

WSN聚合数据率约束最大生命期路由

唐伟, 郭伟

(电子科技大学通信抗干扰技术国家级重点实验室 成都 611731)

【摘要】无线传感器网络通常由能量受限的传感器节点以及一个数据中心构成,采用数据聚合消除数据中的冗余信息。针对目前还没有对网络生命期与聚合数据率之间约束关系的研究,提出了适用于数据聚合无线传感器的网络流模型,并通过定义聚合数据率松弛系数,将网络最大生命期与最小聚合数据率路由结合起来,并设计了一组线性规划问题消除路由中的环路。通过大量仿真实验,给出了不同场景下路由算法的性能,分析了网络生命期与聚合数据率之间的约束关系。

关键词 聚合数据率; 数据聚合; 线性规划; 松弛系数; 网络生命期; 无线传感器网络

中图分类号 TN915

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2011.01.006

Aggregated Data Rate Constrained Maximum Lifetime Routing in WSN

TANG Wei and GUO Wei

(National Key Laboratory of Science and Technology on Communications, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 611731)

Abstract Wireless sensor networks (WSNs) often consists of energy constrained sensor nodes and a data center, and data aggregation is often used to remove the redundant information from the data. However, no prior work studies the network lifetime under the aggregated data rate constraint. In this paper, a network flow model is proposed for data aggregated WSNs. By defining the loose factor for the aggregated data rate, the maximum network lifetime routing and the minimum aggregated data rate routing are combined. And a group of linear programming problems are designed to remove the loops in the routes. Extensive simulation results show the performances of the proposed routing algorithm. The relationships between the network lifetime and the aggregated data rate are also analyzed.

Key words aggregated data rate; data aggregation; linear programming; loose factor; network lifetime; wireless sensor network

无线传感器网络是一类多跳无线网络,通常由一组低成本、大数量的传感器节点和一个数据中心构成^[1]。由于传感器节点往往能量受限,设计节能路由以提高网络生命期便成为无线传感器网络设计中的一个核心问题。由于无线传感器网络具有自身的特点,其路由设计有别于通常的无线多跳网络。首先,无线传感器网络是一类以数据收集为首要任务的数据中心(data centric)网络^[2],网络中只有一个目的节点,即数据中心,而传感器节点收集的所有数据都通过多跳方式汇集到数据中心。同时,由于相邻传感器节点所收集的数据之间往往具有时空相关性,通常采用数据聚合去除数据中所含的大量冗余信息^[3-7]。

目前已有不少针对数据聚合无线传感器网络的

节能路由算法^[8-11]。LEACH(low-energy adaptive clustering hierarchy)算法^[12]是针对功率不受限的无线传感器网络设计的能耗均衡路由算法。该算法以节点剩余能量比例为权重对网络进行随机分群,群内节点将信息递交给群首进行数据聚合,而群首将聚合后的数据直接通过发射机以大功率发送给数据中心,能够保证每个节点的能耗基本均衡。GIT(greedy incremental tree)算法^[13]是一种基于生成树的算法,目的在于构建一棵边数最小的生成树以最小化网络能耗。该算法首先在一个传感器节点与数据中心之间建立最短路径,然后其他传感器节点通过最短跳数与该路径相连。MEGA(minimum energy gathering algorithm)算法^[14]也是基于生成树的算法,该算法首先在网络中建立一棵最小生成树,然后通

收稿日期: 2009-07-31; 修回日期: 2010-06-11

基金项目: 国家973计划(2009CB320405); 国家科技重大专项课题(2010ZX03005-002, 2010ZX03006-002-02)

作者简介: 唐伟(1980-),男,博士生,主要从事无线多跳网络路由算法方面的研究。

过有向图的最小生成树选择数据聚合点。算法中数据经过数据聚合点压缩后, 经最小生成树汇聚到数据中心。DRG(distributed random grouping)算法^[15]旨在采用最少发射次数收集网络中所有节点所收集数据的平均值、最大值和最小值。在群首的选择上, 该算法采用了同LEACH算法类似的随机选择; 而与LEACH算法不同的是, 该算法使网络中每个节点都能获取统计值。文献[16]研究了数据求和、求均值等在精度约束下的最小能耗收集算法。对于单跳网络提出了最优算法; 而对于多跳网络及有限精度级别, 最优算法被证明为NP-Hard。MLR(maximum lifetime routing)算法^[17]基于地理位置路由, 通过数据分流均衡网络流量, 同时对网络生命期和聚合数据率优化。由于所提问题是一个非线性规划问题, 而且目标函数不光滑, 算法采用递归光滑方法获得并求解近似解。

数据聚合无线传感器网络与传统多跳无线网络有很大区别。首先, 数据流的变化打破了传统网络流分析中的流量约束, 为该类网络中的流模型和路由设计提出了新的挑战; 其次, 数据聚合会改变网络中的数据流, 数据中心处的聚合数据率可以有很大的变化范围, 既能够降低数据中心出口带宽的要求, 也能够允许传感器节点采用更大的数据采集率, 因此有必要研究网络生命期与聚合数据率之间的变化关系; 最后, 由于最大生命期路由问题的最优解中可能出现环路, 因而需要去除路由环路。为此, 本文针对该类网络, 建立了网络流模型。

1 系统模型

无线传感器网络采用集中式网络资源分配系统模型, 其典型的应用包括增强型位置报知系统(enhanced position location reporting system, EPLRS)^[18]等。系统链路层采用TDMA方式, 传感器节点通过多跳方式将所收集到的信息汇集至数据中心。在网络节点布设完成后, 数据中心根据节点的位置关系、链路状况等信息, 负责网络路由的计算和时隙的分配^[19], 收集来自传感器节点的信息, 并交由外网对所收集到的信息进行分析。由于网络采用集中式资源分配, 能够尽可能地避免链路层中的报文冲突。

无线传感器网络可以被抽象为一个连通图 $G(\bar{V}, E)$, 其中 \bar{V} 表示传感器节点和数据中心的集合, E 表示链路集合。令集合 V 表示传感器节点集合, c 表示数据中心, 有 $V = \bar{V} / \{c\}$ 。令 N_i 表示节点 i 的邻居节点集合, 即 $N_i := \{j | (i, j) \in E\}$ 。对网络中的任意链路 $(i, j) \in E$, 用 ε_{ij} 表示链路开销, 通常表示为 $\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{\text{amp}} d_{ij}^\eta$, 其中 ε_{amp} 表示发射机功率增益,

d_{ij} 表示节点 i 和 j 之间的距离, η 表示路径损耗系数, 且通常在 $2 \leq \eta \leq 4$ 的取值范围内^[21]。记节点 i 的初始能耗为 E_i , 原始数据产生率为 R_i , 数据中心没有能量限制。

数据聚合通过去除数据报文中的冗余数据达到降低网络流量的目的。设节点 i 将原始数据通过链路 (i, j) 传递给节点 j , 定义数据相关系数 $\rho_{ij} = 1 - H(i|j)/H(i)$, 其中 $H(i)$ 表示节点 i 的原始数据信息量, $H(i|j)$ 表示在节点 j 现有信息条件下节点 i 的信息量。数据相关系数反映出节点数据间的冗余程度。数据相关性模型通常采用高斯随机场模型^[20], 其数据相关性与节点间相对距离呈指数下降趋势, 可表示为 $\rho_{ij} = \exp(-\alpha d_{ij}^2)$, 其中 α 为相关性参数, α 越大相关性越小, 反之则越大。

2 路由算法

本文在系统模型的基础上, 通过分析最小聚合数据率的求解方法, 提出聚合数据率约束下的网络最大生命期路由算法。因路由中可能存在环路, 研究了路由问题中的特殊节点, 设计了一组线性规划问题消除环路。

2.1 数据聚合无线传感器网络的网络流模型

由于数据聚合改变了网络中的数据流量, 现有网络流模型已不足以对该类网络进行建模^[21]。为此, 需要分别考虑网络中的同种数据流——原始数据流和聚合数据流。记网络中的原始数据流为 $\mathbf{r} = \{r_{ij} | (i, j) \in E\}$, 而聚合数据流为 $\mathbf{t} = \{t_{ij} | (i, j) \in E\}$ 。显然, 对于网络中的任意节点 $i \in V$, 网络中的原始数据流满足约束:

$$\sum_{j \in N_i} r_{ij} = R_i \quad (1)$$

而网络中的聚合数据流同时还满足约束:

$$\sum_{j \in N_i} t_{ij} = \sum_{j: i \in N_j} t_{ji} + \sum_{j: i \in N_j} r_{ji} (1 - \rho_{ji}) \quad (2)$$

式中, $\sum_{j \in N_i} t_{ij}$ 表示节点 i 输出的聚合数据率的总和;

$\sum_{j: i \in N_j} t_{ji}$ 表示输入节点 i 的聚合数据率的总和;

$\sum_{j: i \in N_j} r_{ji} (1 - \rho_{ji})$ 表示输入节点 i 的原始数据经过压缩

之后所得的聚合数据率。

对网络中的任意节点 $i \in V$, 其能耗为:

$$w_i(\mathbf{r}, \mathbf{t}) = \sum_{j \in N_i} (r_{ij} + t_{ij}) \varepsilon_{ij} \quad (3)$$

而网络最大生命期通常指网络中第一个耗尽能量的

节点的生命期^[22], 于是有:

$$T_{\text{net}} = \min_{i \in V} \{E_i / w_i(\mathbf{r}, \mathbf{t})\} \quad (4)$$

令 $U = 1/T_{\text{net}}$, 对任意节点 $i \in V$, 有 $w_i(\mathbf{r}, \mathbf{t}) \leq UE_i$, 得到如下约束条件:

$$\sum_{j \in N_i} (r_{ij} + t_{ij}) \varepsilon_{ij} - UE_i \leq 0 \quad (5)$$

注意到最大化网络生命期 T_{net} 等价于最小化 U , 于是网络的最大生命期路由问题可以归结为如下线性规划问题:

$$\begin{aligned} & \text{minimize} && U \\ & \text{s.t.} && \begin{cases} \sum_{j \in N_i} r_{ij} = R_i & i \in V \\ \sum_{j \in N_i} t_{ij} = \sum_{j \in N_j} t_{ji} + \sum_{j \in N_j} r_{ji}(1 - \rho_{ji}) & i \in V \\ \sum_{j \in N_i} (r_{ij} + t_{ij}) \varepsilon_{ij} - UE_i \leq 0 & i \in V \end{cases} \end{aligned} \quad (6)$$

2.2 聚合数据率约束的网络最大生命期路由问题

网络中的聚合数据流只与节点对数据聚合点的选择有关, 数据中心处的聚合数据率可表示为:

$$t_c = \sum_{i \in N_i} [t_{ic} + r_{ic}(1 - \rho_{ic})] = \sum_{i \in V} \sum_{j \in N_i} r_{ij}(1 - \rho_{ij}) \quad (7)$$

令最大数据相关系数 $\rho_i^* = \max_{j \in N_i} \{\rho_{ij}\}$, 邻居节点 $j_i^* = \text{argmax}_{j \in N_i} \{\rho_{ij}\}$, 有:

$$t_c \leq \sum_{i \in V} \sum_{j \in N_i} r_{ij}(1 - \rho_i^*) = \sum_{i \in V} R_i(1 - \rho_i^*) \quad (8)$$

将式(8)中 $\sum_{i \in V} R_i(1 - \rho_i^*)$ 常数项, 记为 t_c^* 。从上述讨论中可知, 网络中最小聚合数据率可以通过每个节点 i 将全部原始数据递交给使得 ρ_{ij} 最大的邻居节点 j_i^* 。

为了研究网络生命期与聚合数据之间的关系, 本文在聚合数据约束下讨论网络最大生命期问题。定义聚合数据率松弛系数 σ , 并结合式(6)和式(8), 提出聚合数据率约束的网络最大生命期路由问题的线性规划形式:

$$\begin{aligned} & \text{minimize} && U \\ & \text{s.t.} && \begin{cases} \sum_{j \in N_i} r_{ij} = R_i & i \in V \\ \sum_{j \in N_i} t_{ij} = \sum_{j \in N_j} t_{ji} + \sum_{j \in N_j} r_{ji}(1 - \rho_{ji}) & i \in V \\ \sum_{j \in N_i} (r_{ij} + t_{ij}) \varepsilon_{ij} - UE_i \leq 0 & i \in V \\ \sum_{i \in V} \sum_{j \in N_i} r_{ij}(1 - \rho_{ij}) - \sigma t_c^* \leq 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (9)$$

其中, 式(9)的最后一条约束表示数据中心的聚合数据率不大于 σt_c^* , 即数据中心的带宽为 σt_c^* 。为使问题有解, 显然 $\sigma \geq 1$ 。

式(9)的最优解可能有无穷多个, 如对于链路 $(i, j) \in E$, 且 $i, j \in V$, 当 $w_i(\mathbf{r}, \mathbf{t}) < UE_i$, 且 $w_j(\mathbf{r}, \mathbf{t}) < UE_j$ 时, 节点 i 和 j 之间可以相互传递足够小的聚合数据而不影响网络生命期和聚合数据率, 从而造成路由环路。因此, 需要找到去除路由中环路的方法。

2.3 路由环路的去除

为了去除环路, 可以通过引入一组线性规划问题来解决。为此, 本文给出如下定理。

定理 1 设式(9)的任意一个最优解为 $(\mathbf{r}, \mathbf{t}, U)$, 存在一个节点 $i^* \in V$, 对于式(9)的任意解 $(\mathbf{r}^*, \mathbf{t}^*, U^*)$ 都没有:

$$\begin{cases} w_j(\mathbf{r}^*, \mathbf{t}^*) < UE_j, & j = i^* \\ w_j(\mathbf{r}^*, \mathbf{t}^*) \leq UE_j, & j \neq i^* \end{cases} \quad (10)$$

证明 采用反证法。假设存在式(9)的一个最优解 $(\mathbf{r}_0, \mathbf{t}_0, U_0)$, 对于任意节点 $i \in V$, 存在式(9)的一个解 $(\mathbf{r}^*, \mathbf{t}^*, U^*)$, 使得式(10)成立。记集合 $I_1 = \{i | w_i(\mathbf{r}_0, \mathbf{t}_0) = U_0 E_i\}$, 从集合 I_1 中任取一个节点 i_1 , 根据假设, 存在式(9)的一个解 $(\mathbf{r}_1, \mathbf{t}_1, U_1)$, 满足 $w_{i_1}(\mathbf{r}_1, \mathbf{t}_1) < U_0 E_{i_1}$, 且对任意节点 $j \in V / \{i_1\}$, 有 $w_j(\mathbf{r}_1, \mathbf{t}_1) \leq U_0 E_j$ 。令 $I_2 = I_1 / \{i_1\}$, 如果 $I_2 \neq \emptyset$, 因 U_0 是式(9)的最小值, 必然有 $U_1 = U_0$, 则 $(\mathbf{r}_1, \mathbf{t}_1, U_1)$ 也是式(9)的一个解。而对于任意节点 $j \in V / I_2$, 有 $w_j(\mathbf{r}_1, \mathbf{t}_1) < U_0 E_j$ 。记集合 I_1 的元素个数为 K , 且因 K 有限, 可以重复以上步骤, 最终得到一个节点 i_k 、集合 $I_k = \{i_k\}$ 、集合 $I_{k+1} = \emptyset$ 及式(9)的一个解 $(\mathbf{r}_k, \mathbf{t}_k, U_k)$, 有 $U_{k-1} = U_0$, $w_{i_k}(\mathbf{r}_k, \mathbf{t}_k) < U_{k-1} E_{i_k}$, 且对于任意节点 $j \in V / I_k$, 有 $w_j(\mathbf{r}_k, \mathbf{t}_k) < U_{k-1} E_j$ 。即对于任意 $j \in V$, 都有 $w_j(\mathbf{r}_k, \mathbf{t}_k) < U_0 E_j$ 。结果与 U_0 是式(9)的最小值相矛盾。假设不成立。

基于定理1中节点 i^* 的能耗不可单独减少的性质, 称该类节点为非可约最大能耗节点。为找到非可约最大能耗节点, 可以先获得式(9)的一个最优解 $(\mathbf{r}^*, \mathbf{t}^*, U^*)$; 然后, 对集合 I_1 中的每个节点 i_1 , 求解线性规划问题:

$$\begin{aligned} & \text{minimize} && U \\ & \text{s.t.} && \begin{cases} \sum_{j \in N_i} r_{ij} = R_i & i \in V \\ \sum_{j \in N_i} t_{ij} = \sum_{j \in N_j} t_{ji} + \sum_{j \in N_j} r_{ji}(1 - \rho_{ji}) & i \in V \end{cases} \end{aligned}$$

$$\begin{cases} \sum_{j \in N_i} (r_{ij} + t_{ij}) \varepsilon_{ij} - U^* E_i < 0 \\ \sum_{j \in N_i} (r_{ij} + t_{ij}) \varepsilon_{ij} - U^* E_i \leq 0 & i \in V / \{i_1\} \\ \sum_{i \in V} \sum_{j \in N_i} r_{ij} (1 - \rho_{ij}) - \sigma t_c^* \leq 0 \end{cases} \quad (11)$$

从集合 I_1 中, 去掉使上述线性规划问题有解的节点, 剩下的任意一个节点即为所求。通过非可约最大能耗节点, 本文给出如下定理得到聚合数据率约束网络最大生命期无环路由问题的线性规划形式。

定理 2 设 U^* 是式(9)中 U 的最小值, 且节点 i^* 是定理1中所述的节点, 考虑下述线性规划问题:

$$\begin{aligned} & \text{minimize} && \sum_{i \in V} \sum_{j \in N_i} (r_{ij} + t_{ij}) \varepsilon_{ij} \\ & \text{s.t.} && \begin{cases} \sum_{j \in N_i} r_{ij} = R_i & i \in V \\ \sum_{j \in N_i} t_{ij} = \sum_{j: i \in N_j} t_{ji} + \sum_{j: i \in N_j} r_{ji} (1 - \rho_{ji}) & i \in V \\ \sum_{j \in N_i} (r_{ij} + t_{ij}) \varepsilon_{ij} - U^* E_i = 0 \\ \sum_{j \in N_i} (r_{ij} + t_{ij}) \varepsilon_{ij} - U^* E_i \leq 0 & i \in V / \{i^*\} \\ \sum_{i \in V} \sum_{j \in N_i} r_{ij} (1 - \rho_{ij}) - \sigma t_c^* \leq 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (12)$$

对于该问题的最优解 $(\mathbf{r}^*, \mathbf{t}^*)$, 对任意节点 $i \in V$, 有 $w_i(\mathbf{r}^*, \mathbf{t}^*) \leq U^* E_i$, 且聚合数据流 \mathbf{t}^* 无环路。

证明 设 (\mathbf{r}, \mathbf{t}) 是式(12)的任意一个最优解, 显然对任意节点 $i \in V$, 有 $w_i(\mathbf{r}, \mathbf{t}) \leq U^* E_i$ 。下面采用反证法证明定理的后半部分。假设 \mathbf{t}^* 中存在环路, 记其中一条环路为 (i_1, i_2, \dots, i_m) 。为方便起见, 令 $i_{m+1} = i_1$, 有 $t_{i_1 i_2}^* > 0, t_{i_2 i_3}^* > 0, \dots, t_{i_m i_{m+1}}^* > 0$ 。于是, 令 $t_{\min}^* = \min_{1 \leq k \leq m} \{t_{i_k i_{k+1}}^*\} > 0$, 定义向量 $(\bar{\mathbf{r}}, \bar{\mathbf{t}})$ 如下:

$$\bar{\mathbf{r}} = \mathbf{r}^* \quad \begin{cases} \bar{t}_{ij} = t_{ij}^* - t_{\min}^* & i = i^* \\ \bar{t}_{ij} = t_{ij}^*, & i \in V / \{i^*\} \end{cases} \quad (13)$$

易知, $(\bar{\mathbf{r}}, \bar{\mathbf{t}})$ 满足式(12)中的约束条件。于是有

$$\sum_{i \in V} \sum_{j \in N_i} (\bar{r}_{ij} + \bar{t}_{ij}) \varepsilon_{ij} < \sum_{i \in V} \sum_{j \in N_i} (r_{ij}^* + t_{ij}^*) \varepsilon_{ij}。结果与 $(\mathbf{r}^*, \mathbf{t}^*)$$$

是式(12)的最优解相矛盾。假设不成立。

2.4 聚合数据率约束的网络最大生命期无环路由算法

将线性规划式(9)、式(11)和式(12)组合构成本文所提出的带聚合数据率约束网络的最大生命期无环

路由算法。首先, 求解式(9)获得对应最大聚合数据率约束下的网络最大生命期路由。由于求解出的路由中可能存在环路, 因而需对环路进行消除。然后, 通过求解式(11)寻找网络中的非可约最大能耗节点, 该类节点具有降低能耗导致网络生命期增加的特性。由此, 在式(12)中约束该类节点的能耗以使网络生命期保持不变(依然保持最大), 并通过降低网络总能耗的办法消除网络中的环路。最终, 得到网络中带聚合数据率约束的最大生命期无环路由。

3 仿真实验

本文采用MATLAB数学仿真软件, 对提出的路由算法性能进行研究, 分析网络最大生命期与聚合数据率之间的关系。

3.1 场景设置

仿真在规模为40~120个节点的无线传感器网络环境下进行。传感器节点均匀随机地分布在100 m×100 m的矩形区域内, 数据中心位于区域的中心。布设网络节点后, 由数据中心根据网络拓扑以及出口带宽计算路由及时隙分配。节点的传输半径为20 m, 初始能量为1 kJ, 原始数据产生率为1 kb/s。取路径衰减因子 $\eta = 2$, 取发射功率增益 $\varepsilon_{\text{amp}} = 50$ nJ/bit^[12]。数据相关系数 α 的取值在0.001~0.01/m²间, 且 α 越大, 数据相关性越小。对每个网络规模, 产生20个随机生成的拓扑, 所有结果都对各场景取平均值后得到。

3.2 网络规模的影响

图1给出了在不同网络规模下网络生命期与松弛系数 σ 的关系 ($\alpha = 0.05$)。可以看出, 随着网络规模的增加, 网络最大生命期也增大。尽管网络中的原始数据流量与网络中节点数目成正比关系, 然而节点数量的增加不但有利于网络中数据流量的均衡, 而且节点间的距离会随之缩短, 由此带来两个好处: 1) 节点需要更少的发射功率向邻居发送数据; 2) 节点所收集的数据之间的相关性也在增加, 更多冗余数据被移除, 减少了网络流量。从总体上看, 网络的生命期反而增加了。因而在相同的松弛系数下, 规模较大的网络也具有较长的生命期。当松弛系数增加时, 数据中心的聚合数据率约束被放宽, 相当于数据中心的带宽变大, 当达到网络最大生命期所要求的带宽后, 网络生命期不再增加。图2所示为不同网络规模下聚合数据率与松弛系数 σ 的关系, 在网络达到最大生命期之前, 聚合数据率随松弛系数 σ 而增长, 直到网络达到最大生命期。而

且，随着节点数目的增加，网络最大聚合数据率与最小聚合数据率的比值也不断增加。这是由于聚合数据率松弛系数约束限制了数据的相关性的范围而造成的。当节点密度增加时，同样聚合数据率松弛系数下，节点可选择邻居的范围变小，因而需放宽聚合数据率松弛系数以最大化网络生命期。图中聚合数据率上升阶段的曲线并非完美的直线段，特别是在网络规模较大时更加明显，这是由于多个场景的结果相累加而造成的。

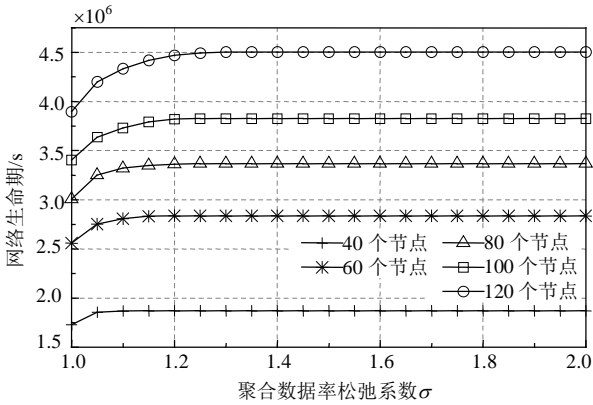


图 1 不同网络规模下网络生命期与松弛系数 σ 的关系

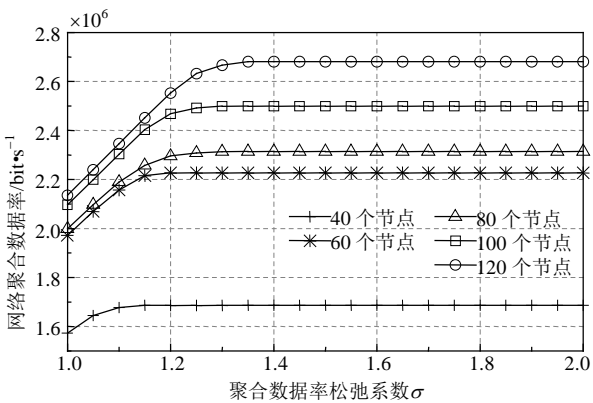


图 2 不同网络规模下聚合数据率与松弛系数 σ 的关系

3.3 数据相关性的影响

图3所示为在不同数据相关性下网络生命期与松弛系数 σ 的关系，其中，采用的节点数目为50。当数据相关系数增加时，数据相关性逐渐降低，数据中可以被去除的冗余信息减少，网络流量增大，导致网络中节点的能耗增加，因而网络生命期随着数据相关系数的增加呈递减趋势。与图1相对应，可以看到对于相同的数据相关系数，网络生命期也随着聚合数据松弛系数的增加而增加。图4对比了不同数据相关性下聚合数据率随松弛系数 σ 的变化关系。不难发现，随着数据相关系数的上升，网络中可以去除的冗余信息减少，聚合数据率也不断增加。而随着聚合数据松弛系数的增加，在网络生命期达到最大之前，网络聚合数据率是随之增加的，这与图2中的分析一致。

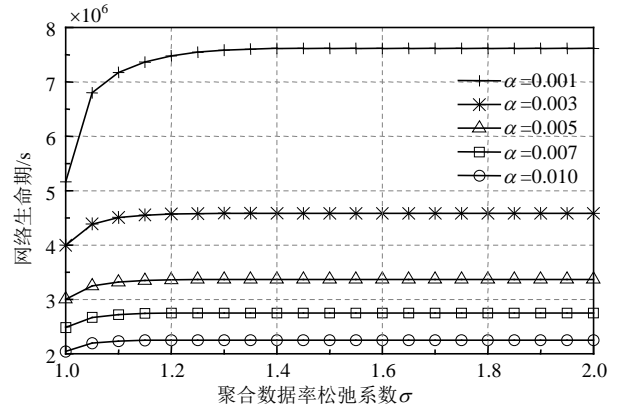


图 3 不同数据相关性下网络生命期与松弛系数 σ 的关系

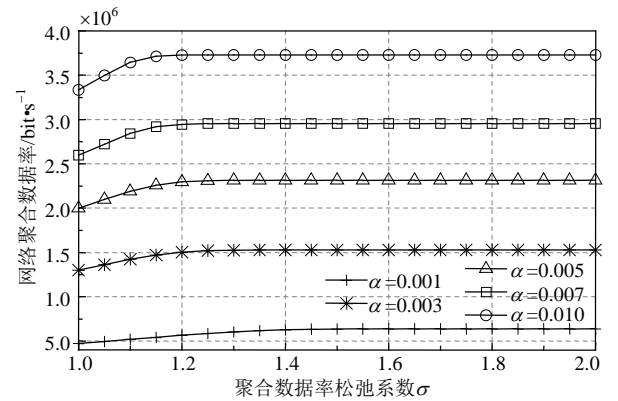


图 4 不同数据相关性下聚合数据率与松弛系数 σ 的关系

4 结论

数据聚合无线传感器网络中的节能路由问题是该类网络研究的重难点之一，本文为该类网络建立网络流模型，并通过定义聚合数据率松弛系数 σ ，研究在聚合数据率约束下的网络最大生命期路由问题。通过求解网络中的非可约最大能耗节点，解决了路由环路问题。通过仿真实验，对网络的最大生命期和聚合数据率之间的关系进行了分析。结果表明，网络聚合数据率与网络生命期是一对矛盾，可以通过本文所提出的方法从网络成本、生命期以及数据收集率等需求出发对网络进行设计。

参 考 文 献

- [1] LORINCZ K, MALAN D J, FULFORD-JONES T R F, et al. Sensor networks for emergency response: Challenges and opportunities[J]. IEEE Pervasive Computing, 2004, 3(4): 16-23.
- [2] QING Z, TONG L. Energy efficiency of large-scale wireless networks: proactive versus reactive networking[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2005, 23(5): 1100-1112.
- [3] VURAN M, AKAN OB. Spatio-Temporal characteristics of point and field sources in wireless sensor networks [C]//IEEE International Conference on Communications.

- Istanbul, Turkey: IEEE Press, 2006: 234-239.
- [4] VURAN M C, AKYILDIZ I F. Spatial correlation-based collaborative medium access control in wireless sensor networks[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2006, 14(2): 316-329.
- [5] BAHCECI I, KHANDANI A. Linear estimation of correlated data in wireless sensor networks with optimum power allocation and analog modulation[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2008, 56(7): 1146-1156.
- [6] WIMALAJEEWA T, JAYAWEERA S K. Optimal power scheduling for correlated data fusion in wireless sensor networks via constrained PSO[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2008, 7(9): 3608-3618.
- [7] TSANG-YI W, LI-YUAN C, DYI-RONG D, et al. Fault-tolerant decision fusion via collaborative sensor fault detection in wireless sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2008, 7(2): 756-768.
- [8] RAJAGOPALAN R, VARSHNEY P K. Data-aggregation techniques in sensor networks: A survey[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2006, 8(4): 48-63.
- [9] HUIYU L, POTTIE G J. Designing routes for source coding with explicit side information in sensor networks[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2007, 15(6): 1401-1413.
- [10] SHAH D, SHAKKOTTAI S. Oblivious routing with mobile fusion centers over a sensor network[C]// *Proceedings of the 26th IEEE International Conference on Computer Communications*. Anchorage, AK, USA: IEEE Press, 2007: 1541-1549.
- [11] FAN K-W, LIU S, SINHA P. Dynamic forwarding over tree-on-DAG for scalable data aggregation in sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2008, 7(10): 1271-1284.
- [12] HEINZELMAN W B, CHANDRAKASAN A P, BALAKRISHNAN H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2002, 1(4): 660-670.
- [13] INTANAGONWIWAT C, ESTRIN D, GOVINDAN R, et al. Impact of network density on data aggregation in wireless sensor networks[C]// *Proceedings of the 22nd International Conference on Distributed Computing Systems*. Montreal, Canada: IEEE Press, 2002: 457-458.
- [14] RICKENBACH VON P, WATTENHOFER R. Gathering correlated data in sensor networks[C]// *Workshop on Discrete Algorithms and Methods for Mobile Computing and Communications*. Cambridge, MA, USA: ACM, 2004: 60-66.
- [15] CHEN J Y, PANDURANGAN G, XU D. Robust computation of aggregates in wireless sensor networks: distributed randomized algorithms and analysis[J]. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2006, 17(9): 987-1000.
- [16] XUEYAN T, JIANLIANG X. Optimizing lifetime for continuous data aggregation with precision guarantees in wireless sensor networks[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2008, 16(4): 904-917.
- [17] CUNQING H, YUM T S P. Optimal routing and data aggregation for maximizing lifetime of wireless sensor networks[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2008, 16(4): 892-903.
- [18] THARP D, WALLACE L. Enhanced position location reporting system: legacy system provides new technology for warfighters[C]// *Bienial Review 2003*. San Diego, CA, USA: The Space and Naval Warfare Systems Center, 2003: 206-211.
- [19] DJUKIC P, VALAEE S. Delay aware link scheduling for multi-hop TDMA wireless networks[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2009, 17(3): 870-883.
- [20] D'COSTA A, RAMACHANDRAN V, SAYEED A M. Distributed classification of Gaussian space-time sources in wireless sensor networks[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2004, 22(6): 1026-1036.
- [21] JAE-HWAN C, TASSIULAS L. Maximum lifetime routing in wireless sensor networks[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2004, 12(4): 609-619.
- [22] YAN W, FAHMY S, SHROFF N B. On the construction of a maximum-lifetime data gathering tree in sensor networks: np-completeness and approximation algorithm[C]// *Proceedings of the 27th IEEE Conference on Computer Communications*. Phoenix, AZ, USA: IEEE Press, 2008: 356-360.

编辑 张俊