

无线传感器网络中基于数据融合的时变速率路由算法

薛 亮¹, 王燕龙¹, 李志华¹, 赵继军¹, 关新平²

(1 河北工程大学 信息与电气工程学院, 河北 邯郸 056038;

2 上海交通大学 系统控制与信息处理教育部重点实验室, 上海 200240)

摘 要: 考虑了一个双层架构的无线传感器网络, 针对上层簇首节点进行研究, 分析簇首节点数据产生速率时变情况下的路由问题, 提出了基于数据融合方法的时变速率路由算法(Time-varying Bit Rate Routing Algorithm Based on Data Fusion, TBRRDF). 在簇首节点时变速率均值已知的情况下, 通过时变速率路由算法得到的路由方式使网络的寿命最长. 还证明了通过该算法得到的路由方式是最优的, 仿真结果分析和验证了算法的有效性.

关键词: 无线传感器网络; 网络寿命; 数据融合; 时变速率

中图分类号: TN92

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2015)12-0130-06

Time-varying Bit Rate Routing Algorithm Based on Data Fusion in Wireless Sensor Networks

XUE Liang¹, WANG Yan-long¹, LI Zhi-hua¹, ZHAO Ji-jun¹, GUAN Xin-ping²

(1 School of Information and Electrical Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China;

2 System Control and Information Processing Key Laboratory of Ministry of Education,

Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: In the paper we formulate the WSNs with a two-tier architecture, where the cluster head nodes partitioned into the upper tier are studied, and the routing problem is analyzed with the time-varying data rate, then a time-varying bit rate routing algorithm based on data fusion(TBRRDF) is proposed. If the mean value of varying data rate at a specific cluster head is known a priori, then the routing solution obtained by the proposed algorithm achieves maximal network lifetime. Further, we prove that the routing solution is optimal by applying the bit rate routing algorithm, and the simulation results validate the effectiveness.

Key words: wireless sensor networks; network lifetime; data fusion; time-varying bit rate

1 引言

节点的能量受限是无线传感器网络的显著特点, 因而网络寿命成为无线传感器网络的一个重要性能指标^[1-3]. 本文考虑了一个具有双层架构的无线传感器网络, 当某一簇首节点的能量耗尽时, 簇首节点的感知信息缺失, 造成网络监测盲区. 因此, 本文定义无线传感器网络的寿命为网络中簇首节点的最

短生存时间.

虽然当簇首节点的数据产生速率为常量时, 网络的寿命最大化问题可以通过线性规划方法求解, 但是在实际应用中, 由于新节点加入、功率突变、带宽变化等因素, 簇首节点的数据产生速率很难是常量, 会随时间变化而变化, 因而是时变的. 文献^[2, 3]虽然对网络中时变速率问题进行了研究, 但只是进行了简单处理, 即对时变速率的均值进行了合理

收稿日期: 2015-02-23; 修回日期: 2015-04-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(61221003, 61304131, 61402147); 高等学校博士学科点专项科研基金项目(20110073120025, 20110073130005); 河北省自然科学基金项目(F2014402075); 河北省教育厅科学研究计划(BJ2014019, Q2012045, Q2012019)

的假设,并没有针对时变速率的问题进行研究.同时这些研究没有考虑节点的数据融合能力.本文提出了基于数据融合方法的时变速率路由算法,最优化数据路径间的传输速率,延长网络的寿命.

该算法的主要设计思想如下:首先构造辅助问题,即数据速率为常量的情况,进而构造数据速率时变情况下的路由.当簇首节点的数据产生速率时变时,时变数据速率的均值可以视为辅助问题中的常值数据速率.通过求解辅助问题,得到了各个链路上的最优数据速率.进一步地,构造了各个簇首节点所产生的速率在不同链路上的流量比例,最后通过引入相同的流量比例构造了时变速率时的最优路由.

2 网络和能量模型

2.1 网络模型

在平面区域内,考虑一种双层架构的无线传感器网络^[4].如图1所示,网络中有三种不同类型的节点,分别为成员节点、簇首节点和基站.成员节点构成了网络的下层,它们通常用来收集数据,当某一事件触发后,成员节点采集感知数据并将数据发送给簇首节点.簇首节点构成了网络的上层,与成员节点不同的是,簇首节点的主要负责将簇内成员节点的数据汇聚起来,并将这些汇聚后数据转发给下一跳簇首节点或基站.由于传送数据的能量消耗,每个簇首节点的生存时间受限.当簇首节点的能量耗尽时,部署区域的环境信息无法被继续感知,形成感知盲区.本文主要研究了上层簇首节点间的最优路由问题,包含簇首节点和基站.

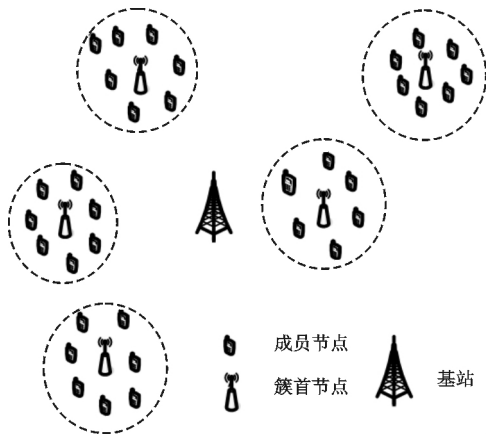


图1 网络模型

2.2 数据融合机制

当簇首节点具有数据融合能力时^[5],簇首节点对感知数据进行融合处理,并转发融合后的有效数

据至下一跳节点.本文定义数据融合率 δ_{mi} 用来衡量簇首节点的数据融合能力^[6],即:

$$\delta_{mi} = \frac{1/d_{mi}}{\sum_{m \neq i} (1/d_{mi})}. \quad (1)$$

式中, d_{mi} 表示簇首节点 m 和簇首节点 i 之间的距离,显然 $\delta_{mi} \leq 1$,当 $\delta_{mi} = 1$ 时表示没有进行数据融合.该数据融合机制以其距离的倒数作为其权值,将不同邻居节点的数据赋以不同的权值来进行数据融合,则对任意簇首节点所收集到融合后的数据与自身感知产生的数据之和应等于它所发送的数据.

2.3 能量模型

簇首节点 i 的传输功率可表示为^[7]

$$p_t(i, k) = c_{ik} \cdot f_{ik} \quad (2)$$

式中, $p_t(i, k)$ 表示簇首节点 i 向簇首节点 k 发送数据时的功率消耗, f_{ik} 表示节点 i 到节点 k 的数据传输速率. $c_{ik} = \alpha + \frac{\theta}{360} \beta \cdot d_{ik}^n$ 表示功率消耗成本,其中 α, β 是常数, θ 是与传感器相关的常数, d_{ik} 表示节点 i 和节点 k 之间的距离, n 表示路径损耗指数^[8].

簇首节点 i 的接收功率可表示为^[7]

$$p_r(i) = \sum_{m \neq i} \rho \cdot \delta_{mi} \cdot f_{mi} \quad (3)$$

式中, f_{mi} 表示节点 m 流入节点 i 数据速率,即节点 i 的数据接收速率.

假设上面的传输能量模型和接收能量模型是在无干扰的MAC协议下建立的,即传输过程中的干扰可以有效地避免^[9].

3 时变速率平均值已知条件下的最优路由

无线传感器网络中有 N 个簇首节点,这 N 个簇首节点构成簇首节点集 N . $g_i(t)$ 为簇首节点 i 的时变速率, e_i 为簇首节点 i 的初始能量, $\bar{g}_i$ 为 $g_i(t)$ 的平均值,即:

$$\bar{g}_i = E[g_i(t)] \quad (4)$$

3.1 问题 P1

定义 T^* 为簇首节点速率时变情况下网络的寿命, $f_{ik}(t)$ 和 $f_{iB}(t)$ 分别为簇首节点 i 到簇首节点 k 和基站 B 在时刻 t 的数据传输速率.根据流量平衡和能量约束条件,对于簇首节点 $i \in N$,有

$$g_i(t) + \sum_{m \neq i} \delta_{mi} f_{mi}(t) = \sum_{k \neq i} f_{ik}(t) + f_{iB}(t) \quad (5)$$

$$\int_0^{T^*} \sum_{m \neq i} \rho \delta_{mi} f_{mi}(t) + \sum_{k \neq i} c_{ik} f_{ik}(t) + c_{iB} f_{iB}(t) dt \leq e_i \quad (6)$$

式(5)表明簇首节点 $i \in N$ 的数据产生速率与从其他节点接收的融合后的数据速率之和等于簇首节点 i 的数据发送速率. 式(6)表明在网络寿命 T^* 内, 簇首节点 i 接收和发送数据时所消耗的能量, 其值不能超过簇首节点的初始能量 e_i . 目标是在满足式(5)和式(6)的条件下最大化生存时间 T^* , 于是得到下面的问题 P1.

Min $1/T^*$

$$\sum_{k \neq i} f_{ik}(t) + f_{iB}(t) - \sum_{m \neq i} \delta_{mi} f_{mi}(t) = g_i(t) \quad (1 \leq i \leq N) \quad (7)$$

$$\int_0^{T^*} \sum_{m \neq i} \rho \delta_{mi} f_{mi}(t) + \sum_{k \neq i} c_{ik} f_{ik}(t) + c_{iB} f_{iB}(t) dt - e_i \leq 0 \quad (1 \leq i \leq N) \quad (8)$$

$$f_{ik}(t), f_{iB}(t), 1/T^* \geq 0 (1 \leq i, k \leq N, i \neq k),$$

式中, $1/T^*, f_{mi}(t), g_i(t), f_{ik}(t)$ 和 $f_{iB}(t)$ 是变量; $\rho, \delta_{mi}, c_{ik}, c_{iB}$ 和 e_i 是常量.

3.2 辅助问题 P2

定义 $\bar{T}$ 为簇首节点时变速率均值已知情况下网络的寿命, $\bar{f}_{ik}$ 和 $\bar{f}_{iB}$ 分别为簇首节点 i 到簇首节点 k 和基站 B 的平均数据传输速率. 根据流量平衡和能量约束条件, 于是得到下面的线性规划问题 P2.

Min $1/\bar{T}$

$$\sum_{k \neq i} \bar{f}_{ik} + \bar{f}_{iB} - \sum_{m \neq i} \delta_{mi} \bar{f}_{mi} = \bar{g}_i (1 \leq i \leq N) \quad (9)$$

$$\sum_{m \neq i} \rho \delta_{mi} \bar{f}_{mi} + \sum_{k \neq i} c_{ik} \bar{f}_{ik} + c_{iB} \bar{f}_{iB} - e_i / \bar{T} \leq 0 \quad (1 \leq i \leq N) \quad (10)$$

$$\bar{f}_{ik}, \bar{f}_{iB}, 1/\bar{T} \geq 0 (1 \leq i, k \leq N, i \neq k),$$

式中, $1/\bar{T}, \bar{f}_{mi}, \bar{f}_{ik}$ 和 $\bar{f}_{iB}$ 是变量; $\bar{g}_i, \rho, \delta_{mi}, c_{ik}, c_{iB}$ 和 e_i 是常量. 问题 P2 所考虑的节点的初始能量和网络拓扑与问题 P1 均是相同的, 该线性规划问题能够在多项式时间内解决^[5], 不妨设网络的最大寿命 $\bar{T}$ 在路由方式 π 的情况下求得.

3.3 问题 P1 的最优路由算法

本文提出一个路由算法, 该算法可以得到问题 P1 的一种路由方式 ψ . 在路由方式 ψ 下, 得到问题 P1 的最大网络寿命 T^* .

在路由方式 π 下, 虽然知道每条链路上的数据速率, 但是并不知道这个数据速率是由哪个或哪些簇首节点的数据速率汇聚形成的, 因而本文对问题

P1 中每个簇首节点分到各个链路的数据速率的大小进行了研究. 在路由方式 π 下, 定义 w_{ik}^s 和 w_{iB}^s 分别为簇首节点 $s \in N$ 在链路 l_{ik} 和链路 l_{iB} 上的流量比例, 对于问题 P1, 在构造路由方式 ψ 的时候, 保持相同的 w_{ik}^s 和 w_{iB}^s 可使得网络的寿命最大.

在路由方式 π 下, 定义 $\bar{f}_{ik}^s$ 和 $\bar{f}_{iB}^s$ 分别为簇首节点 $s \in N$ 分配在链路 l_{ik} 和链路 l_{iB} 上的数据速率. 由以上定义可知, 等式 $w_{ik}^s = \bar{f}_{ik}^s / \bar{g}_s$ 和 $w_{iB}^s = \bar{f}_{iB}^s / \bar{g}_s$ 成立, 因此

$$\bar{f}_{ik} = \sum_{s \in N, s \neq k} \bar{f}_{ik}^s = \sum_{s \in N, s \neq k} w_{ik}^s \cdot \bar{g}_s \quad (11)$$

$$\bar{f}_{iB} = \sum_{s=1}^N \bar{f}_{iB}^s = \sum_{s=1}^N w_{iB}^s \cdot \bar{g}_s \quad (12)$$

基于数据融合的时变速率路由算法构造如下所示.

(1) 首先定义所有的 w_{ik}^s 和 $w_{iB}^s, 1 \leq i, k, s \leq N, i \neq k, s \neq k$.

① 当簇首节点 i 为源节点的时候, 即 $i = s$. 检查是否存在这样的源节点 $s \in N$, 其对应的 w_{ik}^s 和 w_{iB}^s 在算法迭代过程中还未被定义. 如果这样的节点不存在, 转至 ②.

对于 $w_{ik}^s (k \in N, k \neq s)$ 和 w_{iB}^s , 有

$$w_{ik}^s = \frac{\bar{f}_{ik}}{\bar{f}_{iB} + \sum_{r \neq s} \bar{f}_{ir}} \quad (13)$$

$$w_{iB}^s = \frac{\bar{f}_{iB}}{\bar{f}_{iB} + \sum_{r \neq s} \bar{f}_{ir}} \quad (14)$$

转至 ①.

② 当簇首节点 i 为中继节点的时候, 即 $i \neq s$. 检查源节点 $s \in N$ 和它的中继节点 $i \in N$ (中继可以是一跳或者多跳) 是否满足: 对于所有流入簇首节点的链路 l_{mi}, w_{mi}^s 在算法迭代过程中已被定义; w_{ik}^s 和 w_{iB}^s 在算法迭代过程中还未被定义. 如果不存在这样的 s 和 i 节点, 那么所有的 w_{ik}^s 和 w_{iB}^s 已经被定义, 转至 (2).

对于 $w_{ik}^s (k \in N, k \neq i, s)$ 和 w_{iB}^s , 有

$$w_{ik}^s = \frac{\bar{f}_{ik}}{\bar{f}_{iB} + \sum_{r \neq i} \bar{f}_{ir}} \sum_{m \neq i} \delta_{mi} w_{mi}^s \quad (15)$$

$$w_{iB}^s = \frac{\bar{f}_{iB}}{\bar{f}_{iB} + \sum_{r \neq i} \bar{f}_{ir}} \sum_{m \neq i} \delta_{mi} w_{mi}^s \quad (16)$$

转至 ②.

(2) 在路由方式 ψ 下的 t 时刻, 定义 $f_{ik}^s(t)$ 和

$f_{iB}^s(t)$ 分别为由簇首节点 s 产生且流经簇首节点 i 至簇首节点 k 和基站 B 的数据速率,有

$$f_{ik}^s(t) = w_{ik}^s \cdot g_s(t) \quad (17)$$

$$f_{iB}^s(t) = w_{iB}^s \cdot g_s(t) \quad (18)$$

由此可得,在路由方式 ψ 下的 t 时刻,链路 l_i^k 和链路 l_i^B 的数据速率分别为

$$f_{ik}(t) = \sum_{s \neq k} f_{ik}^s(t) = \sum_{s \neq k} w_{ik}^s \cdot g_s(t) \quad (19)$$

$$f_{iB}(t) = \sum_{s=1}^N f_{iB}^s(t) = \sum_{s=1}^N w_{iB}^s \cdot g_s(t) \quad (20)$$

综上所述,得到问题 P1 的路由方式 ψ 有两个步骤:首先,构造问题 P2,求解 LP-Basic 问题,得到路由方式 π . 然后在路由方式 π 的基础上,应用本文算法得到问题 P1 的路由方式 ψ ,使得网络的寿命最大.

4 算法理论证明

定理 1 由算法 TBRRDF 得到的路由方式 ψ 是可行的,且其网络寿命为 $\bar{T}$.

证明:首先考虑由源节点 s 产生且流经节点 i 的数据速率,其中 $i, s \in N$.

如果 $i = s$,即节点 i 为源节点 s ,有

$$\begin{aligned} & g_i(t) \\ &= g_i(t) \left(\frac{\bar{f}_{iB}}{\bar{f}_{iB} + \sum_{r \neq i} \bar{f}_{ir}} + \frac{\bar{f}_{ik}}{\bar{f}_{iB} + \sum_{r \neq i} \bar{f}_{ir}} \right) \\ &= g_i(t) (w_{iB}^i + \sum_{k \neq i} w_{ik}^i) \\ &= f_{iB}^i(t) + \sum_{k \neq i} f_{ik}^i(t) \end{aligned} \quad (21)$$

如果 $i \neq s$,即节点 i 为中继节点,有

$$\begin{aligned} & \sum_{m \neq i} \delta_{mi} f_{mi}^s(t) \\ &= \sum_{m \neq i} \delta_{mi} w_{mi}^s \cdot g_s(t) \\ &= \left(\frac{\bar{f}_{iB}}{\bar{f}_{iB} + \sum_{r \neq i} \bar{f}_{ir}} + \sum_{k \neq i} \frac{\bar{f}_{ik}}{\bar{f}_{iB} + \sum_{r \neq i} \bar{f}_{ir}} \right) \sum_{m \neq i} \delta_{mi} w_{mi}^s \cdot g_s(t) \\ &= (w_{iB}^s + \sum_{k \neq i} w_{ik}^s) g_s(t) \\ &= f_{iB}^s(t) + \sum_{k \neq i} f_{ik}^s(t) \end{aligned} \quad (22)$$

下面来验证流量平衡,根据以上条件,有

$$\begin{aligned} & g_i(t) + \sum_{m \neq i} \delta_{mi} f_{mi}(t) \\ &= g_i(t) + \sum_{s \neq i} \sum_{m \neq i} \delta_{mi} f_{mi}^s(t) \\ &= f_{iB}^i(t) + \sum_{k \neq i} f_{ik}^i(t) + \sum_{s \neq i} \left[f_{iB}^s(t) + \sum_{k \neq i} f_{ik}^s(t) \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= \left[f_{iB}^i(t) + \sum_{s \neq i} f_{iB}^s(t) \right] + \left[\sum_{k \neq i} f_{ik}^i(t) + \sum_{j \neq i} \sum_{k \neq i} f_{ik}^j(t) \right] \\ &= \sum_{s=1}^N f_{iB}^s(t) + \sum_{s=1}^N \sum_{k \neq i} f_{ik}^s(t) = f_{iB}(t) + \sum_{k \neq i} f_{ik}(t). \end{aligned}$$

因此,簇首节点 $i \in N$ 的流量平衡条件始终成立,算法具有可行性.

考虑能量约束,对于一个数据流 $f_{ik}(t)$, $1 \leq i, k \leq N(i \neq k)$,有

$$\begin{aligned} & \int_{t=0}^{\bar{T}} f_{ik}(t) dt = \int_{t=0}^{\bar{T}} \sum_{s \neq k} w_{ik}^s g_s(t) dt = \\ & \sum_{s \neq k} w_{ik}^s \int_{t=0}^{\bar{T}} g_s(t) dt = \sum_{s \neq k} w_{ik}^s \bar{g}_s \bar{T} = \bar{f}_{ik} \bar{T}. \end{aligned}$$

同理可以得到 $\int_{t=0}^{\bar{T}} f_{iB}(t) dt = \bar{f}_{iB} \bar{T}$. 从而, $\bar{T}$ 时间内节点 $s \in N$ 消耗的总能量为

$$\begin{aligned} & \int_0^{\bar{T}} \left[\sum_{m \neq i} \rho f_{mi}(t) + \sum_{k \neq i} c_{ik} f_{ik}(t) + c_{iB} f_{iB}(t) \right] dt \\ &= \sum_{m \neq i} \rho \bar{f}_{mi} \bar{T} + \sum_{k \neq i} c_{ik} \bar{f}_{ik} \bar{T} + c_{iB} \bar{f}_{iB} \bar{T} \\ &= \left(\sum_{m \neq i} \rho \bar{f}_{mi} + \sum_{k \neq i} c_{ik} \bar{f}_{ik} + c_{iB} \bar{f}_{iB} \right) \bar{T}. \end{aligned}$$

因此, $\bar{T}$ 时间内节点 $i \in N$ 的能量消耗在路由方式 ψ 和 π 下是完全相同的. 因为在 $\bar{T}$ 时刻问题 P2 中至少有一个节点的能量消耗完,所以 $\bar{T}$ 也是问题 P1 的网络寿命. 证毕

定理 2 通过算法 TBRRDF 得到问题 P1 的路由方式 ψ ,在这种路由方式下得到问题 P1 的网络寿命 $\bar{T}$ 是问题 P1 网络寿命的最大值 T^* .

证明:构造问题 P2 路由方式 π 所示.

对于 $\bar{f}_{ik}$ ($1 \leq i, k \leq N(i \neq k)$) 和 $\bar{f}_{iB}$,

$$\bar{f}_{ik} = \frac{\int_0^{T^*} f_{ik}(t) dt}{T^*} \quad (23)$$

$$\bar{f}_{iB} = \frac{\int_0^{T^*} f_{iB}(t) dt}{T^*} \quad (24)$$

验证簇首节点 $i \in N$ 是否满足流量平衡,

$$\begin{aligned} & \bar{g}_i + \sum_{m \neq i} \delta_{mi} \bar{f}_{mi} \\ &= \frac{1}{T^*} \left[\int_0^{T^*} g_i(t) dt + \sum_{m \neq i} \int_0^{T^*} \delta_{mi} f_{mi}(t) dt \right] \\ &= \frac{1}{T^*} \left[\int_0^{T^*} f_{iB}(t) dt + \sum_{k \neq i} \int_0^{T^*} f_{ik}(t) dt \right] \\ &= \bar{f}_{iB} + \sum_{k \neq i} \bar{f}_{ik}. \end{aligned}$$

类似地,验证簇首节点 $i \in N$ 的能量约束条件是否满足,由式(18)、式(19)得

$$\sum_{m \neq i} \rho \delta_{mi} \bar{f}_{mi} T^* + \sum_{k \neq i} c_{ik} \bar{f}_{ik} T^* + c_{iB} \bar{f}_{iB} T^* \\ = \int_0^{T^*} \left[\sum_{m \neq i} \rho \delta_{mi} f_{mi}(t) + \sum_{k \neq i} c_{ik} f_{ik}(t) + c_{iB} f_{iB}(t) \right] dt.$$

显然,簇首节点 $i \in N$ 同时满足了流量平衡和能量约束,因此在 T^* 时间内,每个簇首节点无论是在问题 P1 的路由方式 ϕ 还是在辅助问题 P2 的路由方式 π 下能量消耗是相同的,即网络寿命在问题 P2 的路由方式 π 下也是 T^* . 证毕

5 仿真实验及分析

无线传感器网络的拓扑结构如图 2 所示,有 5 个簇首节点和 1 个基站. 仿真参数设置如下: $\rho = 50$ nJ/b, $n = 4$, $\theta = 30$, $\beta = 0.0013$ pJ $\cdot$ b $^{-1}$ $\cdot$ m $^{-4}$, $\alpha = 50$ nJ/b. 簇首节点的平面坐标为 (x_i, y_i) 、初始能量 e_i 、平均速率 $\bar{g}_i$ 如表 1 所示,基站的坐标为 (200, 500). 各个簇首节点的数据融合率如表 2 所示.

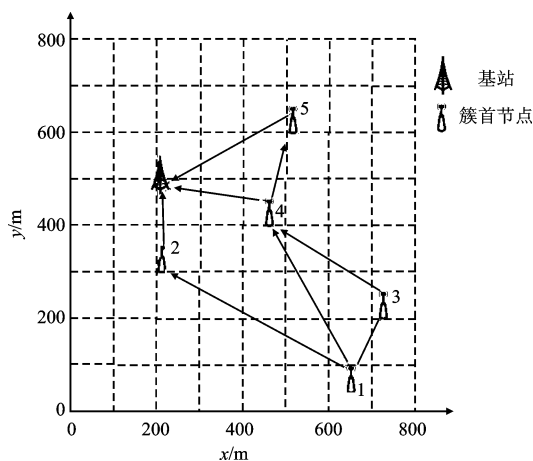


图 2 网络拓扑结构

表 1 簇首节点信息

簇首节点	$(x_i, y_i)/m$	$\bar{g}_i/(kb/s)$	e_i/kJ
1	(650, 100)	8	70
2	(200, 300)	9	65
3	(700, 200)	6	95
4	(450, 400)	4	80
5	(500, 600)	5	55

5.1 算法验证

通过求解问题 P2, 得到问题 P2 最大的网络寿

命 $\bar{T} = 94.9756$, 理论上也应为问题 P1 的最大网络寿命, 下面通过仿真来验证. 问题 P2 的最优路由如表 3 所示.

表 2 簇首节点的数据融合率

m	δ_{mi}				
	$i = 1$	$i = 2$	$i = 3$	$i = 4$	$i = 5$
1	0	1	1	0.4703	0
2	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0.5297	0
4	0	0	0	0	1
5	0	0	0	0	0

表 3 问题 P2 的最优路由

i	$\bar{f}_{ik}$					$\bar{f}_{iB}$
	$k = 1$	$k = 2$	$k = 3$	$k = 4$	$k = 5$	B
1	0	0	3.5924	4.4076	0	0
2	0	0	0	0	0	9.0000
3	0	0	0	9.5924	0	0
4	0	0	0	0	0.2704	10.8835
5	0	0	0	0	0	5.2704

根据本算法的步骤(1), 有

$$\text{节点 1: } w_{12}^1 = \frac{\bar{f}_{12}}{\bar{f}_{12} + \bar{f}_{13} + \bar{f}_{14}} = 0.0000,$$

$$w_{13}^1 = \frac{\bar{f}_{12}}{\bar{f}_{12} + \bar{f}_{13} + \bar{f}_{14}} = 0.4490,$$

$$w_{14}^1 = \frac{\bar{f}_{14}}{\bar{f}_{12} + \bar{f}_{13} + \bar{f}_{14}} = 0.5510,$$

$$w_{2b}^1 = \delta_{12} w_{12}^1 = 0.0000,$$

$$w_{34}^1 = \delta_{13} w_{13}^1 = 0.4490,$$

$$w_{45}^1 = \frac{\bar{f}_{45}}{\bar{f}_{45} + \bar{f}_{4B}} (\delta_{14} w_{14}^1 + \delta_{34} w_{34}^1) = 0.0120,$$

$$w_{4B}^1 = \frac{\bar{f}_{4B}}{\bar{f}_{45} + \bar{f}_{4B}} (\delta_{14} w_{14}^1 + \delta_{34} w_{34}^1) = 0.4849,$$

$$w_{5B}^1 = \delta_{45} w_{45}^1 = 0.0120.$$

$$\text{节点 2: } w_{2B}^2 = 1.0000.$$

$$\text{节点 3: } w_{34}^3 = 1.0000,$$

$$w_{45}^3 = \frac{\bar{f}_{45}}{\bar{f}_{45} + \bar{f}_{4B}} \delta_{34} w_{34}^3 = 0.0128,$$

$$w_{4B}^3 = \frac{\bar{f}_{4B}}{\bar{f}_{45} + \bar{f}_{4B}} \delta_{34} w_{34}^3 = 0.5168,$$

$$w_{5B}^3 = \delta_{45} w_{45}^3 = 0.0128.$$

$$\text{节点 4: } w_{45}^4 = \frac{\bar{f}_{45}}{f_{45} + f_{4B}} = 0.024\ 2,$$

$$w_{4B}^4 = \frac{\bar{f}_{4B}}{f_{45} + f_{4B}} = 0.975\ 8,$$

$$w_{5B}^4 = \delta_{45} w_{45}^4 = 0.024\ 2.$$

$$\text{节点 5: } w_{5B}^5 = 1.000\ 0.$$

然后根据本文算法的步骤(2),有

$$f_{12}(t) = w_{12}^1 g_1(t) = 0.000\ 0,$$

$$f_{13}(t) = w_{13}^1 g_1(t) = 0.449\ 0 g_1(t),$$

$$f_{14}(t) = w_{14}^1 g_1(t) = 0.551\ 0 g_1(t),$$

$$f_{2B}(t) = w_{2B}^2 g_1(t) + w_{2B}^2 g_2(t) = g_2(t),$$

$$f_{34}(t) = w_{34}^1 g_1(t) + w_{34}^3 g_3(t) \\ = 0.449\ 0 g_1(t) + g_3(t),$$

$$f_{45}(t) = w_{45}^1 g_1(t) + w_{45}^3 g_3(t) + w_{45}^4 g_4(t) \\ = 0.012\ 0 g_1(t) + 0.012\ 8 g_3(t) + \\ 0.024\ 2 g_4(t),$$

$$f_{4B}(t) = w_{4B}^1 g_1(t) + w_{4B}^3 g_3(t) + w_{4B}^4 g_4(t) \\ = 0.484\ 9 g_1(t) + 0.516\ 8 g_3(t) + \\ 0.975\ 8 g_4(t),$$

$$f_{5B}(t) = w_{5B}^1 g_1(t) + w_{5B}^3 g_3(t) + w_{5B}^4 g_4(t) + \\ w_{5B}^5 g_5(t) \\ = 0.012\ 0 g_1(t) + 0.012\ 8 g_3(t) + \\ 0.024\ 2 g_4(t) + g_5(t)$$

分别计算 5 个簇首节点的寿命. 对于簇首节点 1,有

$$\int_0^{T_1} [c_{12} f_{12}(t) + c_{13} f_{13}(t) + c_{14} f_{14}(t)] dt \\ = \int_0^{T_1} [c_{12} \cdot 0 + c_{13} \cdot 0.449\ 0 g_1(t) + \\ c_{14} \cdot 0.551\ 0 g_1(t)] dt \\ = (0.449\ 0 c_{13} + 0.551\ 0 c_{14}) g_1 T_1 \leq e_1.$$

通过计算得出 $T_1 = 94.975\ 6$ 天, $T_2 = 374.286\ 0$ 天, $T_3 = 94.975\ 6$ 天, $T_4 = 123.326\ 1$ 天, $T_5 = 106.333\ 2$ 天. 从而, $T^* = 94.975\ 6$ 天. 显然 $T^* = \bar{T}$, 因此该算法得到的路由方式是最优的, 使得网络的寿命最大.

5.2 算法比较

将本文算法 TBRRDF 和 Y. Thomas Hou 提出的 FRVR 算法^[10]进行了比较,如图 3 所示.

随着网络中簇首节点簇首节点产生的速率逐渐增大(簇首节点的平均速率之和也会增大,假设每次每个簇首节点的平均速率增加为 5 kb/s),使得网络的寿命变小. 由图可知,在相同的网络配置下本文的

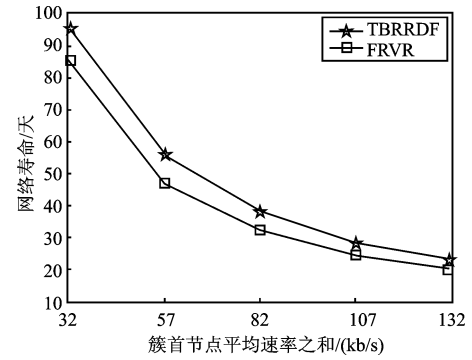


图 3 算法比较

算法进一步延长了网络的寿命.

6 结束语

本文研究了无线传感器网络中速率时变情况下的路由问题,并提出了基于数据融合的时变速率路由算法. 在簇首节点的数据产生速率的均值已知的情况下,由 TBRRDF 算法得到的路由方式可以使网络的寿命最大.

参考文献:

- [1] Incebacak D, Zilan R, Tavli B, et al. Optimal data compression for lifetime maximization in wireless sensor networks operating in stealth mode[J]. Ad Hoc Networks, 2015, 24(11): 134-147.
- [2] Fan R, Li Y, Jiang H. Power-efficient robust routing and resource allocation in wireless mesh networks[C] // Proceedings of 2012 IEEE International Conference on Communications. Orlawa, ON: IEEE, 2012: 450-454.
- [3] Xue L, Yang B, Zhao J, et al. Joint resource reconfiguration and robust routing for cognitive radio networks: a robust optimization approach[J]. Wireless Communications and Mobile Computing, 2013, 15(5): 848-867.
- [4] Liu J, Zhao F, Cheung P, et al. Apply geometric duality to energy-efficient non-local phenomenon awareness using sensor networks[J]. IEEE Wireless Communications, 2004, 11(6): 62-68.
- [5] 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.
- [6] 刘志新,袁会美,薛亮,等. 基于数据融合传感器网络寿命最优路由策略[J]. 控制与决策, 2011, 26(5): 781-784.

(下转第 140 页)

于信任图和 Folksonomy 数据中彼此共享有价值的信息, 这些信息有助于降低社会网数据集中数据稀疏问题, 提高预测的准确度.

5 结束语

本文开发了一种基于 Folksonomy 信息作为辅助信息进行信任预测的方法, 将用户信任图与 Folksonomy 中用户资源图 and 用户标记图中共同的组结构信息知识利用起来, 作为辅助信息用于信任预测, 提高了信任预测的能力. 在真实数据集上的测试表明, 我们提出的 TPMF 方法在信任预测方面性能要好于经典的信任预测方法. 改进该方法, 利用用户信任关系信息进行 Folksonomy 中用户标记推荐是接下来需要做的工作.

参考文献:

- [1] Leskovec J, Huttenlocher, D, Kleinberg, J. Predicting positive and negative links in online social networks[C] // Proceedings of the 19th International Conference on World Wide Web. New York: ACM, 2010: 641-650.
- [2] Guha R, Kumar R, Raghavan P, et al. Propagation of trust and distrust[C] // Proceedings of 11th International Conference on World Wide Web. New York: ACM, 2004: 403-412.
- [3] Getoor L, Diehl C. Link mining: A survey[J]. ACM SIGKDD Explorations Newsletter, 2005(7): 2, 3-12.
- [4] Yu K, Chu W. Gaussian process models for link analysis and transfer learning[C] // Advances in Neural Information Processing Systems. Cambridge, MA: MIT Press, 2007: 1657-1664.
- [5] Srebro N, Jaakkola T. Weighted low-rank approximations[C] // Proceedings of the 20th Annual International Conference on Machine Learning. Palo Alto, CA: AAAI Press, 2003: 720-727.
- [6] Salakhutdinov R, Andmih A. Probabilistic matrix factorization[C] // Advances in Neural Information Processing Systems. Cambridge, MA, MIT Press, 2007: 1257-1264.
- [7] Andreas Hotho, Robert Jäschke, Christoph Schmitz, et al. Information retrieval in folksonomies: Search and ranking[C] // Proceedings of the 3rd European Conference on the Semantic Web: Research and applications. Berlin: Springer, 2006: 411-426.
- [8] Massa P, Avesani P. Trust metrics in recommender systems[M]. London: springer, 2009: 259-285.
- [7] Wieselthier J E, Nguyen G D, Ephremides A. Energy-limited wireless networking with directional antennas: the case of session-based multicasting[C] // Proceedings of IEEE INFOCOM. [s. l.]: IEEE, 2002: 190-199.
- [8] Rappaport T S. Wireless communications: principles and practice [M]. New Jersey: prentice hall PTR, 1996.
- [9] Sohrabi K, Gao J, Ailawadhi V, et al. Protocols for self-organization of a wireless sensor network [J]. IEEE Personal Communications, 2000, 7(5): 16-27.
- [10] HOU Y T, Shi Y. Variable bit rate flow routing in wireless sensor networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2007, 6(6): 2140-2148.

作者简介:

王树锋 男, (1968-), 博士, 副教授. 研究方向为智能计算与语义网技术. E-mail: 15961254516@163.com.

王文 男, (1974-), 硕士, 讲师. 研究方向为信息检索与智能信息处理.

作者简介:

薛亮 男, (1982-), 博士, 副教授. 研究方向为无线传感器网络、无线认知技术.

王燕龙(通信作者) 男, (1991-), 硕士研究生. 研究方向为无线传感器网络、网络优化. Email: 764437873@qq.com.

李志华 女, (1978-), 博士, 副教授. 研究方向为物联网、无线传感器网络.

(上接第 135 页)