

基于能量均衡的无线传感器网络机会泛洪算法

王 浩, 杨秋翔, 杨 剑, 伍玉良

(中北大学 电子与计算机科学技术学院, 山西 太原 030051)

摘 要: 传统的机会泛洪算法在低占空比无线传感器网络中, 容易造成“瓶颈”节点转发大量数据而导致自身能量消耗过快, 加速死亡, 从而造成网络分割. 针对该算法存在的缺陷, 新算法在选择发送节点时, 充分考虑到了节点的剩余能量和节点间通信链路的质量, 达到了节点能量均衡的效果, 解决了网络中瓶颈节点因负载过大而过早死亡的问题. 通过仿真实验表明, 在保证较低端到端时延和较高投递率的前提下, 新算法有效地延长了网络的生命期和增强了网络可靠性.

关键词: 无线传感器网络; 机会泛洪; 低占空比; 能量均衡; 网络生命期; 剩余能量

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2012)05-0034-04

Opportunistic Flooding Algorithm Based on Energy-Balanced for Wireless Sensor Network

WANG Hao, YANG Qiu-xiang, YANG Jian, WU Yu-liang

(School of Electron and Computer Science and Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: By using traditional opportunistic flooding (OF) algorithm, the “bottleneck” nodes are burdened with heavy relay traffic via multi-hop communication and tend to die earlier and that leads to the network being partitioned in low-duty-cycle wireless sensor networks. Based on the defect of OF algorithm, the new algorithm fully considers the link quality and node’s remaining energy when selects the node to be the sender. It maintains the energy balance of the nodes and solves the problem of rapid death of “bottleneck” node due to large load. The simulation results shows new algorithm ensures a low end-to-end latency and high delivery rate, effectively extends the network lifetime and enhances the network reliability.

Key words: wireless sensor networks; opportunistic flooding; low-duty-cycle; energy balance; network lifetime; remaining energy

1 引言

在无线传感器网络[1]中, 传感器节点通常携带的电池能量都是非常有限的, 一旦传感器节点部署后, 尤其是部署到环境比较复杂的区域^[2-4], 基本上不可能给传感器更换电池或者给电池充电. 因此, 如何使电池的能量得到高效利用, 从而延长网络的生命周期是无线传感器网络面临的首要挑战^[5].

传感器节点能量消耗主要集中在监听无线信道和收发数据包. 近些年, 有很多算法通过减少空闲监

听和串音消耗的能量, 延长节点的生命期. 空闲监听问题^[6]是指即使信道处于空闲状态, 没有任何数据传输, 节点仍然处于监听模式, 并消耗了大量的能量, 造成了能量浪费. 而串音问题是指一个节点收到并处理了原本不是发给自己的数据包, 造成节点接收模块和处理器模块消耗更多的能量.

在无线传感器网络中, 为了减少能量的浪费, 占空比是一种很重要的机制. 占空比技术通过使节点在睡眠和工作状态之间周期性的切换来节约能量^[7]. 尤其在低占空比的方式下, 使传感器节点尽可

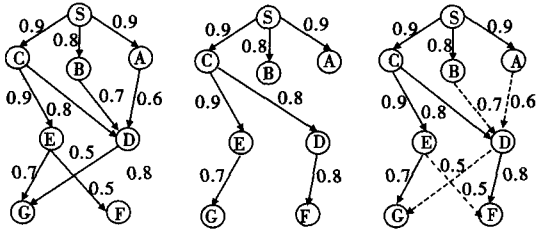
收稿日期: 2011-10-16; 修回日期: 2011-11-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(50475176, 50675015); 山西省科技攻关项目(20090322004)

能的处于睡眠状态来降低节点能量的消耗. 本文讨论的机会泛洪(Opportunistic Flooding, OF)算法就是一种针对低占空比无线传感器网络设计的路由算法. 但是 OF 算法未考虑到节点能量均衡问题. 本文提出的新算法充分考虑到了节点的剩余能量和链路的质量, 提高了传感器节点的能量均衡性, 延长了网络的生命期.

2 OF 算法简介

文献[8]针对低占空比无线传感器网络, 提出了一种基于延时驱动的机会泛洪的路由算法. 如图 1(a)所示, 原始的网络的泛洪结构是一个有向无环图. 每条有向边的权重代表了该链路的质量, 权重越大说明该通信链路的质量越好. 基于这个有向无环图, 选择每个顶点的质量最好的入边, 可以构造一棵能量最优树, 如图 1(b)所示. 通过能量最优树广播数据包, 传输的总次数的期望值可以取到最小值.



(a) 原始网络 (b) 能量最优树 (c) 机会泛洪

图1 拓扑结构图

但是, 文献[8]研究发现, 通过能量最优树泛洪数据包, 可能会造成很大的广播延时. 这是由于无线通讯机会广播的特性, 一个节点的父节点接收到数据包的时间可能晚于其父节点邻居节点. 基于这个研究结果, 作者提出了机会泛洪. 机会泛洪的核心思想是: 使用在能量最优树之外的链路(称为机会链路)发送数据包. 当且仅当一条机会链路能够使接收数据包的节点在概率上接收到数据包的时间早于其父节点接收到数据包的时间时, 使用机会链路转发泛洪包, 如图 1(c)所示, 虚线表示机会链路.

为了确定是否使用机会链路来转发泛洪包, 机会泛洪(OF)算法由两个主要步骤组成:

2.1 计算 pmf

给定一个能量最优树后, 由于无线传输的不稳定性, 每个节点的泛洪包的延时是一个变量. 首先, 应该计算延时的分布. 通过计算和比较泛洪包的延时, 一个节点可以决定是否使用能量最优树之外的机会链路来转发数据包. 用概率质量函数(probability mass function, pmf)来表示包延时分布. 这个

计算过程从源节点(第 0 层)节点开始, 然后逐层计算. 最初, 假设源节点总是处于工作状态, 源节点接收到数据包的概率为 100%, 延时为 0, 表示为(0, 100%). 然后, 第 1 层的节点基于其第 0 层父节点的 pmf 的值, 计算它的 pmf 值. 同样的, 第 $(l+1)$ 层节点基于其第 l 层父节点的 pmf 值可以计算得出它的 pmf 值. 给定第 l 层节点的 pmf 值(例如: 对于任意节点 i , 工作时间单元 $t_l(i)$ 和接收的概率 $p_l(i)$ 和对于任意节点 j 的工作时间单元 $t_{l+1}(j)$, 在第 $(l+1)$ 层的任意节点, 在该节点的第 j^{th} 个工作时间单元, 可以用公式(1)计算该节点收到泛洪包的概率:

$$p_{l+1}(j) = \sum_{i: t_l(i) < t_{l+1}(j)} p_l(i)q(1-q)^{n_{ij}} \quad (1)$$

其中 q 表示链路的质量, 并且满足 $q \in (0, 1]$; n_{ij} 表示第 $(l+1)$ 层的节点在时间 $t_l(i)$ 和 $t_{l+1}(j)$ 之间工作时间单元的个数. $p_l(i)q(1-q)^{n_{ij}}$ 表示泛洪包在第 l 层节点的第 i^{th} 个工作时间到达应并且在第 $(l+1)$ 层节点的第 j^{th} 个工作时间第一次转发到该第 $(l+1)$ 层节点的概率.

2.2 决策过程

通过计算得到的延时分布, 一个节点可以找到它的 p 分位延时(用 D_p 表示). p 分位延时是一个延时的临界值, 并且这个延时临界值被共享到节点的前一跳节点, 具体意义为: 如果一个泛洪包到达一个节点的时间晚于 D_p , 则这个节点将以大于 p 的概率已经从其父节点收到该泛洪包. 对于每一个新收到的数据包, 一个节点计算数据包延时的期望值(表示为 EPD), 然后比较 EPD 和 D_p , 根据比较结果来决定是否转发这个数据包给下一跳节点.

假设第 l 层的节点 A 在第 i^{th} 个工作时间接收到了一个数据包. 节点 A 将要决定是否把这个数据包发送给处在第 $(l+1)$ 层的孩子节点 B . 如果节点 A 将这个数据包发送给节点 B , 则从节点 A 到节点 B 的 EPD 可以用公式(2)计算.

$$\text{EPD} = \sum_{i: t_{l+1}(j) > t_l(i)} t_{l+1}(j)q(1-q)^{n_{ij}} \quad (2)$$

其中 q 是节点 A 与节点 B 链路的质量, n_{ij} 表示节点 B 在时间 $t_l(i)$ 和 $t_{l+1}(j)$ 之间工作时间单元的个数. 如果 $\text{EPD} \leq D_p$, 则说明下一跳节点通过能量最优树的链路已经收到该数据包的概率不大于 p , 则该节点转发这个数据包给下一跳节点; 如果 $\text{EPD} > D_p$, 则说明下一跳节点已经以大于 p 的概率通过能量最优树的路径收到了该数据包, 则这个数据包对下一跳节点来说是重复的数据包, 该节点将不会

转发这个数据包给下一跳节点。

例如,在图 1(c)中,可以看到节点 B 到节点 D 有一条机会链路. 对于一个链路的质量 q , $\left\lceil \frac{1}{q} \right\rceil$ 表示成功转发一个数据包的发送次数的期望值. 链路 B 到 D 的质量为 0.7, 所以从节点 B 成功的发送一个数据包到节点 D, 发送次数的期望值为 2. 假设 p 的值为 0.9, 所以 D_p 的值为 25. 因为节点 D 在时间点 25, 通过能量最优树的路径收到数据包的概率为 0.94(0.72+0.22) 大于 0.8. 现在假设节点 B 的工作时间为时间点 7, 17, 27, 37 等等. 所以节点 B 在时间点 7 从源节点 S 成功的收到了泛洪包. 节点 B 在时间点 17 和 27 分别第一次和第二次试图通过机会链路发送该泛洪包给节点 D. 因此节点 B 的 EPD 值为 27. 因为 $EDP=27 > D_p=25$, 所以在这个例子中, 节点 B 认为节点 D 已经收到了这个泛洪包通过能量最优树的路径, 节点 B 不会转发这个数据包给节点 D.

3 OF 算法的缺陷分析

从上述的分析可以得出, OF 算法能量消耗可能会过于集中在某一条链路质量较好的节点上. 这样就会造成链路质量较好的链路上的两个节点可能会过早的消耗完电池能量, 停止工作. OF 算法的能量均衡性不高, 可能会造成某些瓶颈节点过早的耗尽能量.

图 1(c)中: 节点 E 只有一个父节点(节点 C). 节点 C 有两个孩子节点(D 和 E, 并且两个节点都在能量最优树上). 节点 D 有三个父节点(A, B 和 C, 其中只有节点 C 在能量最优树上, 另外两条链路是机会链路). 每次当节点 A, 节点 B 和节点 C 竞争决定哪一个节点给节点 D 发送泛洪包的时候, 因为节点 C 到节点 D 的链路质量在这三条链路中是最好的, 所以每次节点 C 都有很高的概率被选为发送者. 这样就会造成节点能量消耗严重不均衡, 节点 C 消耗能量的速度远远大于节点 A 和 B, 节点 C 就会过早“死去”. 结果造成节点 E 成了孤立节点, 即使节点 E 到节点 C 的链路质量很好, 节点 E 有足够的能量, 节点 E 也不能收到泛洪包.

4 OF 算法的改进

本文针对 OF 算法能量均衡差的问题, 提出了一种改进算法. 在 OF 算法的基础上, 本改进算法在选择发送节点的时候, 考虑到了发送节点的剩余能

量. 通过比较, 一个节点同时有高的剩余能量和到接收节点质量好的链路将会有更高的概率被选为发送节点. 从而提高节点能量的均衡性, 进一步提高网络的生命周期.

本改进算法使用到了节点的剩余能量. 在文献[9]中, 作者提出了一种剩余能量检测方法. 这种方法具有良好的扩展性, 能够不断地计算出每个节点的剩余能量水平. 我们可以使用这种方法来得到每个节点的剩余能量.

使用公式(3)来计算每个节点的权重, 权重越大, 该节点被选为发送节点的概率也就越大.

$$w_k = e_k \times p(j) \quad (3)$$

其中, e_k 表示节点 k 的剩余能量, $p(j)$ 表示节点 k 的孩子节点在第 j^{th} 个工作时间收到数据包的概率, 通过公式(1) 计算得出. $p(j)$ 同时考虑到了链路质量和节点的工作时间, 所以 $p(j)$ 值越大, 则说明父节点能尽早的通过相对可靠的链路将泛洪包传送给孩子节点. 通过公式(3) 计算, 本改进算法选择发送节点时, 将会同时考虑到节点间的链路质量来保证可靠传输, 同时也考虑到了节点的剩余能量, 达到了节点能量的均衡利用.

5 仿真和分析

为了验证本文改进算法对 OF 算法在能量均衡性方面的改进, 用 C# 编写的模拟器仿真了两个算法在不同占空比下的性能. 同时为了取得更客观准确的实验数据, 全部数据采用 100 次相同实验的平均值. 为了使仿真结果更加精确, 本仿真参考了文献[10]中能量消耗模型. 文献[10]中数据表明, Chip-Con CC2420 无线收发器用于接收和监听的能量为 18.8 mA, 用于发送的能量为 17.4 mA. 在仿真中假设每个节点初始都有 100 000 mA 的能量.

进行仿真实验时, 本文主要从以下三个性能指标考察算法的性能:

(1) 网络生命期. 本文定义网络生命周期为从第一个节点开始发送数据包, 到第一次出现一个节点消耗完其所有能量. 因为一旦第一个节点因为能量耗尽, 不能再工作以后, 整个网络的连通性就不能保证.

(2) 端到端时延. 数据包从产生到目的节点接收所需平均时间.

(3) 投递率. 目的节点最终所收到数据包数量占发出数据包数量的百分比.

本文中使用特定的时间单位测量网络生命期和

泛洪包的时延. 一个特定的时间单位长度为一个数据包从发送节点到目的节点所用的时间.

图2和图3分别为占空比与平均网络生命期、平均泛洪延时的关系,在固定网络大小和节点数目的实验平面区域内,通过改变节点的占空比(从5%到30%)来改变节点的工作时间,从而影响网络的生命期和泛洪包的延时.

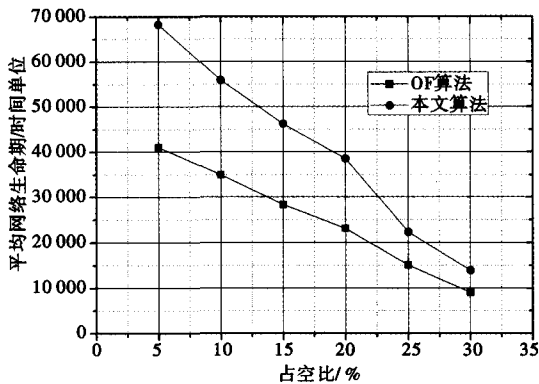


图2 占空比与平均网络生命期的关系

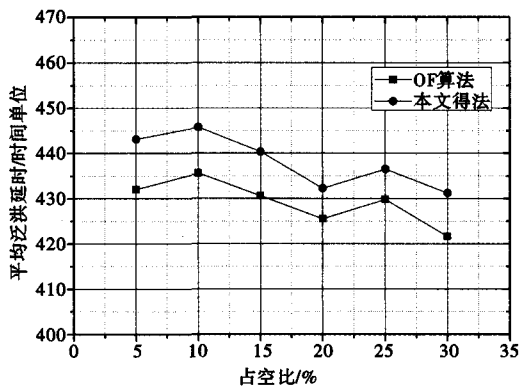


图3 占空比与平均泛洪延时的关系

在图2中,通过OF算法与本文算法的对比,可以明显看出在相同占空比的情况下,本文算法的平均网络生命期明显优于OF算法,尤其是在低占空比的情况下,优势更为明显. 在占空比为5%的时,平均网络期提高了约43%. 同时,随着占空比的增大,两种算法的网络生命期都在减小.

在图3中,通过实验数据可以看出,增大占空比,两种算法的平均泛洪包延时变化不大. 由于OF算法更倾向于使用能量最优树的链路来广播数据包,所以从图中可以看出,OF算法的性能要略好于本文算法. 但是相对于网络生命期来说,平均泛洪延时性能差距很小,仅为3%.

图4是固定占空比为5%的情况下,比较两种算法的投递率. 通过实验数据可以看出,当网络中出

现失效节点时,网络产生了断路从而造成若干数据包的丢失,导致投递率下降. 在40 000和70 000时间点,OF算法和本文算法分别出现了失效节点,这个和图2的结果吻合. 在实验后期因为失效节点过多,造成投递率明显下降.

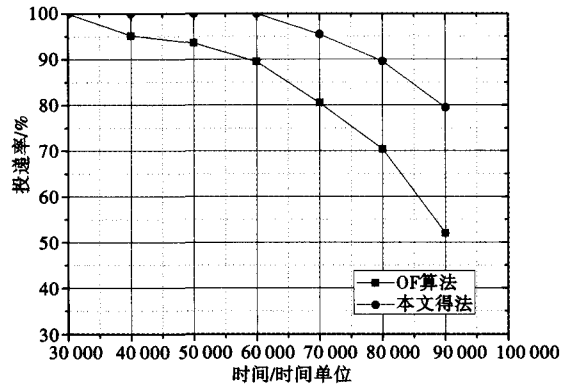


图4 投递率与时间的关系

6 结束语

OF算法使用能量最优树中链路泛洪数据包,以快速泛洪为目标,但是忽略了能量均衡问题,导致瓶颈节点因负载过大而较快死亡,缩短了网络生命期. 本文算法通过充分考虑链路质量和节点剩余能量等因素,达到能量均衡的效果,避免瓶颈节点担当数据转发任务时能耗过大的问题,从而延长了网络的生命期. 仿真实验结果表明,本分算法在牺牲很小泛洪延时的情况下,有效地延长了网络的生命期和提高了网络的可靠性.

参考文献:

- [1] Yick Jennifer, Mukherjee Biswanath, Ghosal Dipak. Wireless sensor network survey[J]. Computer Networks, 2008, 52 (12): 2292-2330.
- [2] Akyildiz I F, Su W. Wireless sensor networks: a survey [J]. Computer Networks, 2002, 38(4):393-422.
- [3] Shi Jun Feng, Zhong Xian Xin, Chen Shuai, et al. Architecture and characteristics of wireless sensor networks [J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2005, 8(2): 16-19.
- [4] Akyildiz I F, Kasimoglu I H. Wireless sensor and actor networks: research challenges [J]. Ad Hoc Networks Journal, 2004, 4(2): 351-367.
- [5] Vuran M C, Akan O B, Akyildiz I F. Spatio-temporal correlation: theory and applications for wireless sensor networks [J]. Computer Networks, 2004, 45 (3): 245-261.

(下转第41页)

义距离、概念节点深度及概念节点密度等因素,并加入了调节因子,通过调节因子来表现出这些因素对计算语义相似度的权重及影响程度,且其中调节因子的设置可以使该计算方法在不同的情景的灵活使用。但是,这种计算方法也有一定的局限性,例如:在这种树状结构中,语义关系只是考虑该概念节点的直接父节点及同一层中与其相邻的概念,并没有考虑其他概念,所以在这个方面该计算方法还需要继续改进。

参考文献:

- [1] Lin D. An information-theoretic definition of similarity [C]//Proceedings of 15th International Conference on Machine Learning. USA San Francisco, 1998: 296-304.
- [2] 刘群,李素建. 基于《知网》的词汇语义相似度计算[J]. Computational Linguistics Chinese Language Processing, 2002, 7(2): 59-76.
- [3] Doan A H, Madhavan J, Domingos P. Learning to map between ontologies on the semantic web [C] // Proceedings of the 11th International Conference on World Wide Web. USA: New York, ACM Press, 2002: 662-673.
- [4] Wong A K Y, Ray P, Waran N P. Ontology mapping for the interoperability problem in network management [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communication, 2005, 23(10): 2058-2068.
- [5] 李鹏,陶兰,王弼左. 一种改进的语义相似度计算及其应用[J]. 计算机工程与设计, 2007, 28 (1): 227-229.
- [6] 魏韡,向阳. 一种基因本体术语间的语义相似度计算方法[J]. Computer Engineering and Applications 计算机工程与应用, 2010, 46(26): 114-116.
- [7] 陈沈焰,吴军华. 基于本体的概念语义相似度计算及其应用[J]. 微电子学与计算机, 2008, 25(12): 96-99.

作者简介:



韩欣女, (1986—), 硕士研究生。研究方向为计算机应用技术。

(上接第37页)

- [6] Wei Ye, John Heidemann, Deborah Estrin. An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks [C]//Proceedings of Twenty-First Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. New York: Proceedings of the IEEE, 2002: 1567-1576.
- [7] Michael Buettner, Gary Yee, Eric Anderson, et al. X-MAC: A short preamble MAC protocol for duty-cycled wireless sensor networks [C]//Proceedings of the 4th international conference on Embedded networked sensor systems. New York: ACM Association for Computing Machinery, 2006: 307-320.
- [8] Guo S, Gu Y, Jiang B, et al. Opportunistic flooding in low-duty-cycle wireless sensor networks with unreliable links [C]//Proceedings of the 15th annual international conference on Mobile computing and networking. New York: ACM Association for Computing Machinery, 2009: 133-144.
- [9] Zhao Y, Govindan J, Estrin R D. Residual energy scan for monitoring sensor networks [C] // Wireless Communications and Networking Conference. Orlando: Proceedings of the IEEE, 2002: 356-362.
- [10] Texas Instruments. 2.4 GHz IEEE 802.15.4/ZigBee-ready RF transceiver (Rev. B) [EB/OL]. [2007-03-20]. <http://focus.ti.com/docs/prod/folders/print/cc2420.html>.

作者简介:

王浩男, (1985—), 硕士研究生。研究方向为无线传感器网络。

杨秋翔男, (1969—), 教授, 硕士生导师。研究方向为软件设计方法及应用、网络技术应用。

杨剑男, (1979—), 博士研究生。研究方向为计算机视觉及图像处理。

伍玉良男, (1985—), 硕士研究生。研究方向为信息隐藏、嵌入式系统。