度影响因子,与由 N_c 成反比关系,所以减小 N_c 可有效减小路由发现过程的能耗。根据 Route_Table、RREQ、REEP 结构可得

$$L \approx \frac{(N-1) \cdot M}{2} \quad (12)$$

$$\frac{E_E}{E_F} \approx \frac{2 \cdot N}{\omega} \quad (13)$$

由式(13)可知,路由发现过程的能耗小于路由信息交换能耗。

由式(1)、(2)、(3)可知,节点数据采集能耗和电池自放电随时间增加,并且与其它因素无关。而路由信息收发仅与电路和距离有关。据此可调节式(9)中的可靠度影响因子 α ,以减小定期路由信息的交换频率。

4 结 论

论文所提出的路由机制对随机交换路由信息的时间间隔 T 的改变,以及对生成 RREP 的条件阈值 N_c 大小的改变,可很好的适应监测系统随使用时间的推移故障概率加大的环境。在早期,各模块故障概率低,则可设定随机交换的时间间隔 T 为较大的值,条件阈值 N_c 为较小的值。这样可以减少路由信息的交换,节约了路由管理带来的开销。而随着模块故障概率的增大,则需逐渐减小 T 和加大 N_c ,以适应网络不稳定的环境。

参考文献:

[1] 黄方林,王学敏,陈政清,等. 大型桥梁健康监测研究

- 进展 [J]. 中国铁道科学, 2005, 26(2): 1-6.
HUANG FANG-LIN, WANG XUE-MIN, CHEN ZHENG-QING, et al. Research progress made on the health monitoring for large2type bridges [J]. China Railway Science, 2005, 26(12): 1-6.
- [2] 张启伟, 周艳. 桥梁健康监测技术的适用性[J]. 中国公路学报, 2006, 19(6): 54-58.
ZHANG QI-WEI, ZHOU YAN. Applicability of bridge health monitoring technology [J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(6): 54-58.
- [3] 谢晓尧, 严新平. 基于大跨度桥梁健康监测方法研究 [J]. 贵州科学, 2007, 25(2): 9-12.
XIE XIAO-YAO, YAN XIN-PING. Methods research of health monitoring baesed on long span bridge [J]. Guizhou Science, 2007, 25(2): 9-12.
- [4] 石军锋, 钟先信, 陈帅, 等. 无线传感器网络结构及特点分析[J]. 重庆大学学报, 2005, 28(2): 16-19.
SHI JUN-FENG, ZHONG XIAN-XIN, CHEN SHUAI, et al. Architecture and characteristics of wireless sensor networks [J]. Journal of Chongqing University, 2005, 28(2): 16-19.
- [5] 叶伟松, 袁慎芳. 无线传感网络在结构健康监测中的应用[J]. 传感技术学报, 2006, 19(3): 890-894.
YE WEI-SONG, YUAN SHEN-FANG. Structural health monitoring based on wireless sensor networks [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2006, 19(3): 890-894.
- [6] 吴皓莹, 姜德生. 基于蓝牙传感器网络技术的桥梁健康监测监测系统[J]. 传感器技术, 2005, 24(11): 44-49.
WU HAO-YING, JIANG DE-SHENG. Bridge health monitoring system based on Bluetooth sensor network [J]. Journal of Transducer Technology, 2005, 24(11): 44-49.
- [7] 缪强, 郑扣根. 无线传感器网络的路由协议设计研究 [J]. 计算机应用研究, 2005(8): 33-35.
MIAO QIANG, ZHENG KOU-GEN. Research on design of routing protocol for wireless sensor networks [J]. Application Research of Computers, 2005 (8): 33-35.
- [8] 李方敏, 徐文君, 高超. 一种适应于无线传感网络的功率控制 MAC 协议 [J]. 软件学报, 2007, 18 (5): 1080-1091.
LI FANG-MIN, XU WEN-JUN, GAO CHAO. A power control MAC protocol for wireless sensor networks [J]. Journal of Software, 2007, 18 (5): 1080-1091.
- [9] 冯跃喜, 金心宇, 蔡文郁. 基于改进型蚁群算法的无线传感路由协议 [J]. 传感技术学报, 2007, 20 (11): 2461-2464.
FENG YUE-XI, JIN XIN-YU. Wireless sensor network routing protocol based on improved ant colony algorithm [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2007, 20(11): 2461-2464.
- [10] ZHENG J, GUO S J, QU Y G, et al. Energy equalizing routing for fast data gathering in wireless sensor networks[J]. The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications, 2007, 14 (4): 13-21.
- [11] LU Y J, SHEU T L. An efficient routing scheme with optimal power control in wireless multi-hop sensor networks [J]. Computer Communications, 2007, 30 (14): 2735-2743.
- [12] DOMINGO M C, PRIOR R. Energy analysis of routing protocols for underwater wireless sensor networks [J]. Computer Communications, 2008, 31(6): 1227-1238.
- [13] LU Y J, SHEU T L. An efficient routing scheme with optimal power control in wireless multi-hop sensor networks [J]. Computer Communications, 2007, 30 (14): 2735-2743.
- [14] GASINIENEC L, SU C, WONG P W H, et al. Routing of single-source and multiple-source queries in static sensor networks [J]. Journal of Discrete Algorithms. 2007, 5(1): 1-11.
- [15] LI L, DONG S S, WEN X M. An energy efficient clustering routing algorithm for wireless sensor networks [J]. The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications, 2006, 13(3): 71-75.
- [16] HEINZELMAN W R, CHANDRAKASAN A, BALAKRISHNAN H. An application-specific protocol architecture for wireless micro sensor networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2002, 1(4) : 660-670.
- [17] 刘雪省, 史鹏飞, 吕军, 等. MH-Ni 蓄电池自放电规律及其应用[J]. 电源技术, 2006, 30(3): 193-195.
LIU XUE-SHENG, SHI PENG-FEI, LV JUN, et al. Discipline about self-discharge of Ni-MH battery and its application [J]. Power Technology, 2006, 30(3): 193-195.
- [18] 王化祥. 仪表可靠性基础[M]. 天津: 天津大学出版社, 1994.

(编辑 侯 湘)