

文章编号: 1001-0920(2011)05-0781-04

基于数据融合的传感器网络寿命最优路由策略

刘志新, 袁会美, 薛亮, 关新平

(燕山大学 电气工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘要: 引入数据融合率来定义传感器网络中节点的融合能力, 并提出一种基于数据融合技术的分布式最优路由算法, 最大化网络的寿命. 将路由决策过程描述为线性规划问题, 采用子梯度算法求取最优解, 得到了分布式的优化算法. 仿真结果表明, 该算法可有效减少数据通信量, 均衡各个节点的能量消耗, 延长网络寿命.

关键词: 传感器网络; 数据融合; 路由算法; 网络寿命

中图分类号: TP393

文献标识码: A

Optimal routing scheme to extend lifetime of wireless sensor networks based on data aggregation

LIU Zhi-xin, YUAN Hui-mei, XUE Liang, GUAN Xin-ping

(Institute of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China. Correspondent: LIU Zhi-xin, E-mail: lzxauto@ysu.edu.cn)

Abstract: The data aggregation rate is presented to denote the compressing capability of a sensor node in the sensor networks, and the distributed algorithm is proposed based on data aggregation to achieve an optimal routing scheme that maximizes the network lifetime. The problem is formulated as a linear programming problem, and sub-gradient algorithm is used to solve it in a distributed manner. The simulation results show that the proposed algorithm can reduce data traffic, balance energy consumption, and prolong the network lifetime effectively.

Key words: wireless sensor network; data aggregation; routing algorithm; network lifetime

1 引言

近年来, 随着无线传感器网络节能研究的不断深入, 能量有效的算法在无线网络路由协议设计中受到广泛关注. 大多数节能路由协议^[1-3]仅关注网络的总能量消耗最小, 通过设置链路代价来寻求能耗最小的路径传输数据. 但是这些工作忽略了节点间能量消耗的均衡问题, 有可能导致网络中某些节点因能量消耗过快而死亡. 为了平衡网络中节点的剩余能量, 文献[4-6]以最大化网络的寿命为研究目标. [5]给出了一种分布式二分搜索最大化寿命路由算法, 但计算复杂度非常高. [6]将网络寿命最大化问题描述成一个线性规划问题, 并使用对偶分解算法加以解决.

然而, 以上路由算法中继节点只是转发来自其他节点的数据, 而不承担数据处理功能. 在传感器网络实际应用中, 感知节点按照固定的采样频率来发送采样数据, 会造成大量的重复冗余的数据, 同时网络功

耗主要来自通信能耗, 因此造成系统的能量和带宽资源的浪费. 数据融合技术能够在传感器节点收集数据的过程中, 利用节点处理数据的融合去除冗余信息, 从而达到节能的目的.

本文考虑传感器网络节点发送数据的冗余性, 将数据融合技术引入路由协议的优化设计中, 提出一种新的基于数据融合的传感器网络寿命最优路由模型, 并设计了分布式算法求解最优解. 通过仿真实验验证了该算法具有较低的复杂度并且能保证收敛到最优解. 实验结果表明将数据融合技术应用于传感器网络的路由协议中, 可以有效地减少数据通信量, 降低能耗, 延长网络的寿命.

2 模型建立及求解

2.1 差异化加权数据融合机制

用 $G(V, L)$ 来表示传感器网络, 其中 V 是网络中

收稿日期: 2010-03-15; 修回日期: 2010-05-15.

基金项目: 国家973重点基础研究发展规划项目(2010CB731800); 国家自然科学基金项目(60804030, 60974123); 河北省科技支撑配套项目(072435155D); 河北省教育厅基金项目(2008147); 燕山大学博士基金项目(B286).

作者简介: 刘志新(1976-), 男, 副教授, 从事控制理论与应用、网络拥塞控制等研究; 袁会美(1983-), 女, 硕士生, 从事无线传感器网络优化设计的研究.

所有传感器节点的集合, L 是网络中所有链路的集合. 令 l_{ij} 表示节点 i 和节点 j 之间的链路, 对于链路 l_{ij} 相应的链路流量为 r_{ij} . 令 R_{ij} 为链路 l_{ij} 允许通过的数据流上限.

假设网络中传感器节点具有数据融合能力, 当节点接收到邻居节点发送的数据后, 按照相应的融合机制将收到的数据进行融合, 再发送给下一节点. 本文采用基于差异化加权数据融合机制来处理数据^[7]. 该数据融合机制将不同邻居节点的数据赋以不同的权值来进行数据融合, 有效地降低了噪声数据的干扰, 提高了数据融合的精度. 算法中以其距离的倒数作为其权值. 例如, 节点 j 距离融合点 i 的距离为 d_{ji} , 则其发送数据的权值为 $1/d_{ji}$; 能够与节点 i 进行通信的节点称为其邻居节点, 用 N_i 表示节点 i 所有邻居节点的集合, r_{ji} 表示节点 j 向节点 i 的数据发送速率, 如图 1 所示.

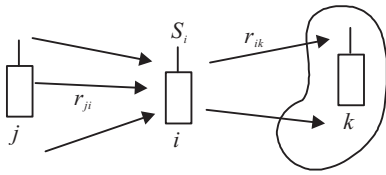


图 1 节点 i 的流量平衡示意图

本文引入数据融合率 (DAR) 的概念表示传感器节点的融合能力, 即

$$\delta_{ji} = \frac{1/d_{ji}}{\sum_{j \in N_i} (1/d_{ji})}. \quad (1)$$

当 $\delta = 1$ 时, 表示节点 i 对接收到的数据包没有进行融合处理, 则其融合后数据 \hat{b}_i 如下所示:

$$\hat{b}_i = \sum_{j \in N_i} \delta_{ji} r_{ji}. \quad (2)$$

令 S_i 为节点 i 在单位时间内自身所产生的流量, 则对于任意节点 i 应满足流量平衡条件, 即从邻居节点所收集到并进行融合的数据与自己感知的数据之和应等于它所发送的数据, 记作

$$\sum_{j \in N_i} \delta_{ji} r_{ji} + S_i = \sum_{j \in N_i} r_{ij}. \quad (3)$$

2.2 能量约束路由问题的数学模型

定义传感器网络寿命为网络中所有传感器节点的最短寿命^[8], 用 T_i 表示网络中节点 i 的寿命, 即该节点耗尽能量的时刻, 则网络寿命可表示为

$$\begin{cases} T_i = \frac{B_i}{\sum_{j \in N_i} (E_{ij} r_{ij} + E_{ji} r_{ji})}, \\ T_{\text{net}} = \min_{i \in N} T_i. \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\sum_{j \in N_i} (E_{ij} r_{ij} + E_{ji} r_{ji})$ 表示网络中节点 i 的平均

功耗 (这里仅考虑通信能耗), E_{ij} 表示节点 i 向节点 j 发送单位数据消耗的能量, E_{ji} 表示节点 i 从节点 j 接收单位数据消耗的能量, B_i 为节点 i 的初始能量.

相应地, 网络寿命最大化问题可描述为

$$\begin{aligned} \max T_{\text{net}} \\ \text{s.t.} \begin{cases} \sum_{j \in N_i} (r_{ij} - \delta_{ji} r_{ji}) = S_i, \forall i \in V; \\ 0 \leq r_{ij} \leq R_{ij}, \forall i \in V, \forall j \in N_i; \\ T_{\text{net}} \sum_{j \in N_i} (r_{ij} - \delta_{ji} r_{ji}) \leq B_i, \forall i \in V. \end{cases} \end{aligned} \quad (5)$$

令 $q = 1/T_{\text{net}}$, 则上述问题可转化为如下线性优化问题

$$\begin{aligned} \min q \\ \text{s.t.} \begin{cases} \sum_{j \in N_i} (r_{ij} - \delta_{ji} r_{ji}) = S_i, \forall i \in V; \\ 0 \leq r_{ij} \leq R_{ij}, \forall i \in V, \forall j \in N_i; \\ \sum_{j \in N_i} (r_{ij} - \delta_{ji} r_{ji}) \leq q B_i, \forall i \in V. \end{cases} \end{aligned} \quad (6)$$

2.3 对偶方法求解优化问题

下面通过其对偶问题求解优化解, 并得出相应的分布式路由算法. 目标函数 (6) 并不是严格凸函数, 而导致对偶函数的可微特性难以保证. 本文采用类似于文献 [9] 的方法, 将目标函数 q 转换为 q^2 , 同时再加上一个具有凸特性的小的正则项 $\varepsilon \sum_{i \in V} \sum_{j \in N_i} r_{ij}^2$, 但不影响最优问题求解.

定理 1 优化问题 (6) 的目标函数加上一个具有凸特性的最小正则项 $\varepsilon \sum_{i \in V} \sum_{j \in N_i} r_{ij}^2$, 则修正后目标函数的最优解可以任意精度逼近原优化问题的最优解, 其中 ε 为任意小的正数.

证明 定义 \hat{q}, \hat{r} 为正则后目标函数的优化解, \tilde{q}, \tilde{r} 为原线性优化问题优化解, 则有

$$\hat{q}^2 + \varepsilon \sum_{i \in V} \sum_{j \in N_i} R_{ij}^2 \geq \hat{q}^2 + \varepsilon \sum_{i \in V} \sum_{j \in N_i} \hat{r}_{ij}^2 \Rightarrow$$

$$\hat{q}^2 \leq \hat{q}^2 + \varepsilon \sum_{i \in V} \sum_{j \in N_i} R_{ij}^2 - \varepsilon \sum_{i \in V} \sum_{j \in N_i} \hat{r}_{ij}^2 \Rightarrow$$

$$\frac{1}{\hat{q}^2} \geq \frac{1}{\hat{q}^2 + \varepsilon \sum_{i \in V} \sum_{j \in N_i} R_{ij}^2 - \varepsilon \sum_{i \in V} \sum_{j \in N_i} \hat{r}_{ij}^2},$$

$$\hat{T}^2 \geq \frac{\tilde{T}^2}{1 + \varepsilon \tilde{T}^2 \left(\sum_{i \in V} \sum_{j \in N_i} R_{ij}^2 - \sum_{i \in V} \sum_{j \in N_i} \hat{r}_{ij}^2 \right)}.$$

由上式可知, 当 ε 取得足够小时, 函数 $\min \left\{ q^2 + \varepsilon \sum_{i \in V} \sum_{j \in N_i} r_{ij}^2 \right\}$ 的优化解可以任意精度逼近 (6) 的解.

通过采用拉格朗日乘子松弛原问题的约束, 可以得到修正后优化问题的拉格朗日函数如下:

$$L(q, r, \lambda, \eta) = - \sum_{i \in V} \eta_i S_i + q^2 - q \sum_{i \in V} \lambda_i B_i + \sum_{i \in V} \sum_{j \in N_i} (\varepsilon r_{ij}^2 + r_{ij}(\lambda_i E_{ij} + \lambda_j E_{ji} + \eta_i - \delta_{ji} \eta_j)). \quad (7)$$

其中: λ 和 η 是拉格朗日乘子, 且 $\lambda_i > 0$, $\eta_i > 0$, 参考经济学的概念, 对其分别解释为网络节点能量价格和链路流量价格。

根据上面的拉格朗日函数, 可以将原优化问题的对偶函数表示成

$$g(\lambda, \eta) = - \sum_{i \in V} \eta_i S_i + \min_{0 \leq q \leq Q} \left(q^2 - q \sum_{i \in V} \lambda_i B_i \right) + \sum_{i \in V} \sum_{j \in N_i} \min_{0 \leq r_{ij} \leq R_{ij}} (\varepsilon r_{ij}^2 + r_{ij}(\lambda_i E_{ij} + \lambda_j E_{ji} + \eta_i - \delta_{ji} \eta_j)). \quad (8)$$

对偶问题描述如下:

$$\begin{aligned} \max \quad & g(\lambda, \eta), \\ \text{s.t.} \quad & \lambda \geq 0. \end{aligned} \quad (9)$$

采用子梯度投影算法求解对偶问题, 迭代规则为

$$\begin{aligned} q^{(k)} &= \arg \min_{0 \leq q \leq Q} \left(q^2 - q \sum_{i \in V} \lambda_i^{(k)} B_i \right), \quad (10) \\ r_{ij}^{(k)} &= \arg \min_{0 \leq r_{ij} \leq R_{ij}} \{ \varepsilon r_{ij}^2 + r_{ij}(\lambda_i^{(k)} E_{ij} + \lambda_j^{(k)} E_{ji} + \eta_i^{(k)} - \delta_{ji} \eta_j^{(k)}) \}. \quad (11) \end{aligned}$$

其中: 对偶函数在 $(\lambda^{(k)}, \eta^{(k)})$ 的子梯度为

$$\begin{aligned} h_i^{(k)} &= q^{(k)} B_i - \sum_{j \in N_i} (E_{ij} r_{ij}^{(k)} + E_{ji} r_{ji}^{(k)}), \\ d_i^{(k)} &= S_i - \sum_{j \in N_i} (r_{ij}^{(k)} - \delta_{ji} r_{ji}^{(k)}). \quad (12) \end{aligned}$$

2.4 算法描述

Step 1: 初始化变量. 设置迭代次数“ k ”从零开始, 最大迭代次数为 I ; 节点 $i (i \in V)$ 根据式 (1) 计算每条上游链路的数据融合率 δ_{ji} , $j \in N_i$, 并存储相应信息; 初始化迭代因子 λ, η .

Step 2: 链路流量更新. 根据式 (11), 每个节点 i 根据本地信息和交互邻居节点的信息计算与邻居节点每条链路的流量 r_{ij} .

Step 3: 网络寿命倒数更新. 根据式 (10), Sink 节点根据能量价格信息计算网络寿命的倒数数值.

Step 4: 能量价格和链路流量价格更新.

$$\begin{aligned} \lambda^{(k+1)} &= \left[\lambda^{(k)} - \alpha^{(k)} \left(q^{(k)} B_i - \sum_{j \in N_i} (E_{ij} r_{ij}^{(k)} + E_{ji} r_{ji}^{(k)}) \right) \right]^+, \end{aligned}$$

$$\eta^{(k+1)} = \eta^{(k)} - \alpha^{(k)} \left(S_i - \sum_{j \in N_i} (r_{ij}^{(k)} - \delta_{ji} r_{ji}^{(k)}) \right). \quad (13)$$

其中: α 是迭代步长, 且满足 $\alpha > 0$; $[\cdot]^+$ 表示若括号中的数值为非负实数, 则映射结果是它本身; 若括号中的数值为小于零的值, 则映射结果为零。

Step 5: 检测是否满足迭代收敛条件. 若满足, 则停止迭代; 若不满足, 则转至 Step 2.

显然, 当迭代步长 α 满足 $\alpha^{(k)} \rightarrow 0$, $\sum_{k=1}^{\infty} \alpha^{(k)} = \infty$ 时, 算法中的对偶变量能够收敛到对偶问题 (9) 的最优解 (λ^*, η^*) , 具体证明过程可参考文献 [10].

3 性能分析

3.1 无线通信能量模型

为了研究网络中节点能量消耗, 本节采用文献 [11] 中节点能量消耗模型来描述网络中节点能量的变化情况. 传感器网络节点之间是靠无线电进行通信, 发送数据包消耗能量包括发射电路耗能、放大电路耗能两部分, 接收数据只有接收电路消耗能量^[4], 节点能量消耗数学模型可表示如下:

$$\begin{cases} E_{ij} = E_{\text{elec}} + \varepsilon_{fs} d_{ij}^n, \\ E_{ji} = E_{\text{elec}}. \end{cases} \quad (14)$$

其中: E_{elec} 表示发射电路和接收电路的能耗; ε_{fs} 是常数, 表示功率放大所需能量; n 是路径损耗系数, 且 $2 \leq n \leq 4$. 上述参数典型值为当 $n = 4$ 时, $E_{\text{elec}} = 50 \text{ nJ/bit}$, $\varepsilon_{fs} = 0.0013 \text{ nJ/bit/m}^4$.

3.2 仿真实验及分析

为了验证算法的性能, 本文利用 Matlab 进行仿真. 在 $40 \text{ m} \times 40 \text{ m}$ 的感知区域内随机分布了 6 个节点, 设置 Sink 节点的坐标为 (2, 5), 节点最大通讯距离为 20 m. 网络中所有节点均为源节点, 并假设所有节点的初始能量和源速率相等, 令 $B = 10 \text{ J}$, $S = 1.0 \times 10^4 \text{ bps}$. 每个传感器节点将其收集的数据经过多跳方式传输到 Sink 节点. 所有迭代计算的初值都是在变量取值区间内取均匀分布的随机值。

将本文算法与不考虑数据融合的网络寿命最优路由协议^[6]和最小跳最大剩余能量 (MinHMaxE) 路由协议进行比较, 可以得到应用本文提出的基于数据融合的路由优化算法, 网络寿命为 $3.92 \times 10^3 \text{ s}$; 而应用 MinHMaxE 和文献 [6] 中路由优化算法的寿命分别为 $3.20 \times 10^3 \text{ s}$, $3.48 \times 10^3 \text{ s}$. 由此可见, 本文的算法与其他两种路由算法相比, 能够有效延长网络的生存时间。

在 3 种路由机制下网络中各节点的寿命如图 2 所示. 将网络寿命定义为第 1 个死亡节点的寿命, 该节点成为网络的瓶颈节点. 从图 2 可以看出, 在前两种路由算法中, 距离 Sink 节点较近的节点 1 最先死

亡,是网络的瓶颈节点;而采用本文的算法后,节点6却成了网络的瓶颈节点.这是由于在本文算法中,节点1对接收的数据进行数据融合,能量消耗相对减慢,节点6却成为了能量消耗最快的节点.可见本文提出的算法可以均衡网络节点间的能量消耗.

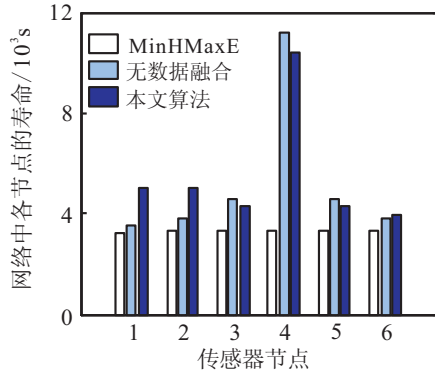


图2 不同路由机制下网络中各节点的寿命

为了研究本文算法中瓶颈节点对网络寿命的影响,进行如下实验.针对本文提出的算法,令节点6的源速率 $S_6 = 0$,而针对文献[6]中路由优化算法,令节点1的源速率 $S_1 = 0$,则两种路由机制在不同速率条件下的网络寿命收敛曲线如图3所示.当把网络中瓶颈节点的源速率设为零,网络寿命会明显增大,验证了瓶颈节点对网络寿命的限制作用,并且图3显示了本文算法具有很好的收敛性能.

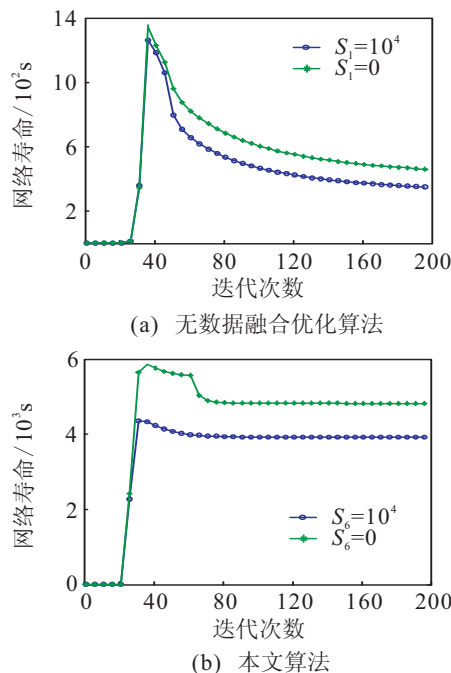


图3 不同速率条件下网络寿命收敛曲线

在 $40\text{m} \times 40\text{m}$ 的区域内随机分布不同数量的传感器节点,分别利用3种路由算法进行寿命比较.图4为在感知区域内,分别随机分布6,8,10,12,14个节点,通过10次测试获得的平均网络寿命对比.由图4可见,本文算法在节点数目增多的情况下,依然具有很好的性能.

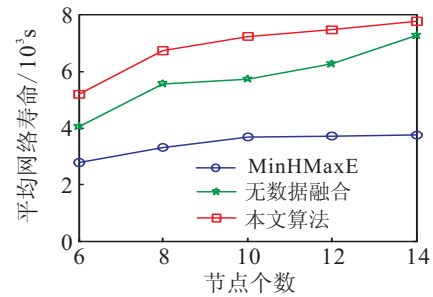


图4 不同路由机制下平均网络寿命

4 结论

本文将数据融合技术引入无线传感器网络路由协议设计,以求进一步延长网络的寿命.基于凸优化理论,提出了一种基于数据融合的路由优化模型,通过数学分析,获得了分布式优化算法.仿真结果表明,相比于MinHMaxE和无数据融合路由优化算法,本文算法能有效节约能量,均衡能耗,延长网络的寿命.

参考文献(References)

- [1] Intanagonwivat C, Govindan R, Estrin D, et al. Directed diffusion for wireless sensor networking[J]. *IEEE/ACM Trans on Networking*, 2003, 11(1): 2-16.
- [2] Lindsey S, Raghavendra C S. PEGASIS: Power-efficient gathering in sensor information systems[C]. *Proc of IEEE Aerospace Conference*. Montana: IEEE Press, 2002: 1125-1130.
- [3] Ye F, Luo H Y, Cheng J, et al. A two-tier data dissemination model for large-scale wireless sensor networks[C]. *Proc of the 8th Annual Int Conf on Mobile Computing and Networking*. Atlanta: ACM, 2002: 148-159.
- [4] Chang J H, Tassiulas L. Energy conserving routing in wireless ad-hoc networks[C]. *Proc of IEEE INFOCOM*. USA: IEEE Press, 2002: 22-31.
- [5] Schumacher A, Orponen P, Thaler T, et al. Lifetime maximization in wireless sensor networks by distributed binary search[C]. *Proc of The 5th European Conf on Wireless Sensor Networks*. Berlin: Springer-Verlag, 2008: 237-252.
- [6] Madan R, Lall S. Distributed algorithms for maximum lifetime routing in wireless sensor networks[J]. *IEEE Trans on Wireless Communications*, 2006, 5(8): 2185-2193.
- [7] 刘刚, 李志刚, 周兴社. 传感器网络中基于差异化加权数据压缩的汇聚算法[J]. *传感技术学报*, 2007, 20(7): 1610-1615.
(Liu G, Li Z G, Zhou X S. Event driven aggregation algorithms for wireless sensor network[J]. *Chinese J of Sensors and Actuators*, 2007, 20(7): 1610-1615.)

(下转第793页)