

文章编号: 1001-0920(2013)04-0609-04

## 无线传感器网络中最大化网络寿命的数据聚合路由

单立群, 汪晋宽, 刘志刚, 杜瑞燕

(东北大学 信息科学与工程学院, 沈阳 110819)

**摘要:** 针对数据聚合无线传感器网络寿命最大化问题, 分析了网络流量和节点能耗, 提出了数据聚合路由问题的网络流量模型, 并将网络最大寿命与流量模型相结合设计了一组混合整数规划代价函数. 采用对偶分解的方法, 获得了近似最优的中继传输速率和路由. 仿真实验表明, 该算法能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:** 无线传感器网络; 数据聚合; 路由; 最大化网络寿命; 次梯度

中图分类号: TP393

文献标志码: A

## Maximum lifetime routing with data aggregation in wireless sensor networks

SHAN Li-qun, WANG Jin-kuan, LIU Zhi-gang, DU Rui-yan

(College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Correspondent: WANG Jin-kuan, E-mail: wjk@neuq.edu.cn)

**Abstract:** In this paper, the optimal data aggregation routing for maximizing the network lifetime in wireless sensor networks (WSNs) is investigated. By analyzing network traffic and power consumption, a network flow model is proposed for data aggregated WSNs. Maximum lifetime and network flow model are combined to design a group of mixed integer programming cost function. The approximate optimal relay transmission rate and data aggregation routing are obtained by utilizing the dual decomposition method. 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 networks; data aggregation; routing; maximize the network lifetime; subgradient

### 0 引言

无线传感器网络 (WSN) 的基本操作是监测物理环境, 处理感知的信息, 并将结果传输到特定的汇聚节点进一步处理. 由于 WSN 是由低功耗和能量受限的传感器节点组成, WSN 研究中的一个关键问题是设计节能协议, 以最大限度地提高网络寿命<sup>[1-4]</sup>. 数据聚合允许节点在转发数据过程中去除数据中的冗余信息, 进行数据压缩, 从而减少传输能耗和延长网络寿命. 数据聚合与路由相结合 (数据聚合路由) 能为提高网络生存时间提供重要依据, 已成为近几年无线传感器网络研究中的热点问题. 文献 [5] 构造了网络寿命最大化的最短路径聚合树, 而在单径数据聚合路由策略下优化网络能耗问题是 NP-hard 问题<sup>[6]</sup>. MEGA (minimum energy gathering algorithm) 算法<sup>[7]</sup>是

一种基于生成树的聚合路由算法, 通过编码树选择执行数据聚合操作的节点. 文献 [8] 将最大化网络寿命问题描述成一个多商品流问题, 并给出了一种快速近似算法. 文献 [9] 将网络寿命优化问题建模为一个线性规划问题, 并使用对偶分解算法求解最优的传输速率. MLR (maximum lifetime routing) 算法<sup>[10]</sup>采用地理位置路由, 通过将数据分流到多个邻居节点均衡网络流量, 并通过最优化方法对网络寿命和聚合数据率进行优化. 文献 [11] 综合考虑了路由和节点的休眠调度以最大化网络寿命. 文献 [12] 根据节点数据相关性, 提出了寿命最大化的路由博弈模型.

上述路由算法没有考虑网络中的数据聚合和链路容量约束. 由于无线传感器网络中链路容量是一个重要的约束, 忽略链路容量约束易导致网络拥塞<sup>[13]</sup>.

收稿日期: 2012-02-08; 修回日期: 2012-03-28.

基金项目: 国家自然科学基金项目(60874108); 河北省自然科学基金项目(F2011501021).

作者简介: 单立群(1977-), 女, 博士, 从事无线传感器网络数据聚合技术的研究; 汪晋宽(1957-), 男, 教授, 博士生导师, 从事自适应信号处理、移动通信关键技术等研究.

本文考虑了链路容量的约束, 研究采用网内数据聚合的无线传感器网络寿命最大化路由问题, 通过对网络流量和节点能耗的分析, 将最大化网络寿命路由问题归结为一个混合整数规划问题进行求解. 在此基础上, 采用次梯度方法设计了相应的分布式算法, 并给出了近似最优的中继传输速率和路由.

## 1 网络模型和问题提出

### 1.1 网络模型

WSN可表示为一个无向图 $G = (V, E)$ . 其中: $V$ 为网络中所有传感器节点集,  $E$ 为网络中链路集合.  $N_{in}(i)$ 和 $N_{out}(i)$ 分别表示节点 $i$ 的输入节点集合和输出节点集合;  $d_{ij}$ 表示节点 $i$ 与节点 $j$ 之间的距离;  $l_{ij}$ 表示节点 $i$ 与节点 $j$ 之间的链路,  $l_{ij} \in E$ . 假设每个节点使用相同的传输半径 $R$ , 网络中传感器节点具有数据聚合能力.

采用文献[10]中的数据聚合模型, 每个节点对从邻居接收到的数据执行两个不同的操作. 对于邻居所产生的原始数据, 使用本地信息进行数据编码; 对于中继数据, 它直接将数据转发到下一跳邻居. 假设链路 $l_{ij}$ 上原始数据产生速率为 $r_{ij}$ , 中继数据率为 $t_{ij}$ , 网络中的中继数据流满足约束

$$\sum_{j \in N_{out}(i)} e_{ij} t_{ij} = \sum_{j \in N_{in}(i)} e_{ji} [t_{ji} + r_{ji}(1 - \rho_{ji})]. \quad (1)$$

其中:  $r_{ji}(1 - \rho_{ji})$ 为输入节点 $j$ 的原始数据经过压缩之后所得到的聚合数据率;  $\rho_{ji} = \exp(-\theta d_{ji}^2)$ 为节点 $i$ 和 $j$ 之间的数据相关系数<sup>[14]</sup>;  $\theta$ 为相关性参数,  $\theta$ 越大, 相关性越小, 反之, 则越大;  $e_{ij}$ 为路由变量,  $e_{ij} = 1$ 表示节点 $j$ 中继节点 $i$ 的流量,  $e_{ij} = 0$ 表示节点 $j$ 不中继节点 $i$ 的流量.

采用同步直接序列CDMA(DS-CDMA), 使用一个变化的扩频序列长度 $L$ , 即

$$L_{ij} = \frac{\gamma \left[ \sum_{k=1, k \neq i, j}^N h_{ij} P_k \right]}{h_{ij} P_i - \gamma \sigma^2}. \quad (2)$$

其中:  $h_{ij} = 1/d_{ij}^2$ 为链路增益,  $\sigma^2$ 为热噪声,  $\gamma$ 为目标信干比SIR,  $P_i$ 为节点 $i$ 的传输功率, 节点 $i$ 和 $j$ 之间的最大传输速率 $v_{ij} = W/L_{ij}$ ,  $W$ 为系统带宽. 链路 $l_{ij}$ 上的流量满足约束

$$(t_{ij} + r_{ij})e_{ij} \leq v_{ij}, \quad \forall i \in V, j \in N_{out}(i). \quad (3)$$

采用文献[15]中的无线电波能量模型, 节点 $i$ 向节点 $j$ 发送单位数据所需的能耗表示为 $p_{ij}^t$ , 节点 $i$ 从节点 $j$ 接收单位数据所需的能耗表示为 $p_{ij}^r$ . 其中:  $p_{ij}^r = \varepsilon_{elec}$ ,  $p_{ij}^t = \varepsilon_{elec} + \varepsilon_{amp} d_{ij}^\alpha$ .  $\varepsilon_{elec}$ 为驱动发射机或接收机所需要的能耗;  $\varepsilon_{amp}$ 为发射机功率增

益; 而 $\alpha$ 为无线链路损耗系数, 取值范围通常为 $2 \leq \alpha \leq 4$ . 对于网络中的任意节点 $i \in V$ , 其能耗为

$$p_i = \sum_{j \in N_{out}(i)} (t_{ij} + r_{ij}) p_{ij}^t e_{ij} + \sum_{j \in N_{in}(i)} (t_{ji} + r_{ji}) p_{ji}^r e_{ji}. \quad (4)$$

网络最大寿命通常指网络中第1个耗尽能量的节点的生命期, 网络中节点 $i$ 的剩余能量为 $E_i$ (单位:  $J$ ), 于是有

$$T = \min\{T_i = E_i/p_i, i \in V\}, \quad (5)$$

其中 $T_i$ 为生命周期指数.

### 1.2 问题提出

网络的最大寿命聚合路由问题可归结为如下优化问题:

$$\begin{aligned} & \max T. \\ & \text{s.t. } p_i T_i \leq E_i, \quad \forall i \in V; \\ & (t_{ij} + r_{ij})e_{ij} \leq v_{ij}, \quad \forall i \in V, j \in N_{out}(i); \\ & \sum_{j \in N_{out}(i)} e_{ij} = 1, \quad \forall i \in V; \\ & e_{ij} \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in V, j \in N_{out}(i). \end{aligned} \quad (6)$$

定义节点 $i$ 的通信次数为其生命周期指数 $T_i$ 的函数, 即

$$U_i(T_i) = \ln \frac{1}{T_i}. \quad (7)$$

其中:  $T_i = E_i/p_i$ , 而

$$U_i(T_i) = \ln \left[ \left( \sum_{j \in N_{out}(i)} (t_{ij} + r_{ij}) p_{ij}^t e_{ij} + \sum_{j \in N_{in}(i)} (t_{ji} + r_{ji}) p_{ji}^r e_{ji} \right) / E_i \right].$$

文献[16]和[17]表明, 解决max-min问题相当于解决最大化 $\sum_{i \in V} U_i$ .

重新定义最大化网络寿命的问题为

$$\begin{aligned} & \max \sum_{i \in V} U_i. \\ & \text{s.t. } p_i T_i \leq E_i, \quad \forall i \in V; \\ & (t_{ij} + r_{ij})e_{ij} \leq v_{ij}, \quad \forall i \in V, j \in N_{out}(i); \\ & \sum_{j \in N_{out}(i)} e_{ij} = 1, \quad \forall i \in V; \\ & e_{ij} \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in V, j \in N_{out}(i). \end{aligned} \quad (8)$$

## 2 最大寿命聚合路由算法

通过对偶分解的方法, 设计最大寿命聚合路由MLAR(maximum lifetime aggregation routing)算法, 获得近似最优的中继传输速率和路由.

## 2.1 传输速率分配和路由选择

最优化问题(8)同时含有连续的传输速率变量  $t_{ij}$  和离散的路由选择变量  $e_{ij}$ , 这是非凸优化问题, 其部分拉格朗日函数为

$$L(\mathbf{t}, \mathbf{e}, \boldsymbol{\lambda}) = \sum_{i \in V} l(t_{ij}, e_{ij}, \lambda_{ij}) + \sum_{i \in V, j \in N_{\text{out}}(i)} \lambda_{ij} v_{ij}. \quad (9)$$

其中

$$l(t_{ij}, e_{ij}, \lambda_{ij}) = \ln \left[ \left( \sum_{j \in N_{\text{out}}(i)} (t_{ij} + r_{ij}) p_{ij}^t e_{ij} + \sum_{j \in N_{\text{in}}(i)} (t_{ji} + r_{ji}) p_{ji}^r e_{ji} \right) / E_i \right] - \sum_{j \in N_{\text{out}}(i)} \lambda_{ij} (t_{ij} + r_{ij}) e_{ij},$$

$\lambda_{ij}$  为节点  $i$  传输速率约束的拉格朗日乘子. 根据拉格朗日函数, 式(8)可转化为如下形式的最优化问题:

$$\begin{aligned} \max \quad & L(\mathbf{r}, \mathbf{e}, \boldsymbol{\lambda}). \\ \text{s.t.} \quad & \sum_{j \in N_{\text{out}}(i)} e_{ij} = 1, \quad \forall i \in V; \\ & e_{ij} \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in V, j \in N_{\text{out}}(i). \end{aligned} \quad (10)$$

假设  $g(\lambda) = \max_{\mathbf{t}, \mathbf{e}} L(\mathbf{t}, \mathbf{e}, \boldsymbol{\lambda})$ , 可将最优化问题(10)转化为如下对偶优化问题:

$$\begin{aligned} \min \quad & g(\lambda); \\ \text{s.t.} \quad & \lambda_{ij} \geq 0, \quad \forall i \in V, j \in N_{\text{out}}(i). \end{aligned} \quad (11)$$

对偶问题(11)可分解为以下3个子问题.

### 1) 传输速率分配.

给定拉格朗日乘子  $\lambda_{ij}$ , 对于任意的  $t$  和  $i \in V$ , 通过最优化  $l$ , 可获得最优的传输速率  $t_{ij}$ . 令  $t_{ij}^*$  和  $l^*$  分别表示最优变量, 可得

$$t_{ij}^* = \arg \max_{t_{ij}} l(t_{ij}, e_{ij}, \lambda_{ij}) = \min \left\{ \max \left\{ \frac{1}{\lambda_{ij}} - \frac{\sum_{j \in N_{\text{in}}(i)} (t_{ji} + r_{ji}) p_{ji}^r e_{ji}}{p_{ij}^t}, 0 \right\}, v_{ij} - r_{ij} \right\}, \quad (12)$$

以及

$$l^*(e_{ij}, \lambda_{ij}) = l(t_{ij}^*, e_{ij}, \lambda_{ij}) = \begin{cases} 0, & t_{ij}^* = 0; \\ \ln \left[ \left( \sum_{j \in N_{\text{out}}(i)} (t_{ij}^* + r_{ij}) p_{ij}^t e_{ij} + \sum_{j \in N_{\text{in}}(i)} (t_{ji}^* + r_{ji}) p_{ji}^r e_{ji} \right) / E_i \right] - \lambda_{ij} (t_{ij}^* + r_{ij}) e_{ij}, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (13)$$

式(12)表示最优的速率应大于0且小于式(3)所示的中继可以提供的最大速率.

### 2) 中继选择.

给定最优的  $l^*(e_{ij}, \lambda_{ij})$ , 其中  $t_{ij} \in \mathbf{t}$ , 每个用户的最优中继选择为

$$e_{ij}^* = \arg \max_{e_{ij}} l^*(e_{ij}, \lambda_{ij}), \quad (14)$$

以及

$$l^{**}(\lambda_{ij}) = \max_{e_{ij}} l^*(e_{ij}, \lambda_{ij}). \quad (15)$$

### 3) 乘子更新.

计算最优的乘子  $\lambda_{ij}$ , 使得最优化问题(11)中的对偶函数  $g(\lambda)$  最小, 计算表达式如下:

$$\lambda_{ij}^* = \arg \min_{\lambda_{ij} \geq 0} \left( \sum_{i \in V, j \in N_{\text{out}}(i)} l^{**}(\lambda_{ij}) + \sum_{i \in V} \sum_{j \in N_{\text{out}}(i)} \lambda_{ij} v_{ij} \right). \quad (16)$$

采用次梯度算法来获得最优的拉格朗日乘子. 令  $\Delta(\lambda_{ij})$  表示对偶函数  $g(\lambda)$  的次梯度, 即

$$\Delta(\lambda_{ij}) = (t_{ij}^* + r_{ij}) e_{ij} - v_{ij}, \quad (17)$$

相应的迭代子梯度搜索可表示为

$$\lambda_{ij}^{(t+1)} = [\lambda_{ij}^{(t)} + \delta^{(t)} \Delta(\lambda_{ij})]^+. \quad (18)$$

其中:  $t$  为算法迭代的次数,  $\delta^{(t)}$  为算法迭代的步长,  $[\cdot]^+ = \max(\cdot, 0)$ . 当对偶函数满足  $|g(\lambda^{(t+1)}) - g(\lambda^{(t)})| \leq \varepsilon$  时, 算法终止,  $\varepsilon$  是接近于0的一个很小的正数.

只要迭代步长  $\delta^{(t)}$  充分小, 子梯度迭代算法可以保证算法收敛到最优解  $\lambda_{ij}^*$ . 根据文献[18], 步长  $\delta^{(t)}$  应满足如下条件:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \delta^{(t)} = 0, \quad \lim_{T \rightarrow \infty} \sum_{t=1}^T \delta^{(t)} = \infty. \quad (19)$$

## 2.2 分布式实现

1) 初始化变量. 节点  $i$  感知与邻居节点  $j$  间的相关性参数  $\rho_{ij}$ 、最大传输速率  $v_{ij}$ 、单位传输能耗  $P_{ij}^t$  等信息. 初始化迭代因子  $\lambda_{ij}$ .

2) 在第  $t$  次迭代, 每个节点  $i$  根据本地信息和交互邻居节点信息按式(12)计算与输出节点  $j$  间的链路的传输速率  $t_{ij}$ , 并由式(14)选择最优的路由.

3) 每个节点  $i$  按式(18)更新链路  $(i, j)$  的拉格朗日乘子  $\lambda_{ij}$ .

4) 如果满足  $|g(\lambda^{(t+1)}) - g(\lambda^{(t)})| \leq \varepsilon$ , 则算法终止; 否则, 转步骤2).

## 3 仿真实验

采用 Matlab 数学工具对所提算法 MLAR 进行仿真验证, 并与 MEGA 算法和 MLR 算法进行对比. 节点在边长为 100 m × 100 m 的矩形区域内随机放置. 所有节点的最大通信距离为 20 m. 收发信机电路平均功耗  $\varepsilon_{\text{elec}} = 50$  nJ/bit, 发射机功率增益系数  $\varepsilon_{\text{amp}} =$

100 pJ/bit/m<sup>2</sup>, 路径损耗系数  $\alpha = 2$ . 采用高斯随机场模型作为数据互相关模型, 数据相关性参数  $\theta$  取值为 0.001 ~ 0.01/m<sup>2</sup>. 所有节点的初始能量均为 1 kJ, 原始数据收集速率为 1 kbps. 噪声功率  $\sigma^2 = 10^{-13}$  W, 信道带宽  $B = 1$  MHz, 目标信干比  $\gamma = 5$  dB. 所有仿真结果均为 20 个随机场景结果的平均值.

图 1 和图 2 显示了在不同传感器节点数量下网络寿命的对比结果. 数据聚合相关性参数  $\theta$  的取值分别为 0.001/m<sup>2</sup> 和 0.01/m<sup>2</sup>, 以显示不同数据相关系数对协议的影响. 从图 1 和图 2 可以看出, MLAR 算法的性能优于 MLR 算法的性能, 而 MEGA 算法的性能最差. MEGA 算法考虑了数据相关性影响, 然而只针对网络总能耗进行了优化. MLR 算法通过数据的多径传输实现了节点能耗的均衡, 在一定程度上能够提高网络的生命期. 但是, 在 MLR 算法中自由参数对数据聚合率精度的影响较大, 而且自由参数的选取也是一个优化问题, 难以达到对网络整体能耗的优化效果. MLAR 算法同时考虑了数据的相关性和数据传递路径的节能性, 因此使网络生命期有了较大的提升.

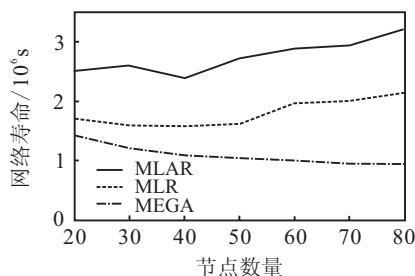


图 1  $\theta = 0.001/\text{m}^2$  时, 不同网络规模下网络寿命

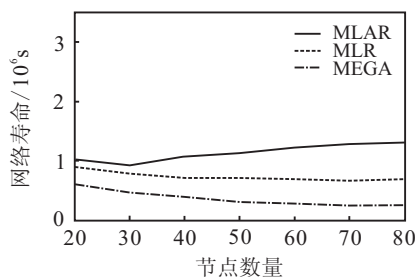


图 2  $\theta = 0.01/\text{m}^2$  时, 不同网络规模下网络寿命

图 3 给出了网络寿命与数据相关性参数的关系, 随着数据相关性参数  $\theta$  的增加, 网络生命期逐渐降低. 这是因为在数据相关性较大的情况下, 节点通过数据聚合能够消除更多的冗余信息, 减少网络中的数据流量, 降低网络传输能耗. 当数据相关性较小时, 则主要依靠均衡节点能耗来延长网络生命期.

图 4 为不同网络规模下分布式算法的收敛性. MLAR 算法在 40 次迭代内收敛到最优值, 显示了该算法具有很好的收敛性.

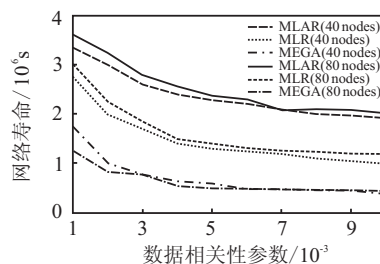


图 3 在不同数据相关系数下网络寿命

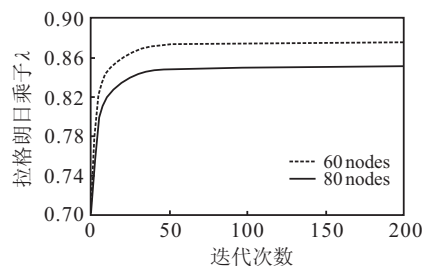


图 4 MLAR 算法的收敛性

## 4 结 论

本文对数据聚合无线传感器网络的最大化网络寿命路由算法进行了研究. 通过对网络流和节点能耗的分析, 提出了一种数据聚合路由优化模型, 并根据次梯度方法设计了分布式优化算法. 仿真结果表明, 相比于 MEGA 算法和 MLR 算法, 本文提出的 MLAR 算法能有效节约能量, 均衡能耗, 延长网络的寿命, 且 MLAR 算法具有很好的收敛性.

## 参考文献(References)

- [1] Raghunathan V, Ganeriwal S. Emerging techniques for long lived wireless sensor networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2006, 44(4): 108-114.
- [2] Li J, Alregib G. Network lifetime maximization for estimation in multihop wireless networks[J]. IEEE Trans on Signal Process, 2009, 57(7): 2456-2466.
- [3] Xue Yuan, Cui Yi, Nahrstedt K. An utility-based distributed maximum lifetime routing algorithm for wireless networks[C]. Proc of the 2nd Int Conf on QoS Heterogeneous Wired/Wireless Networks. Orlando, 2005: 10-18.
- [4] Dagher J C, Marcellin M W, Neifield M A. A theory for maximizing the lifetime of sensor networks[J]. IEEE Trans on Communication, 2007, 55(2): 323-332.
- [5] Luo Dijun, Zhu Xiaojun, Wu Xiaobing, et al. Maximizing lifetime for the shortest path aggregation tree in wireless sensor networks[C]. IEEE INFOCOM. Shanghai, 2011: 1566-1574.
- [6] Wu Y, Fahmy S, Shroff N B. On the construction of a maximum-lifetime data gathering tree in sensor networks: NP-completeness and approximation algorithm[C]. IEEE INFOCOM. Phoenix, 2008: 356-360.