

一种无线式总线结构的传感器网络研究

李娜,李剑

(南京师范大学电气与自动化工程学院,江苏 南京 210042)

[摘要] 针对提高 WSN 网络寿命的优化设计问题,在网络构建上设计一个新的结构,称为无线式总线结构,此结构旨在缩短传输路径和屏蔽不必要的信息交换,从而节约能量. 基于建立的总线圆和传输总线,把信息保存在总线圆上,当需要时再传递到汇聚点. 需要传递的信息从传输总线上传递到汇聚点. 这样减轻靠近汇聚点的传输点的压力,减少瓶颈点,延长网络寿命. 同时在网络重构时,根据混杂信息量方程,提出按信息量的变化率进行重构的策略和方法,保证网络的整体能量平衡消耗. 仿真实验给出方法在不同覆盖率的要求下系统的能量消耗和寿命的关系,较之于一些传统网络结构更有效. 结果表明无线式总线的构建策略有利于网络调度和延长网络寿命.

[关键词] 无线传感器网络,无线式总线,网络寿命

[中图分类号]TP393 [文献标志码]A [文章编号]1672-1292(2014)01-0051-06

Research on WSN Based on the Wireless Bus Architecture

Li Na, Li Jian

(School of Electrical and Automatic Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)

Abstract: The performance of WSN is optimized in different layers for prolonging its lifetime. A new network architecture named wireless bus is given to shorten the transition length, and screen unnecessary information interchange for saving energy. Circle bus and transition bus are proposed for reducing the burden of bottleneck which is close to the sink node, and average energy saving is obtained. The information is saved on the bus circle and is transferred when used. The nearest node reconstruction method is used for reconstructing and balancing the whole cost of energy, which is based on the mixed function of information. The reconstruction occurs when the change rate is up to the limit. In simulation test, the relation of energy cost and lifetime are given in different rate of coverage, and good performance is obtained from wireless bus architecture for network scheduling and lifetime extending.

Key words: wireless sensor network (WSN), wireless bus, network lifetime

无线通信和嵌入式系统的发展,使得 WSN 的应用成为可能,同时随着物联网的建设越来越广泛和深入,提高其性能非常必要. 传感器节点的成本不能太高,设置不能太过密集,这就使得节点的能量存储有限,处理速度和通信能力均较低. 传感器常常工作在无人职守的应用环境,节点的电源不能够现场充电或者替换,所以节点都是具有一定的寿命,无法延长和扩展. 使用无线传感器网络涉及的一个重要的方面就是节约能量使网络寿命最大化. 如何提高传感器网络的能量利用效率,继而延长网络寿命就成为一个重要的研究内容. 国内外研究学者从 WSN 的各个层次出发来降低消耗,文献[1]通过寻找任务指派的最佳方案来获得网络寿命的最大化;文献[2]研究具有一定寿命限制的异构网络的调度;文献[3]研究传感器感知半径的变化对网络结构以及寿命的影响;文献[4]通过对路由器的设计来进行节能优化;文献[5]先建立骨干网,然后通过对节点状态的调整,闲时休眠来节约能量. 针对能量利用率问题,已经有不少学者提出能量有效路由协议,主要包括最小能耗和能耗均衡两个方向. 最小能耗策略依据节点到基站的最小代价建立路径,节省了网络资源,但协议只考虑传输能耗最小建立路由会使数据流分担不平衡,导致某些节点因能量耗尽过早失效;能耗均衡策略在路由选择过程中关注了能量消耗的均衡特性,但又无法保证网络的传

收稿日期:2013-06-19.
基金项目:国家自然科学基金(61273243).
通讯联系人:李娜,博士,讲师,研究方向:点云图像切片处理技术、无线传感器网络. E-mail:linananjing@163.com

输总能耗. 为此, 本文认为组网的设计应该兼顾传输能耗和能耗均衡特性两方面, 单独考虑任一方面都有可能造成网络因能量资源利用不均或开销过大而提前死亡.

本文基于一定的网络覆盖连通限制的基础上, 提出了一种构建网络的快速方法, 通过建立无线式总线机制, 处理保存和转发数据, 实现需求数据最短路径转发、传输、减少瓶颈压力, 而且在某些网络节点失效的情况下快速恢复网络, 可以大大节省网络能量的消耗, 延长网络生存周期.

1 系统模型

无线传感器网络通常包括传感器节点、汇聚节点和管理节点. 大量传感器节点随机部署在监测区域内或附近, 能够通过自组织方式构成网络. 传感器节点监测的数据沿着其他传感器节点逐跳地进行传输, 在传输过程中监测数据可能被多个节点处理, 经过多跳后路由到汇聚节点, 最后通过互联网或卫星到达管理节点. 用户通过管理节点对传感器网络进行配置和管理, 发布监测任务以及收集监测数据. 传感器节点通常是一个微型的嵌入式系统, 它的处理能力、存储能力和通信能力相对较弱, 通过携带能量有限的电池供电. 从网络功能上看, 每个传感器节点兼顾传统网络节点的终端和路由器双重功能, 除了进行本地信息收集和数据处理外, 还要对其他节点转发来的数据进行存储、管理和融合等处理, 同时与其他节点协作完成一些特定任务. 汇聚节点的处理能力、存储能力和通信能力相对较强, 它连接传感器网络与 Internet 等外部网络, 实现两种协议栈之间的通信协议转换, 同时发布管理节点的监测任务, 并把收集的数据转发到外部网络上. 汇聚节点既可以是一个具有增强功能的传感器节点, 有足够的能量供给和更多的 Flash 和 SRAM 中的所有信息传输到计算机中, 通过汇编软件, 可很方便地把获取的信息转换成汇编文件格式, 从而分析出传感节点所存储的程序代码、路由协议及密钥等机密信息. 同时还可以修改程序代码, 并加载到传感节点中, 因而对各种节点的布局和管理是很重要的.

1.1 节点覆盖模型

在监控区内, 由一组被测节点 d_i 组成 D , 每个传感器节点 s_j 的覆盖区建模为半径为 r 的圆形区域, 即圆盘覆盖模型^[3], 如果被测点 d_i 和传感器节点 s_j 之间的距离小于 r , 那么 d_i 就可以包含在 s_j 里, 否则就不包含在 s_j 里. 设: S 为传感器节点集合; m 为汇聚节点 (Zigbee 网络上的协调器和路由器); A 为监控区; D 为监控点集合. 则覆盖率可由下式给出:

$$C_s^D(A) = \frac{\sum_{j=1}^n P_{s_j}^R(d)}{D_A}, \quad (1)$$

其中, D_A 是监控区 A 内的需要监控点数; $P_{s_j}^R(d)$ 是 A 内被传感器 s_j 覆盖到的点数. 其计算由下式给出:

$$P_{s_j}^R(d) = \sum_{i=1}^k d_i, d_i = \begin{cases} 1 & l(d_i, s_j) \leq R \\ 0 & l(d_i, s_j) > R \end{cases}, \text{ 其中 } l(d_i, s_j) \text{ 是 } d_i \text{ 和 } s_j \text{ 欧式距离.}$$

所谓覆盖是定义一覆盖率 C , 构建的网络中覆盖的节点与全部节点的总数要达到 C 以上. 所谓连通是指传感器节点 S 和汇聚点 m 之间至少有一条通信路径. 所以对于网络寿命优化问题定义为: 在平面 WSN 中, 基于对覆盖连通的限制, 构建网络使得系统能量消耗最小化以使网络寿命最大化. 这是一个多目标优化问题, 而当 $C=1$ 时, 就变成单目标优化问题了. 解决问题前, 我们先给出网络的 3 个假设:

- (1) 每个传感器节点具有唯一的 ID, 并且它的位置是已知的;
- (2) 监控是连续进行的数据周期的发送;
- (3) 网内的信息流量是由本网产生的, 未与外界信息交换.

在构建网络时, 为了节约能耗, 把未使用的节点设为休眠, 覆盖连通使用的节点状态设为激活, 因为很多情况下不需要完全覆盖, 所以基于一定的覆盖率, 这样做可以大大节约能量. 尽量使用较少的传感器节点, 也就可以延长网络寿命. 把传感器的状态可设为 4 种: 激活、休眠、准备和失效. 处于激活动态的传感器节点, 正常参与感知和数据路由任务, 而处于休眠状态的传感器节点, 只参与网络路由而关闭感知功能. 准备状态是一个传感器节点从休眠状态到活动状态的过渡状态; 而失效则意味着传感器节点已经不能正常参与网络的所有工作.

1.2 能量模型

每个节点能量消耗由下式给出^[4]:

$$e_i^t = \sum_{l \in T} (AE_i w_i^l + MP_i^l y_i^l + \sum_{l \in s} \sum_{ij \in o^l(A^S \cup A^M)} TP_{ij}^l z_{l,ij}^t), \quad (2)$$

其中, AE_i 代表激活节点消耗的能量; MP_i^l 是跟保存信息量有关的节点能耗, 如果所使用的网络结构需要太多信息的存储, 那么网络的能耗就会很大, 所以这个参数是要优化的一个目标; TP_{ij}^l 代表着传感器 i 和传感器 j 之间传输需要的能量, 这个参数对整个网络能耗的影响很大, 所以是另外一个优化目标, 同时活动节点的个数的减少也可以节约能量. 总体的能量不但跟传输距离有关, 还跟节点工作类型有关. 在组网的过程中使用无线式总线结构, 其总线圆可以优化 MP_i^l 参数, 而传输总线可以优化 TP_{ij}^l .

2 无线传感器网络构造及重建策略

无线传感器网络的拓扑结构包括平面网络结构、分级层次网络结构、混合网络结构、Mesh 网络结构. 本文建立网络的策略属于混合网络结构.

2.1 网络结构模型

以汇集点到最远处的距离的 $1/2$ 作为中心点, 以传感器的感知半径 r 为距离建立第一个总线圆, 再以 $3r$ 为半径建立总线圆, 按奇数倍递增的顺序, 直到 $kr > d/2$ (d 是监测空间范围长度). 每个圆的建立并不一定是平面的, 在建立每个圆的时候, 先确定圆周并按感知半径等分, 然后按等分点寻找传感器, 某个传感器的感知范围包含这个等分点, 那么这个传感器就可以作为组成总线圆的一点. 建立的每个圆都给一个权, 就是覆盖率的增长率. 覆盖率在每建一个圆的时候计算一次作为此圆的权, 并记录覆盖率的增长率, 某个圆的建立没有显著提高覆盖率, 此圆的权将下降, 最终的网络是由那些显著增加覆盖率的圆组成. 此处覆盖率的增加可以依据特定的应用场合, 给出具体的限定值, 如果整个区域需要 5 个总线圆来覆盖, 那么每个圆的覆盖率平均为 20%, 当覆盖率的增长远小于 20%, 那么此圆就要被放弃, 用新的圆来代替. 当满足覆盖率要求之后, 建立无线式传输总线. 在某个圆的覆盖下的传感器的信息汇聚在此圆上组成传输总线的传感器上. 此圆上信息的保存和传输到汇聚点都由这个传感器 s_i 完成, 此圆覆盖内的传感器信息如改变则修改 s_i , 不改变则不去修改 s_i . 建立的网络如图 1, 传输总线为 Q-I-H-G-F. 每个圆节点的信息保存在相应的 Q, I, H, G, F 上.

可以看出无线式总线结构和一般的树状结构的不同. 在本文的结构图 1 中当请求点从 A 处的信息需要传递到汇聚点的时候所走的路径是: A-B-C-D-E-F-m; 而在一般的树状结构图 2 中, 所走的路径是: A-B-K-J-I-H-G-F-m. 通过图示比较可以看出本文的结构可以实现最小化路径, 以及缓解靠近汇聚点的传感器的压力.

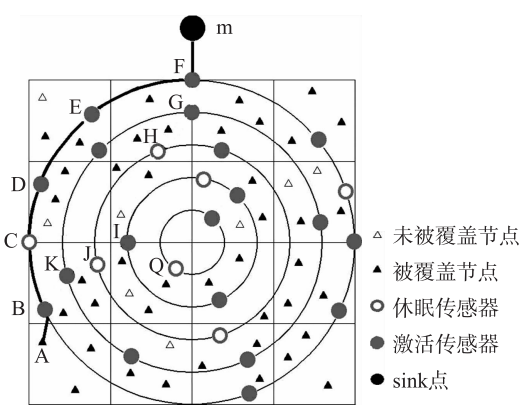


图 1 无线式总线网络结构示意图
Fig.1 Wireless bus circle architecture

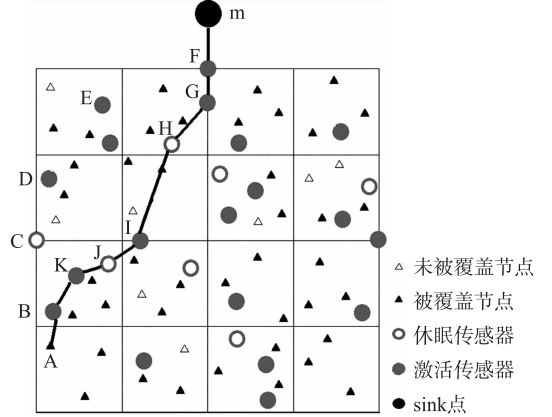


图 2 树状网络结构图
Fig.2 Tree net architecture

2.2 多目标优化

在 t 周期内, 整个系统的优化目标是:

$$Y^{t*} = \arg_{Y^t} \min \left(\sum_{l \in s} e_i^l + \sum_{j \in D} EH_j \cdot h_j^l \right), \quad (3)$$

这里, $\mathbf{Y}^t = \{y_1^t, \dots, y_{(s)}^t\}$ 是决策矢量; e_l^t 是在 t 时刻每个节点的能量的消耗; EH_j 是因为没有覆盖到监测点而进行对节点惩罚的因子. 式(4) ~ 式(6)给出了满足覆盖的约束条件.

$$\sum B_{lj} \cdot x_{lj}^t + h_j^t \geq q, \forall j \in D, \forall t \in T, \quad (4)$$

此式保证至少 q 个传感器节点覆盖了每个请求点;

$$B_{lj} \cdot x_{lj}^t \leq y_l^t, \forall l \in S, \forall j \in D, \forall t \in T, \quad (5)$$

此式保证一个传感器是激活的,那么它至少覆盖一个请求节点.

$$B_{lj} \cdot x_{lj}^t \in \{0, 1\}, \forall l \in S, \forall j \in D, \forall t \in T. \quad (6)$$

此式表示 x 变量是二进制的. 式(7) ~ 式(10)是针对连续性问题.

$$\sum_{ip \in IP(A^s)} z_{l,ip}^t - \sum_{pk \in oP(A^s \cup A^m)} z_{l,pk}^t = 0, \forall p \in S-l, \forall l \in S, \forall t \in T, \quad (7)$$

$$- \sum_{pk \in oP(A^s \cup A^m)} z_{l,pk}^t = -y_l^t, p=l, \forall l \in S, \forall t \in T. \quad (8)$$

$$z_{l,ip}^t \leq y_i^t, \forall i \in S, \forall l \in (S-p), \forall ip \in (A^s \cup A^m), \forall t \in T, \quad (9)$$

$$z_{l,ip}^t \leq y_p^t \forall p \in S \forall l \in (S-p) \forall ip \in (A^s \cup A^m) \forall t \in T. \quad (10)$$

式(7)和式(8)确保在传感器节点和槽节点之间至少有一条通路. 式(9)和(10)确保是激活的节点建立这样的通路.

$$e_l^t \geq 0, \forall l \in S. \quad (11)$$

式(11)表明每个节点在周期 t 的最低能力消耗大于 0.

本文的问题是调度并设置传感器的状态,使得整个网络满足连通覆盖的要求. 通过以上的约束,可以得到覆盖并保持传感器节点与汇聚点信息畅通. 其主要的优化目标是传输距离的减少和使用最少节点,所以可以重写目标函数:

$$F_1 = \sum_{i \in S} [(AE_i \cdot w_i^t) + (MP_i^t + P_{im}^t) y_i^t], \quad (12)$$

其中, P_{im}^t 是在 t 周期时节点 i 和汇聚节点之间所需能量的最小路径. 目标函数考虑到激活节点工作所需要的能量,同时考虑到整个范围内节点信息传输经过的路径最短,通过总线圆寻找最短路径,这个路径是所有信息传递路径的一个总和. 本文多目标优化是协同调度激活节点的个数和所建立的网络内传递信息的路径,使系统能量消耗满足一定的要求.

引入非覆盖惩罚函数,可以加速寻找最优解,也就是最小化 P_{im}^t , P_{im}^t 是表征传输过长而消耗能量过多的路径.

$$F_2 = pC \cdot nC^t + pAS \cdot \sum_{i \in S} y_i^t, \quad (13)$$

式中, pC 是未覆盖节点惩罚因子; nC^t 是未覆盖请求点数; pAS 激活节点惩罚因子. 这个函数最小化未覆盖区的面积,同时把激活的传感器节点数在相同的覆盖率下进行比较,节点数少的优先选择. 使用两个惩罚因子 pC 和 pAS 进行选择. 多数网络的覆盖率是不需要 100%,所以在覆盖率和寿命之间进行折衷.

3 算法实现

本文多目标算法允许在网络覆盖率和能量消耗之间进行折衷,寻找满足 Patro 收敛的最优解^[12]. 同时考虑到某些节点失效时,重建网络连通及恢复覆盖时需要时间以及消耗能量,所以在更新时选择本地最近替换原则. 因为先前建立的网络已是全局最优,由于局部小的变化而全部重新构建全局的网络显然会消耗更多的能量,只有当失效的节点占有一定的比例时,再全局重构.

优化算法是在汇聚点上计算求得最优解,而传感器节点功能是感知、接收、传递信息,其能量有限. 在网络重构时有一定的延迟,此时传感器感知邻近的传感器失效,相关信息传递到汇聚点,并从其接收命令重组网络,这个延迟时间是需要考虑并计算在内. 全局算法寻找满足连通覆盖要求的最小路径的网络构建,在建立无线圆覆盖时,保留那些显著提高覆盖率的圆,而删除那些对覆盖率提高不明显的圆,用下一个圆来构建. 构建后设置节点状态,得到节点状态,被覆盖的请求点设为‘1’,未被覆盖的设为‘0’. 这样很容易计算覆盖率. 满足覆盖率要求后建立传输总线,建立的原则是每个圆上选择一节点,选择是根据这个节

点包含的信息量来决定. 所谓包含的信息量是指它所覆盖点以及它传输的信息总和: $SI = nl + mT$, 其中, nl 是节点数; mT 是传递接收请求次数, 此方程是混杂方程. 建立总线的点是每个圆上包含信息量大的圆. 汇聚点与传感器节点的信息是通过每个圆与总线传递的, 这样缓解了离汇聚点近的节点的压力, 减少了瓶颈点, 延长整个网络的寿命. 以下是算法:

(1) 编码. 节点的状态可以分成 4 类: $a_i = 00$ 表示休眠; $a_i = 11$ 表示激活; $a_i = 01$ 表示节点从休眠向工作转变过渡状态, $a_i = 10$ 由工作状态转向失效. 所以每个圆的覆盖面包含的节点数由一个向量来表示其工作状态 $A^j = (a_1^j \ a_2^j \ \cdots \ a_n^j)$, 于是得到一个 $m \times n$ 的组态. 其组合向量为:

$$\begin{bmatrix} A^1 \\ A^2 \\ \vdots \\ A^m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1^1 & a_2^1 & \cdots & a_n^1 \\ a_1^2 & a_2^2 & \cdots & a_n^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_1^m & a_2^m & \cdots & a_n^m \end{bmatrix}, m \text{ 是圆的个数}, n \text{ 是组成一个圆需要的点数}.$$

(2) 约束条件. 对于任意一组组态, 要满足覆盖率的约束条件:

$$C(\min(Rs_i)) = 1, s_i \in S_c$$

计算覆盖率是针对 A^j 包含的节点数累加, 每加一次计算其对覆盖率的贡献, 如果增加不多, 此 A^j 被删除.

(3) 初始化. 按 Patro 最优的指导原则来组态, 总线圆是选择节点密度高的节点组成的, 传输总线按照路径最短的原则来搭建, 目的是用尽量少的节点和尽量短的整体路径来组成网络.

(4) 预测并预备下一可选网络组态. 基于节点工作量的多少预测节点失效的时间, 到此时间根据实际情况选择下一步可行组态, 可由附近点替换失效点.

(5) 更新能量消耗信息, 并重复执行(4).

4 仿真实验

在覆盖率要求分别是 0.90 和 0.75 情况下, 使用 50 个随机分布的监测节点, 在 $50 \text{ m} \times 50 \text{ m}$ 的方形区域范围进行仿真, 假设传感器的性能: 感知半径为 2.5 m; 激活能量为 5 mAh; 休眠能量为 13 mAh; 传输能量为 20 mAh; 接受能量为 2 mAh.

一般离汇聚点近的传感器用作为总线上的路由和感知功能, 离汇聚点远的传感器作为感知节点(它们一般是路由树上的叶子部分), 可知总线上传输节点消耗是网络瓶颈, 传统树结构中, 靠近汇聚点是信息传递的重要环节, 常常是满足了覆盖限制后由于靠近汇聚点的节点失效(断电)而导致网络失效需重构. 而本文使用总线结构中, 节点信息是保存在其单位圆上的, 需要时经传输总线传递, 这样大大减轻了靠近汇聚节点的负担. 同时, 网络重构次数也明显减少, 这样, 总体平均能量的利用率显著提高. 如图计算结果. 图 3 是覆盖率为 90% 时得到的最终网络结构, 图 4 是覆盖率为 75% 时得到的最终网络结构.

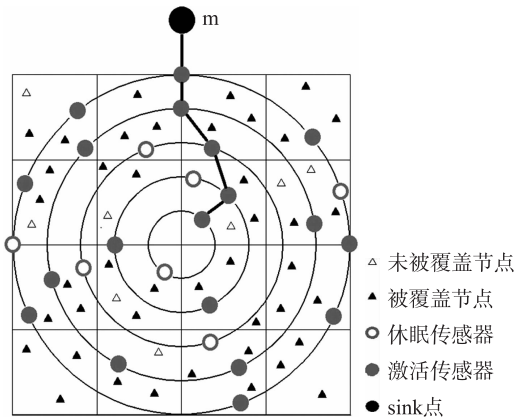


图 3 覆盖率为 90%

Fig.3 Coverage rate at 90 %

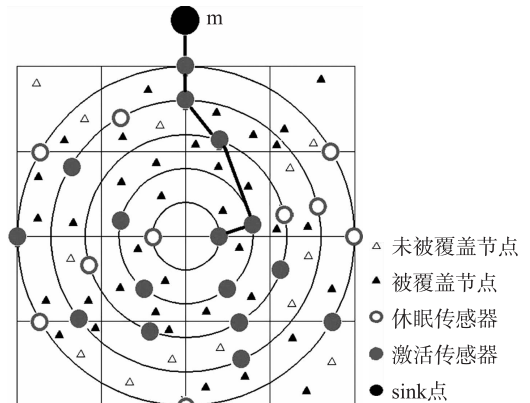


图 4 覆盖率为 75%

Fig.4 Coverage rate at 75 %

图 5 给出在监控点为 50 个的时候网络的寿命和覆盖率的关系,图 6 给出在不同的覆盖率下网络的寿命和能量消耗之间的关系. 图 7 和图 8 分别给出在 100 个监控点条件下的这两种特性图,表现出良好的性能.

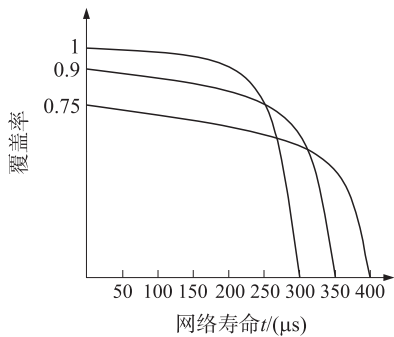


图 5 在不同覆盖率下网络的寿命(50 点)

Fig. 5 The lifetime of different coverage(50 points)

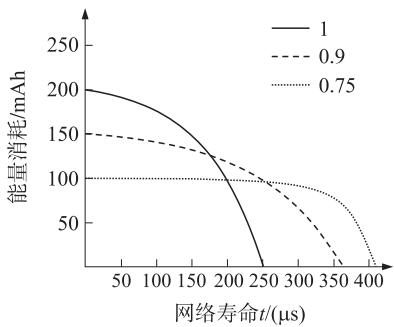


图 6 网络寿命和能量消耗(50 点)

Fig. 6 Relation of lifetime and energy consumption(50 points)

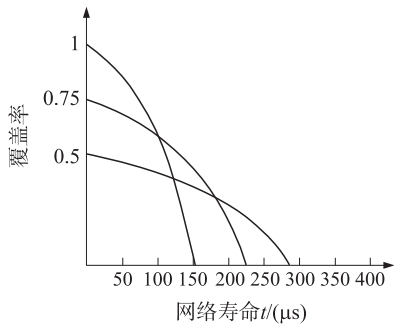


图 7 不同覆盖率下网络的寿命(100 点)

Fig. 7 The lifetime of different coverage(100 points)

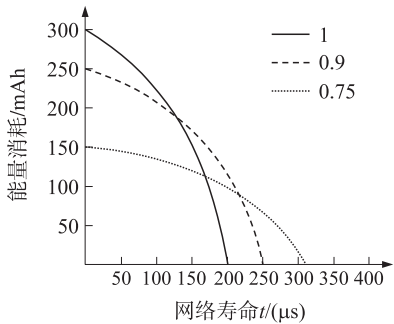


图 8 网络寿命和能量消耗(100 点)

Fig. 8 Relation of lifetime and energy consumption(100 points)

5 结论

本文基于网络寿命的限制,给出一个无线传感器网络的构建及节点调度方法,研究某些节点失效后网络的重构方法,并尽量减少重构次数,以节约全局能量,延长网络寿命. 使用了无线式总线策略,分别建立总线圆和传输总线. 无线式总线构建和使用都更灵活,同时缩短传输路径,并且屏蔽了不必要的信息交换. 设计算法遵循 Parto 最优解,减少网络瓶颈,保持能量的均衡,延长网络重构时间,整体提高网络利用率,基于一定的覆盖率使用更少的平均能耗.

本文的假设及前提使得一些情况未考虑,也使得算法并不完备,最糟的情况使得建网时的能耗很大,能量的利用率降低. 2 500 m² 的试验平面比较小,WSN 中传感器节点通常使用 Zigbee 作为无线协议,通信距离在数百 m,管理节点若使用 802. 11 等协议,通信距离通常在数千 m 以上. 该仿真参数显然与实际环境也有较大差距. 本文旨在探讨这样的一个新的结构的可行性和有效性,对比文献[3-5],得到与传统结果相同的性能,甚至优于文献[5]的结果,证明此结构的有效性. 进一步的研究是对无线式总线结构理论的深入探讨,完善本结构,并进行理论和实践的应用研究.

[参考文献](References)

[1] 凌秀泽,秦荪榛,徐寅林. 心电信号无线传输网络节点的研究与实现[J]. 南京师范大学学报:工程技术版,2012,12(3): 71-75.
Ling Xiuze, Qin Sunzhen, Xu Yinlin. Study and realization of wireless transmission network nodes of ECG[J]. Journal of Nanjing Normal University: Engineering and Technology Edition, 2012, 12(3): 71-75. (in Chinese)
[2] Mhatre V, Rosenberg C, Kofman D, et al. A minimum cost heterogeneous sensor network with a lifetime constraint[J]. IEEE Trans on Mobile Computing, 2005, 4(1): 4-15.

(下转第 62 页)

[参考文献](References)

- [1] 付主木,邱联奎,高爱云,等. 切换时滞线性系统的状态反馈 H_∞ 控制[J]. 计算机工程,2008,34(15):13-15.
Fu Zhumu, Qiu Liankui, Gao Aiyun, et al. State feedback H_∞ control for switched linear systems with delay[J]. Computer Engineering, 2008, 34(15): 13-15. (in Chinese)
- [2] Zhang Hui, Liu Yuzhong, Liu Lei. Stabilization of switched linear systems with multiple time-delays[C]//21st Chinese Control and Decision Conference. Guilin: CCDC Press, 2009: 4 583-4 587.
- [3] Lennartson B, Tittus M, Egardt B. Hybrid systems in process control[J]. IEEE Control Systems Magazine, 1996, 16(5): 45-56.
- [4] Varaiya P. Smart cars on smart roads: problems of control[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1993, 38(2): 195-207.
- [5] Hiskens I. Stability of hybrid systems limit cycles: Application to the compass gait biped robot[C]//Proceedings of the 40th IEEE Conference on Decision and Control. Orlando: Decision and Control Press, 2001: 774-779.
- [6] Azadegan M, Beheshti M, Tavassoli B. Robust output feedback control of networked control systems with random delay modeled by Markov chain[C]//20th Iranian Conference on Electrical Engineering. Tehran: ICEE Press, 2012: 587-592.
- [7] Huang D, Nguang S. State feedback control of uncertain networked control systems with random time delays[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2008, 53(3): 829-834.
- [8] Shi Y, Yu B. Output feedback stabilization of networked control systems with random delays modeled by Markov chains[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2009, 54(7): 1 668-1 674.
- [9] Xiao L, Hassibi A, How J. Control with random communication delays via a discrete-time jump system approach[J]. American Control Conference, 2000(3): 2 199-2 204.
- [10] Tian E, Yue D. A new state feedback H_∞ control of networked control systems with time-varying network conditions[J]. Journal of the Franklin Institute, 2012, 349: 891-914.
- [11] Petersen I. A stabilization algorithm for a class of uncertain linear systems[J]. Systems and Control Letters, 1987, 8(4): 351-357.
- [12] Ghaoui L E, Oustry F, Aitrami M. A cone complementarity linearization algorithm for static output-feedback and related problems[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1997, 42(8): 1 171-1 176.

[责任编辑:刘 健]

(上接第 56 页)

- [3] 底欣,张百海. 一类异类无线传感器网络节点调度问题研究[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(6): 1 364-1 369.
Di Xin, Zhang Baihai. Research on node scheduling scheme for a kind of heterogeneous wireless sensor networks[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(6): 1 364-1 369. (in Chinese)
- [4] Martins F V C, Carrano E G, Wanner E F, et al. A hybrid multiobjective evolutionary approach for improving the performance of wireless sensor networks[J]. IEEE Sensors Journal, 2011, 11(3): 545-554.
- [5] 周阳,吴宁,葛芬,等. 基于 2D Mesh 的负向优先容错路由算法研究[J]. 南京师范大学学报:工程技术版, 2012, 12(3): 76-79.
Zhou Yang, Wu Ning, Ge Fen, et al. The negative-first and fault-tolerant routing algorithm based on 2D mesh in NoC[J]. Journal of Nanjing Normal University: Engineering and Technology Edition, 2012, 12(3): 76-79. (in Chinese)
- [6] 秦磊榛,凌秀泽,徐寅林. 基于无线传感网络的血氧实时监测系统的研究与设计[J]. 南京师范大学学报:工程技术版, 2012, 12(4): 39-43.
Qin Sunzhen, Ling Xiuze, Xu Yinlin. Research and design of real-time blood oxygen monitoring system based on wireless sensor network[J]. Journal of Nanjing Normal University: Engineering and Technology Edition, 2012, 12(3): 39-43. (in Chinese)
- [7] Srinivas A, Modiano E. Minimum energy disjoint path routing in wireless ad-hoc networks[C]//The 9th Annual Int Conf on Mobile Computing and Networking. New York: ACM Press, 2003: 122-133.
- [8] Bandyopadhyay S, Coyle E. An energy-efficient hierarchical clustering algorithm for wireless sensor networks[C]//Proc of the IEEE INFOCOM. San Francisco: IEEE Computer Society, 2003: 1713-1723.
- [9] 郝晓辰,贾楠,刘彬. 基于能效优化的 WSNs 多径流量分配路由算法[J]. 电子与信息学报, 2011(7): 1 568-1 574.
Hao Xiaochen, Jia Nan, Liu Bin. Multipath flow allocating routing algorithm based on energy efficiency optimization in wireless sensor networks[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2011(7): 1 568-1 574. (in Chinese)

[责任编辑:刘 健]