

Aggregation Routing for Wireless Sensor Networks Based on Game Theory

HUANG Qi-ming*, LIU Xiao

(Department of communication engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083)

Abstract: This paper studied the impact of the link quality of routing path and residual energy of nodes on overall network energy efficiency and reliability, and developed a game-theoretic model of reliable aggregation routing for wireless sensor network. A distributed algorithm based on sensors' payoffs was proposed since computing optimally reliable routing paths is NP-Hard (Nondeterministic Polynomial-Hard) under the game-theoretic model. Simulation results show that the algorithm can improve the path reliability of sensor network and makes the network more energy-efficient.

Key words: game theory; wireless sensor networks; reliable routing.

EEACC: TP6150M

基于博弈理论的无线传感器网络融合路由研究

黄旗明*, 刘笑

(北京科技大学通信工程系, 北京 100083)

摘要: 主要研究了无线传感器网络路由路径的链路质量及节点剩余能量对网络整体可靠性及能效的影响, 提出了无线传感器网络数据融合可靠路由的博弈论模型。该模型的求解属于 NP 问题, 论文还提出了一种基于节点效用进行路由选择的分布式实现算法。仿真结果表明该算法能提高网络路由路径的可靠度和能效性。

关键词: 博弈论; 无线传感器网络; 可靠路由

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2008)11-1905-04

无线传感器网络 (Wireless Sensor Network, WSN) 是一种由大量集成传感器、数据处理单元和短距离无线通信模块的微小节点组成的以数据为中心的无线自组织网络, 每个节点都具有一定的计算和感知能力, 并且网络可在无人看管的环境下工作。

由于无线传感器网络能量极为有限, 针对该类网络的路由算法必须是节能的。目前已有大量研究工作从不同角度力求延长传感器网络的寿命^[1], 在文献[2-3]中, 一些以节约能量为目的的算法相继提出。如 LEACH 协议中簇头节点与 Sink 节点直接通信会导致网络中部分节点能量损耗过快; PE-GASIS 协议与 PEDAP 协议都属于集中式算法, 维护全局信息需要很大的代价, 因此伸缩性较差, 在网络规模很大时, 会产生很大的延迟。

事实上, 路径选择应更多地考虑网络整体效用,

对网络路径效用估计不再单纯是“最短路径最佳”, 而是整个网络路径效用最佳。这种路由算法的目标即为均衡网络整体效用与节点个体利益之间的资源竞争, 其中如何处理各参数之间的相互关系是关键环节。博弈理论是对冲突和合作局势分析研究的一种定量工具, 在网络资源分配研究中有广泛应用。Nash 均衡是指在博弈中, 任何参与者不能依靠单方面改变自身策略而期望获得更高效益。文献[4]研究了 Nash 均衡的存在性并给出了 Nash 均衡存在性定理。本文利用博弈理论构建无线传感器网络中的可靠数据融合路由, 同时考虑在路径链路质量, 节点剩余能量及消耗能量这三个重要参数的约束下如何寻找一棵最优融合树。

1 建立算法博弈论模型

能量消耗固然是传感器网络中的一个重要参

数,但与此同时也要看到,一些传感器网络的应用需要将节点部署在危险的环境中,如生态污染区或者地震多发地区。在这些区域中传感器节点之间的链路变化频繁,低功率的无线射频通信由于信道噪声,多跳路由,环境的剧烈变化,节点失效等因素,有高度的不稳定性。因此,从源节点到汇聚节点间数据传输路径的可靠性也成为一个重要影响参数;与此同时,要均衡网络中节点之间的能量消耗,必须考虑的各传感器节点的剩余能量,即需要考虑的第三个网络参数,它会影响网络与节点的生命周期。

基于博弈论实现思想,可将上述任务模型中可靠路由问题看作是在网络中的博弈问题。在这种博弈中,网络各源节点作为参与者,每条路径上可靠度及剩余能量为效用函数的输入参数。在进行路由选择时,总是期望每条路径效用最佳,也即选择高能高可靠性的路由路径,同时考虑个体节点的路由开销,建立无线传感器网络中的可靠数据融合路由 RDAR (Reliable Data Aggregation Routing)。

设无线传感器网络由 N 个节点组成,每个节点为博弈中的参与者,表示为 $S = (s_1, \dots, s_i, \dots, s_n)$ 。设节点 i 发送数据到节点 j 的传输数据能量消耗为 E_{Tx} , 节点 j 接收节点 i 数据的接收数据能量消耗为 E_{Rx} , 用 c_{ij} 表示 i 到 j 的成本: $c_{ij} = E_{Tx} + E_{Rx}$ 。假设时间 t 内节点 A 收到来自节点 B 的报文数量为 r , 丢失的数量为 f 。采用窗口平均的指数加权滑动平均方法 WMEWMA (t, λ)^[5], 它定义了一个接收报文的窗口来测量接收到的数据报文, 在时间窗口 t 内, 设 r 为接收方在窗口内实际接收到的数据包个数, f 为丢失数据包的总数, 利用 $f(0, 1)$ 对其进行平滑, 则这段时间内节点 A 对节点 B 的接收质量估计为:

$$P_{t+1} = \lambda P_t + (1 - \lambda) * \frac{r}{r + f}$$

任意一棵融合树上每一个节点 s_i 所获得的收益 X_i 应为 s_i “前向”(即 s_i 到 s_q 方向)的链路质量预测值的函数;同时,要建立剩余能量高的路径,收益也应该是节点 s_i 前向节点的剩余能量的函数。因此,该博弈的效用函数为:

$$U_i(a) = \begin{cases} X_i - c_{ij}, & \text{if } s_i \in T \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

$X_i = E_i P_i$, 其中 E_i 为节点 i 前向邻居节点的剩余能量, P_i 为节点 i 到前向邻居节点的链路质量预测值。

每一个节点的策略都是一个二元向量:

$$a_i = (a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{ii-1}, a_{ii+1}, \dots, a_{in})$$

其中 $a_{ij} = 1$ ($a_{ij} = 0$) 表示节点 s_i 向/不向节点 s_j 发送数据包。限定节点的策略空间必须非空且不允许有使得节点连接到它祖先节点的策略存在。节点 s_i 的策略空间为对特定的某一个节点 s_j 来说 $\text{Prob}[a_{ij} = 1] = 1$, 对于除 s_j 以外的其他节点则为 $\text{Prob}[a_{ij} = 1] = 0$ 。这样一来就避免的环路的形成。则每一个有意义的策略集 $a = (a_1, \dots, a_n)$ 就会形成一个以汇聚节点 s_q 为根的反向树 T 。当树上所有节点 s_i 的策略 a_i 满足:

$$0 \leq U_i(a_i, a_{-i}) \leq U_i(a_i, a_i) \quad \forall a_i \in A_i$$

时,即策略 a_i 为参与者 i 面对 a_{-i} 时的最佳应对策略,根据博弈理论的定义^[6] 策略集 $a = (a_1, \dots, a_n)$ 就形成一棵最优的 RDAR 树 T_{opt} 。

2 分布式实现算法

根据上一小节算法博弈模型的定义,在网络中寻找一棵最优树的过程可近似看作 Steiner 树问题。所谓 Steiner 树问题是指在一个赋权图中找到包含给定基本节点集合的权值最小/最大的一棵树。要寻找的最优树即是其上每一个节点的效用比在其它任何融合树上的效用值都大的 Steiner 树。而 Steiner 树问题是网络中的一个 NP 完全问题^[7], 所以 RDAR 路由问题属于 NP 完全问题。

本小节中提出一种分布式算法来近似计算最优 RDAR 树。算法基于网络局部的路由信息进行路由决策,在网络初始化时利用将网络分层的方式(在报文中用 hop-count 域保存节点所在层次)来保证算法的收敛性同时可实现避免路由环路的出现;每个节点只需通过监听邻居的探测报文来维护一个容量很小的邻居表,采用流数据管理中 FREQUENCY 算法^[8]的思想来管理邻居表中的节点信息,此算法通过在报文中增加频率计数 count 域来捕获节点与其邻居的通信状况,研究表明这种算法可在流数据中挖掘出“好”的邻节点并有效保持节点质量,且算法实现非常简单,减少了节点的计算开销;此外,在进行父节点选择时使用节点效用值作为路由尺度,利用博弈效用模型构建可靠融合树。

在 RDAR 路由协议中, sink 节点与源节点执行不同的功能。

对于 sink 节点,它的基本功能有:周期发送探测报文;接收探测报文;发送兴趣查询命令消息;接收传感数据消息。

源节点的功能实现是 RDAR 协议设计中的核心。其主要操作有:周期发送探测报文;接收探测报文;接收兴趣查询命令消息;多跳路由选择;发送传感/融合数据消息;接收/融合传感数据消息。

其中发送/接收探测报文用来进行邻居发现,对于源节点来说,这也是多跳路由选择的基础。源节点进行路由选择的算法如下:

At each sensor s_i :

节点 s_i 收到节点 s_j 的探测报文 BcastM

若 $s_j.hop-count < s_i.hop-count$ 则到 , 否则丢弃该探测报文

若 s_j 已在 s_i 的邻居表 T 内,则到 , 否则到

更新节点 s_j 在邻居表内的相关信息

节点 s_j 对应表项 $E_{s_j}.count = E_{s_j}.count + 1$

若邻居表中存在某一表项的 $E.count = 0$ 则到 , 否则到

将节点 s_j 相关信息存入 $E.count = 0$ 的表项中

不存在 $E.count = 0$ 的表项,则丢弃 s_j 的探测报文且邻居表中每一项 $E.count = E.count - 1$

对于邻居表中所有保存的邻节点计算效用:

$$i(E_{ij}) = E_{ij}.Renergy * E_{ij}.P - c(E_{ij})$$

$$I = I / (I) = \max(i(E_{ij}) \forall E_{ij})$$

Neighbor T)

⑪ 将节点 s_i 的下一跳节点设为邻节点 I 。

3 仿真结果

本小结将仿真分析比较采用博弈效用模型的 RDAR 协议与最短路径 (Shortest Path SP) 与最小重传 (Minimum Transmission MT) 两种使用不同路由尺度的协议。其中 SP 采用每次选取所有邻居中跳数 (hop-count) 最小的节点作为父节点的方法, SP(70%) 设置门限为链路质量高于 70% 的节点才被认为是邻节点作为备选父节点; MT 则利用平均重传次数作为选择父节点的度量。

采用以下几个重要参数来评价各协议的性能:

跳数分布 衡量全网节点的路由深度,这也同时反映了端到端的延迟与能量开销。

路径可靠度 为路径上每一个节点链路质量的累积,这个参数可近似反映端到端的可靠度

稳定性 网络在一段时间内的路由改变次数,反映路由拓扑的稳定性。

仿真使用了 100 个节点,分布为 10 × 10 的网格,节点间隔为 8foot,汇聚节点的位置在左下角以

最大化网络深度,仿真时间为 2 000 s。每一个节点以 10 s/数据报文的周期采样传感器,路由报文周期为 20 s。协议都采用 WMEWMA 的稳定设置 ($t = 30, \alpha = 0.6$) 作为链路质量估计器。在仿真中 RDAR 协议使用的邻居表限制为 20 个表项,其他协议则使用足够大的邻居表来管理邻节点,每个仿真结果都为 10 次相同条件仿真的平均值。

图 1 为四种协议的跳数分布图。SP 产生的网络深度较其他三种协议“浅”,在网络整体宽度为 80foot 的情况下,多数节点都是在 2 到 3 跳的距离内到达根节点,许多链路跨越了 30 到 40foot 的距离; SP(70%) 和 MT 的跳数分布较宽,为寻求高质量的路径它们会选择链路质量高的近距离下一跳邻居,是用更多的跳数做代价来换取高质量传输链路; RDAR 同时考虑了跳数和链路质量两种路由尺度,所以跳数分布在前述两种情况之间。

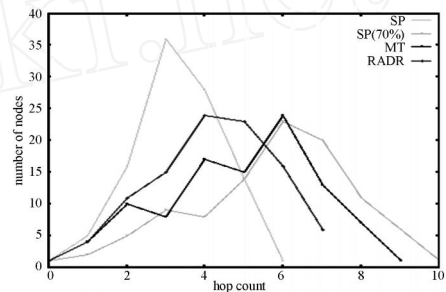


图 1 四种协议跳数分布

图 2 为这些协议的路径可靠度分布图,可以看出 SP 的路径可靠度最差,实际上在节点间的路径距离超过 50foot 时 SP 的可靠度基本会下降到 40% 以下。采用了链路质量估计的协议产生的路径可靠度有显著提高, MT 与 RDAR 都倾向于选择链路质量最高的路径,在距离为 100foot 时也可获得较高的路径可靠性,其中 RDAR 要比 SP(70%) 的路径可靠度高 10% 左右。

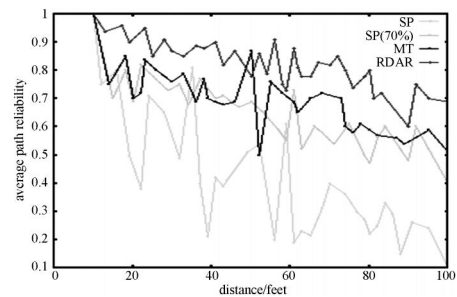


图 2 四种协议路径可靠度随距离变化图

图 3 为路由结构随时间变化的曲线图, RDAR 协议最稳定,这是因为协议对邻居表进行的有效管理使得邻居表内的可选父节点减少而同时保证了备选节点的高质量。

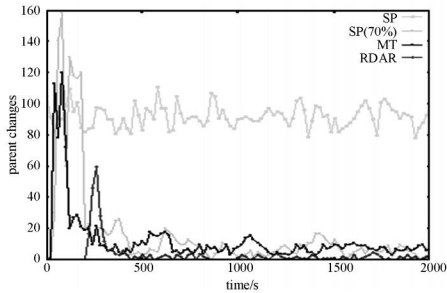


图3 四种协议稳定性

4 结语

本文在简要介绍博弈论相关理论的基础上,提出一种在无线传感器网络中建立可靠数据融合路由的博弈模型,利用博弈论模型来解决网络在多种约束下的均衡问题。随后提出的分布式实现算法及基于算法的仿真结果表明, RDAR 路由可在一定程度上提高网络的路径可靠度及能量有效性,提高了网络性能。下一步需要研究的问题是对算法的优化,如对链路质量估计的影响等,类似研究对于部署在恶劣环境中的大型无线传感器网络很有意义。



黄旗明(1968-),男,北京科技大学副教授,主要研究自组织网络、无线传感器网络、可信网络、无线定位、数据挖掘等技术,到香港大学访问, qmhuangcn@163.com

参考文献:

- [1] Ye W, Heidenmann J, Estrin D. An Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks [C]// Proc. of the IEEE INFOCOM. 2002 [EB/OL]. http://www.isi.edu/div7/publication_files/Ye02a.pdf.
- [2] Lindsey S, Raghavendra CS. Pegasus: Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems [C]// Proc. of the IEEE Aerospace Conf. 2002:1-6.
- [3] Bandyopadhyay S, Coyle E. An Energy-Efficient Hierarchical Clustering Algorithm for Wireless Sensor Networks [C]// Proc. of the IEEE INFOCOM. 2003.
- [4] Nash J F. Noncooperative Games[J]. Annals of Mathematics, 1951, 54:289-295.
- [5] Alec Woo and David Culler. Evaluation of Efficient Link Reliability Estimation for Low-Power Wireless Sensor Networks [R]. Technical Report UCBCSD-03-1270, U. C. Berkeley Computer Science Division, 2003.
- [6] Fudenberg D and Tirole J, Game Theory [M]. Cambridge, MA: MIT Press, 1991.
- [7] VoB S. Steiner's Problem in Graphs: Heuristic Method[J]. Discrete Applied Mathematics, 1992, 40(1):45-72.
- [8] Demaine E D, Lopez-Ortiz A, and Munro J L. Frequency Estimation of Internet Packet Streams with Limited Space [C]// Proceedings of the 10th Annual European Symposium on Algorithms ESA 2002. September 2002:348-360.