

基于博弈论的无线传感网能量均衡模型^①

卜范玉^{1,2}, 张清辰²

¹(内蒙古财经大学 职业学院, 呼和浩特 010010)

²(大连理工大学 软件学院, 大连 116620)

摘要: 提出一种基于贝叶斯博弈的无线传感网能量均衡算法, 该算法将每次数据转发过程分解为两个阶段的博弈。第一阶段博弈是指节点结合自身能量水平及参与博弈其他节点的战略, 构造静态贝叶斯博弈模型, 以最优期望收益函数的解作为节点参与路由转发数据包的最优决策概率; 第二阶段博弈是指源节点与邻居节点根据能量水平及相互战略, 构造博弈模型, 根据最大化期望收益函数的解, 决定双方在博弈阶段的最优转发包数量。仿真实验结果表明, 本文提出的算法能够有效地均衡网络的能量消耗, 延长网络的生存时间。

关键词: 能量均衡; 无线传感网络; 博弈论

Game Theory-Based Energy Balance Algorithm for Wireless Sensor Network

BU Fan-Yu^{1,2}, ZHANG Qing-Chen²

¹(College of Vocation, Inner Mongolia University of Finance and Economics, Hohhot 010010, China)

²(School of Software Technology, Dalian University of Technology, Dalian 116620, China)

Abstract: This paper presents a novel energy balance algorithm based on Bayesian Game for wireless sensor network, which divides each data forwarding process into two game phases. In the first stage of the game, a node constructs a static Bayesian game model according to its own energy levels and strategies of other nodes involved in the game. Then the node takes the solution of the optimized expected revenue function as the routing and forwarding packets optimal decision probability. In the second game stage, the source node and the neighbor nodes build game model according to the energy level and the mutual strategies and the optimal he number of packets transmitted.

Key words: energy balance; wireless wensor network; Game theory

无线传感网是由大量的微小节点通过自组织的方式构成的无限网络, 通常这些微小节点是指具有计算能力和通信能力的微型传感器^[1]。无线传感网络通过这些传感器感知数据, 采集数据, 并以无线通信方式将数据转发到数据处理中心。目前, 无线传感网的应用日益广泛, 包括智能交通、物联网与环境监测等多个领域^[2-4]。

节点的能量是保证网络生存时间的重要指标^[5], 同时也影响着网络的路由选择与数据传输的质量。然而在无线传感网络中, 每个传感节点的能量非常有限。每个节点根据自身能量水平选择数据转发方式直接影响并决定着网络的吞吐量与网络的生存周期。由此可

见, 能量控制是无线传感网建设需要考虑的关键问题。能量控制是指设计特定的能量均衡算法, 通过该算法选择特定的路由, 在保证完成任务的前提下, 均衡整个传感网络的能量消耗, 借以提高网络的吞吐量并延长网络的生存时间。

近几年来, 国内外学者已经提出一些基于博弈论无线传感网能量控制的算法, 如文献[4]提出一种自适应能量自适应无线传感网路由协议, 该协议通过统一网络的能量负载来控制整个网络的能量消耗。文献[5]提出基于染色理论的能量控制路由算法, 该算法通过染色理论优化网络路由选择, 以控制整个无线传感网络的能量消耗。文献[6,7]对无线传感网络能量控制算

① 基金项目: 国家重点自然科学基金(U1301253); 内蒙古财经大学重点支持项目(KYZ1303)

收稿时间: 2014-08-28; 收到修改稿时间: 2014-10-16

法进行总结和分析。这些算法虽然在一定程度上能够达到对网络能量的控制,但是这些算法较少考虑网络能量均衡消耗的问题,严重减低网络的吞吐量,同时大幅度缩短了网络的生存时间。文献[8]提出了用博弈论模型来均衡网络能量消耗,然而这个模型单纯考虑邻居节点是否为源节点转发数据包,没有充分考虑邻居节点的最优数据包转发数量。

本文提出一种基于贝叶斯博弈的无线传感网能量均衡算法。在本算法中,节点以广播的方式转发数据。在一个时间槽内,源节点发送数据之后,由其邻居节点根据自己的能量水平选择是否转发,并选择为源节点转发数据包的数量。本文将源节点的邻居节点的两个决策过程看做两个博弈过程。第一个博弈过程为源节点的相邻节点与源节点的其他相邻节点之间的博弈。在这个博弈过程中,节点结合自身的能量水平和参与博弈节点的战略,构造静态贝叶斯博弈模型,以最优期望收益函数的解作为节点参与路由转发数据包的最优决策概率;第二个博弈过程为源节点与其相邻节点之间的博弈,源节点与邻居节点根据能量水平及相互战略,构造博弈模型,根据最大化期望收益函数的解,决定双方在博弈阶段的最优转发包数量。整个算法在每次数据转发过程中,经过这两次博弈,选择最优的数据转发方式,借此均衡整个网络的能量消耗。

1 基于贝叶斯博弈的数据转发决策模型

在无线传感网络中,节点只能通过其邻居节点为其转发数据,即任何一个节点只能与其邻居节点通信。由于无线传感网中节点的存储能力和处理能力是有限的,因此节点并不完全掌握邻居节点的信息;另一方面,无线传感网的拓扑结构具有动态变化的特性,因此目前大多无线传感网中的节点(为了方便阐述,本文将该节点称为源节点)选择广播的方式发送数据。其邻居节点根据自身的能量水平、位置信息等决定以多大的概率转发数据。邻居节点在决策是否为源节点转发数据过程中,除受到自身能量水平限制,还受源节点的其他邻居节点的决策影响。这一影响体现在每一轮转发后,源节点会根据一定的规则对邻居节点给予相应的激励或者惩罚。

因此,可以将源节点的一个邻居节点与其他邻居节点的决策看做是一个博弈过程。本文引入节点的支付函数,该支付函数与节点的能量水平与其他节点的

战略相关,进而构造静态贝叶斯博弈模型。以最优期望收益函数的解作为节点参与路由转发数据包的最优决策概率,借此均衡整个网络的能量消耗。

1.1 数据转发决策模型

假设整个无线传感网系统由一系列时间槽构成,每个时间槽的长度足以保证节点数据包转发到邻居节点,将每个时间槽作为一个博弈阶段。则源节点的邻居节点之间的静态贝叶斯博弈(数据转发决策模型)定义为 $G=(I, S, P, U)$ 。

其中, $I=\{1, 2, \dots, i, \dots, n\}$ 为博弈的参与者。 I 是源节点的邻居节点集合。 S 表示节点的策略空间,对于任意的 i , 定义其策略空间 $S_i=\{\text{转发}, \text{不转发}\}$ 。在本文的博弈模型中,节点 i 具有基于纯策略空间的混合策略,记 p_i 是节点 i 选择转发数据包的概率, $1-p_i$ 是节点 i 选择不转发的概率。显然, p_i 是能量水平及上一轮博弈支付的函数。为了将数据转发模型转换为完全但不完美信息博弈,记 $P=\{p_{ji}\}$ 是参与人关于其他参与人的信念,定义为节点 i 认为博弈过程中自己转发数据包,同时其与节点不转发数据包的概率且 p_{ji} 是上一轮博弈支付的函数。节点的收益定义为:当节点 i 选择转发数据同时还有其他节点也转发数据,则节点 i 的收益为 a , 没有转发的节点获得收益为 c ; 如果节点 i 转发数据,同时其他节点没有转发数据,则获得收益为 b , 显然 $b \gg a$; 如果所有节点均不转发数据,则所有节点的收益为 d , 显然 $d < 0$, 代表节点受到的惩罚。

本文算法在第一个博弈模型中的目的是在每个时间槽内,源节点的邻居节点根据自己的能量水平、其余节点的决策和行为,选择最优的转发概率 p_i , 实现网络能量消耗的均衡。

1.2 数据转发决策模型的混合策略纳什均衡

用 v_i 表示节点 i 的期望支付函数, r_i 表示节点 i 的期望收益, $E_i(r_i)$ 是节点 i 选择转发数据包的期望收益, 显然 $E_i(r_i)$ 是 r_i 的二阶可导函数。则节点 i 的期望支付可表示为公式(1):

$$v_i = r_i - \omega_i E_i(r_i) \quad (1)$$

其中, ω_i 是价格转化因子。

算法策略:节点通过计算期望支付函数,以最大化支付函数的解作为博弈中的决策概率 p_i , 其中 p_i 满足公式(2):

$$p_i^* \in \arg \max(v_i) \quad (2)$$

节点 i 最终将以最优决策 p_i^* 的概率转发数据,均

衡网络的能量消耗。

2 基于动态贝叶斯博弈的数据转发模型

在源节点的邻居节点选择为源节点转发数据后, 还要选择转发包的数量. 同样, 源节点要根据实际情况, 选择每个时间槽向邻居节点发送数据包数目. 本文将源节点的发送速率与邻居节点的数据转发速率看作是一个博弈, 构建一种基于博弈论转发速率算法, 对网络中节点的数据转发速率进行最优分配, 均衡网络的能量消耗.

假设整个无线传感网系统由一系列时间槽构成, 每个时间槽的长度足以保证节点数据包转发到邻居节点, 将每个时间槽作为一个博弈阶段. 则节点之间的动态贝叶斯博弈(数据包转发速率模型)定义为 $G=(I, A, \theta, U)$.

其中, $I=\{1, 2, \dots, i, \dots, n\}$ 为博弈的参与者. $A=\{A_i(t_k), A_j(t_k)\}$ 为博弈者的策略组合, $A_i(t_k)=\{s_i(t_k) | 0 \leq s_i(t_k) \leq g_i(t_k)\}$ 表示源节点的策略组合, 即向邻居节点发送的数据量, $g_i(t_k)$ 表示节点产生的数据量. $A_j(t_k)=\{y_j^i(t_k) | 0 \leq y_j^i(t_k) \leq s_i(t_k)\}$ 表示邻居节点策略组合即根据自身和外界资源的评估作出理性决策后为节点转发的能量的数量. $\theta=\{\theta_{ij}\}$ 表示节点的能量水平, 表示博弈者的收益. 选择最优的数据包转发数量, 以均衡网络的能量消耗.

在数据转发过程中, 节点会因为转发数据而消耗自身能量. 因此源节点为了使得邻居节点为自己转发数据, 需要支付给邻居节点费用. 显然, 该费用是节点转发数据量的函数, 记此函数为 $W(s_{ij})$. 假设中继节点成功转发一个数据包, 源节点获得的单位收益为 λ , 发送一个数据包的能耗为 C , 则源节点的收益函数可以表示为公式(3):

$$U_i(t_k) = \lambda y_j^i(t_k) - W(s_i(t_k)) y_j^i(t_k) - \omega C \tag{3}$$

邻居节点不考虑自身业务, 则它的收益函数可以表示为公式(4):

$$U_j(t_k) = W(s_i(t_k)) y_j^i(t_k) - \omega C \tag{4}$$

其中, ω 是价格转化因子.

根据子精炼贝叶斯均衡可知, 邻居节点的最优策略可表示为公式(5):

$$y_j^i = \arg \max(U_j) \tag{5}$$

源节点的最优策略可表示为公式(6):

$$s_i^* = \arg \max(U_i) \tag{6}$$

3 实验仿真与分析

为了验证本文提出模型的有效性, 本文设置的实验环境与文献[6]和文献[11]相同: 使用 NS2 网络仿真工具仿真传感器网络中的数据包转发过程, 仿真环境为: 在长宽均为 100m 的正方形区域随机部署 100 个传感器节点, 节点的最大通信半径为 15m. 源节点产生的数据包服从 Poission 分布. 本文进行 50 次不同拓扑结构下的仿真, 每次重复 30 个博弈阶段.

为了验证本文提出的模型的有效性, 将本文的算法与同基于蚁群的能量有效路由算法、和博弈算法^[6]进行对比. 在上述实验环境中进行了 50 次不同拓扑结构下的仿真, 为了验证算法的有效性, 本文通过发送成功率与网络生存期两个参数对算法进行对比. 其中网络生存期用存活的节点个数表示.

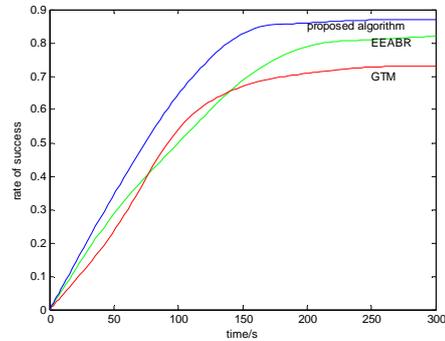


图 1 包发送成功率结果

图 1 显示了三种算法包发送成功率的仿真结果. 从图 1 可以看出, 三种算法的发送成功率随着时间时间递增. 其中, 基于蚁群的能量有效路由算法(EEABR)在 200s 后达到均衡, 其发送成功率维持在 0.80 左右, 博弈算法(GTM)在 170s 后能达到平衡, 其包发送成功率保持在 0.70 左右. 而本文的算法达到均衡的速度明显高于以上三种算法, 在 150s 左右能够达到均衡状态, 且其包发送成功率也明显高于以上三种算法, 可以达到 0.85 左右. 这些充分说明本文提出的算法在传输可靠性方面具有较大优势.

图 2 是网络生存周期的仿真结果示意图. 从统计结果中可以看出, 在 50s 之后, 本文提出的算法存活的节点个数明显高于 GTM 算法与 EEABR 算法, 即本文提出的算法的网络生存期分别在第 50s 开始明显优于这两种算法. 充分说明本文提出的算法的能量均衡控制算法的有效性.

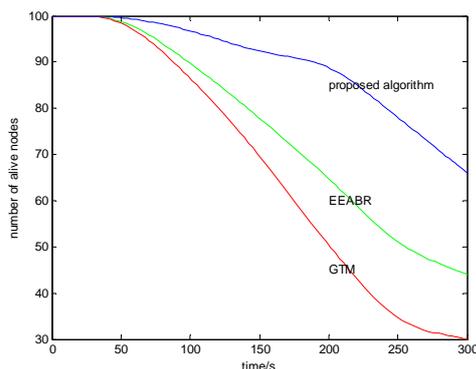


图2 网络生存周期结果

3 结语

目前,无线传感网的应用日益广泛,包括军事应用、智能家居、环境监测与健康护理等多个领域。能量是保证网络生存时间的重要指标,同时也影响着网络的路由选择与数据传输的质量。有效地实现能量的均衡控制有利于延长网络生存时间。本文提出一种基于贝叶斯博弈的无线传感网能量均衡算法。在本算法中,节点以广播的方式转发数据。在一个时间槽内,源节点发送数据之后,由其邻居节点根据自己的能量水平选择是否转发,并选择为源节点转发数据包的数量。本文将源节点的邻居节点的两个决策过程看做两个博弈过程。第一个博弈过程为源节点的相邻节点与源节点的其他相邻节点之间的博弈。在这个博弈过程中,节点结合自身的能量水平和参与博弈节点的战略,构造静态贝叶斯博弈模型,以最优化期望收益函数的解作为节点参与路由转发数据包的最优决策概率;第二个博弈过程为源节点与其相邻节点之间的博弈,源节点与邻居节点根据能量水平及相互战略,构造博弈模型,决定双方在博弈阶段的最优转发包数量。本文在实验过程中,忽略节点在计算博弈时消耗的能量。实验表明本文提出的算法转发成功率与生存时间性能

都高于现存的能量均衡算法。下一步的工作是进一步研究在博弈过程中,节点因博弈过程所消耗的能量对整个网络发送成功率与网络生存周期的影响,并探讨该模型对网络延迟的影响,进一步提高模型的有效性。

参考文献

- 1 Yick J, Mukherjee B, Ghosal D. Wireless sensor network survey. *Computer Networks*, 2008, 52(12): 2292–2330.
- 2 徐立锋.基于无线传感器网络技术在交通信息采集系统的应用. *计算机软件与应用*, 2012, 29(4): 236–241.
- 3 Feki MA, Kawsar F, Boussard M, et al. The internet of things: The next technological revolution. *Computer*, 2013, 46(2): 2425.
- 4 Tan R, Xing G, Liu B, et al. Exploiting data fusion to improve the coverage of wireless sensor networks. *IEEE/ACM Trans. on Networking*, 2012, 20(2): 450–462.
- 5 王辛果,张信明,陈国良.时延受限且能量高效的无线传感网络跨层路由. *软件学报*, 2011, 22(7): 1626–1640.
- 6 Huang H, Hu G, Yu F. Energy-aware geographic routing in wireless sensor networks with anchor nodes. *International Journal of Communication Systems*, 2013, 26(1): 100–113.
- 7 Chang TJ, Wang KC, Hsieh YL. A color-theory-based energy efficient routing algorithm for mobile wireless sensor networks. *Computer Networks*, 2008, 52(3): 531–541.
- 8 Pantazis NA, Nikolidakis SA, Vergados DD. Energy-efficient routing protocols in wireless sensor networks: A survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2013, 15(2): 551–591.
- 9 Nikolidakis SA, Kandris D, Vergados DD, et al. Energy efficient routing in wireless sensor networks through balanced clustering. *Algorithms*, 2013, 6(1): 29–42.
- 10 赵永辉,史浩山.一种无线传感器网络数据包转发的博弈论算法. *西安电子科技大学学报*, 2012, 37(6): 1125–1131.