

无线传感器网络中能量均衡可靠路由度量方法

徐久强, 丁玉官, 赵海, 张希元, 毕福伟

(东北大学信息科学与工程学院, 沈阳 110004)

摘要: 针对无线传感器网络的资源限制以及对传输可靠性的特殊要求, 提出一种能量均衡路由度量方法 EBETX。以 ETX 值作为路由度量的同时, 兼顾网络中节点能量消耗情况, 保证网络各节点能量均衡消耗, 延长网络的生存时间, 实现高效路由与能量均衡的有效权衡。通过 NS2 仿真实验验证了该方法的可行性。

关键词: 无线传感器网络; 能量均衡; 可靠路由度量; ETX 度量方法

Energy-balanced Reliable Routing Metric Method in Wireless Sensor Network

XU Jiu-qiang, DING Yu-guan, ZHAO Hai, ZHANG Xi-yuan, BI Fu-wei

(College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004)

Abstract Aiming at the limited energy and the special requirement of transmission reliability for Wireless Sensor Network(WSN), an energy-balanced routing metric measure method, EBETX is proposed. This method avoids the data packet transmit along the lower energy path, and selects the path which has more surplus energy. It makes the energy of the nodes in the network keep balance. Simulation results by NS2 show that this method can prolong the life time of the network and implement the effective balance of transmission reliability and energy balance.

Key words Wireless Sensor Network(WSN); energy-balanced; reliable routing metric; ETX metric method

无线传感器网络是一类以应用为中心的网络, 主要任务是实现对应用环境中信息的感知和收集^[1]。因此, 保持网络的完整性、延长网络的生存时间显得尤为重要。目前, 多数路由度量方法或是仅考虑传输可靠性^[2], 未考虑网络中节点能量的均衡消耗, 导致部分节点能量过快而死亡, 破坏了网络的完整性, 或是仅考虑能量均衡^[3-5], 未考虑网络的可靠性, 网络的传输质量较差。针对这一问题, 本文提出一种能量均衡ETX路由度量方法EBETX(Energy-Balanced ETX)。

1 ETX路由度量方法

ETX 度量方法^[6]是发送节点通过定期广播探测包测得本节点与邻居节点之间正向及反向链路的包接收率, 估计正确传输 1 个数据包所需重发包的数量。发送节点周期性广播探测包, 接收节点通过 EWMA 等链路评估算法计算包接收率, 结果以“捎带”的形式返回给发送节点。ETX 值越高, 节点间链路丢包率越高。

单跳链路上 ETX 量度是实现逻辑上成功传送 1 个数据包, 期望发送数据包次数。路径的 ETX 量度是路径上每个单跳链路 ETX 累加值。考虑带有 ACK 机制的双向通信信道, 单跳链路的 ETX 值由链路的正向与反向交付率计算, 设正向链路包接收率为 p , 表示节点成功接收到数据包的概率, 反向链路包接收率为 q , 表示 ACK 包成功接收的概率。数据包被成功接收和确认的概率为 $p \cdot q$ 。发送端将重传任何没有收到 ACK 帧的数据, 每次发送数据包的过程可以看作 Bernoulli 试验, 则单跳链路上, 节点成功发送 1 个数据包, 其预期的发包数为

$$ETX = \frac{1}{p \cdot q} \quad (1)$$

一条路径 R 的 ETX 值是 R 上各单跳链路 ETX 累加和, 其计算方法如下:

$$ETX(R) = \sum_{i=1}^{hops} ETX(i) = \sum_{i=1}^{hops} \frac{1}{p_i \cdot q_i} \quad (2)$$

其中, p_i 与 q_i 为路径上第 i 跳链路的正向及反向包接收率; $hops$ 为路径经历的跳数。路径 ETX 累加值越小, 表示路径丢包率越小。在 ETX 路由度量方法中, 选择 ETX 累加值最小的路径。

2 网络寿命衡量

假设网络中有 n 个节点, 任意节点 i 。设 $m(m < n)$ 个节点存在经过该节点的路径, 每个节点存在路径数为 D_s 。节点 i 成功接收一个数据包定义为: 节点收到一个正确的数据包, 发送一个 ACK 确认, 且确认被发送节点成功收到。在发送节点成功接收到接收节点的确认前, 发送节点将重传数据包, 重传次数为 2 个节点间的 ETX 值, 所以节点成功接收一个数据包平均消耗的能量为

$$E_{rx} = ETX_i \cdot e^{rx} + \frac{1}{q_i} ACK^{tx} \quad (3)$$

其中, ETX_i 为节点 i 与其前一跳节点的 ETX 值; e^{rx} 为节点接收一个数据包能耗; ACK^{tx} 为节点发送 ACK 能耗。

节点成功发送一个数据包定义为: 节点发送数据包, 并且收到接收节点的 ACK 确认, 节点须发包的次数为 2 个节点

作者简介: 徐久强(1966—), 男, 教授, 主研方向: 无线传感器网络, 嵌入式技术; 丁玉官, 硕士研究生; 赵海, 教授; 张希元, 博士研究生; 毕福伟, 硕士研究生

收稿日期: 2008-10-20 **E-mail:** xujiuqiang@mail.neu.edu.cn

的 ETX 值, 因此, 节点成功发送一个数据包能耗为

$$E_{rx} = ETX_{i+1} \cdot e^{rx} + ACK^{rx} \quad (4)$$

其中, ETX_{i+1} 为节点 i 与下一跳的 ETX 值; e^{rx} 为节点发送一个数据包能耗; ACK^{rx} 为节点接收 ACK 能耗。

设节点 i 的剩余能量为 E_i , 网络节点的发送频率为 R , 则节点 i 的寿命为

$$T_i = \frac{E_i}{\sum_{l=1}^m \sum_{l=1}^m R \cdot (E_{rx} + E_{tx}) \cdot \eta} \quad (5)$$

其中, η 为路径使用概率^[7]。

网络寿命定义为最小的节点寿命^[8], 即

$$T = \min(T_i) \quad (6)$$

3 能量均衡路由度量方法

ETX 路由度量方法选择累计 ETX 值最小的路径, 保证了传输的可靠性, 却导致大量数据沿着链路质量较好的区域传输, 使该区域节点的能量消耗过快而死亡。由式(3)~式(6)可以看出, 影响网络生存时间主要因素是节点剩余能量、路径可靠性以及路径使用概率, 在选路时要考虑路径的剩余能量, 还要考虑路径可靠性。可靠性较低的路径因为重传所消耗的能量, 可能要远远高于相对较多的剩余能量。能量均衡方法要结合网络可靠性和节点能量消耗对能量进行分级, 选择处于高能级的路径, 而不是直接选择剩余能量多的路径。

基于上述设计思想, 本文提出一种具有传输可靠性的能量均衡路由度量方法——EBETX 方法。该方法主要思想是根据网络中节点的初始能量值, 将节点的能量划分为 n 级。在节点广播路由请求数据包的过程中, 累计路径上 ETX 值之外, 同时记录该路径上剩余能量最低的节点的能量。在作路由选择时, 首先在比当前能级高的路径中选择累加 ETX 值最小的作为有效路由。如果不存在高能级路径, 对于处在同一能级内的路径, 选择累计 ETX 值最小的作为路由。

如何划分能级是一个非常关键的问题。如果将能级划分偏小, 则使得路由更新频繁, 网络传输不稳定; 如果能级划分偏大, 则不能很好均衡网络各节点能量。因此选择一个合适的能级划分尤为重要, 并直接影响该度量方法的有效性。

根据节点发送/接收数据的能耗模型, 可得到节点完成一次发送和接收过程的能耗为

$$E = e^{tx} + e^{rx} \quad (7)$$

设路由建立维持的有效生命周期为 $ROUTE_LIFE$, 网络中各节点发包频率为 $RATE$, 则在一个路由生命周期内, 持续发送并接收数据包所消耗的能量为

$$E_{max} = E \times ROUTE_LIFE \times RATE \quad (8)$$

将 E_{max} 作为一个能级, 可以保证现有路由失效时, 及时建立/更新路由, 避免一条路由持续工作超过 2 个路由周期。这样维持了传输稳定性, 不会使路由更新过于频繁; 保证了节点能量消耗的均衡性。设节点初始能量为 E_0 , 由此可得能级 n 为

$$n = E_0 / E_{max} \quad (9)$$

EBETX 方法的执行过程如下:

(1) 网络各节点根据节点的配置, 计算 e^{tx} 和 e^{rx} ; 根据路由生命周期的计算 E_{max} ; 根据初始能量划分能级 n 。统计各邻居节点的包接收率, 计算与各邻居节点间的 ETX 值。

(2) 接收到 RREQ 的中间节点累计路径 ETX 值, 并更新剩余能量最低节点的能量。根据剩余能量最低节点的能量, 确定其所处的能级。

(3) 中间节点判断是否存在到达源节点有效路由。如果不存在, 则将该路径设置为有效路由。如果存在, 判断路径能级, 小于当前有效路由能级直接丢弃, 大于当前有效路由能级, 添加到路径队列; 等于当前有效路由的能级, 且 ETX 累加值小于当前有效路由的 ETX 累加值, 更新路由。

(4) 启动定时器, 初值设置为 T 。如果定时器超时之前, 收到其他 RREQ, 且能级高于当前有效路由, 则将该路径添加到路径队列, 重置定时器, 直到定时器超时前不再收到 RREQ。

(5) 如果路径队列为空, 则维持原路由。否则, 在路径队列中选择累加 ETX 值最小的路径作为有效路由。

(6) 判断节点本身是否是目的节点, 如果是目的节点, 发送路由应答 RREP; 如果不是源节点, 转发 RREQ。

4 仿真实验

为对 EBETX 路由度量方法做出性能评价, 在 NS2 网络仿真环境中, 以 AODV 协议为“载体”对该路由度量方法进行实现。同时, 将 EBETX 方法与 ETX 方法和 HOPS 方法进行比较分析。

仿真环境: 在 100 m×100 m 的正方形区域内, 随机摆放 225 个节点, 一个源节点 S 、一个目的节点 D ; 节点主要参数设置见表 1。

表 1 仿真参数设置

参数	参数值
节点分布	随机
带宽	250 Kb/s
频率	2.4 GHz
无线模型	Shadowing 模型
MAC 协议	IEEE 802.15.4
传输能耗	2.0 mw
空闲状态能耗	1.0 mw
接收能耗	1.0 mw
休眠状态能耗	0.001 mw
休眠/空闲状态转换能耗	0.2 mw
休眠/空闲状态转换时间	0.005 s

图 1 是 EBETX 方法与 ETX 方法和 Hops 方法在丢包率方面的仿真结果。

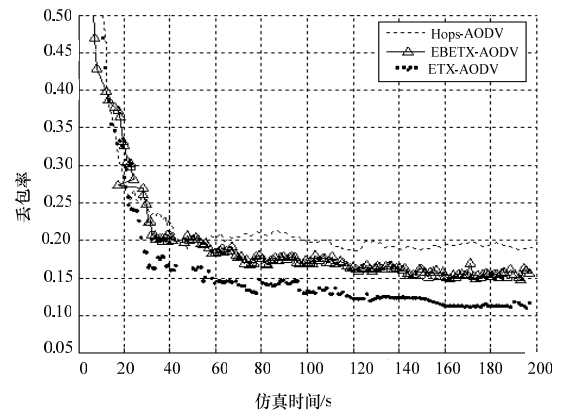
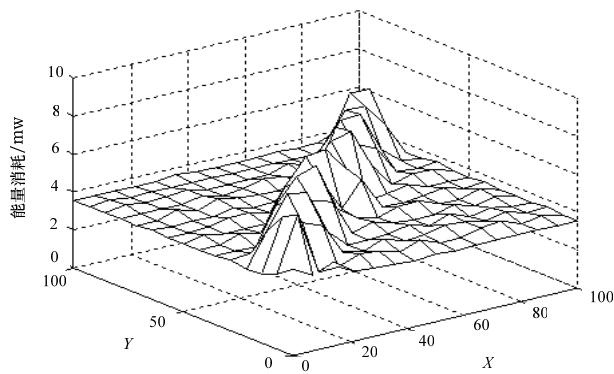


图 1 3 种方法的丢包率比较

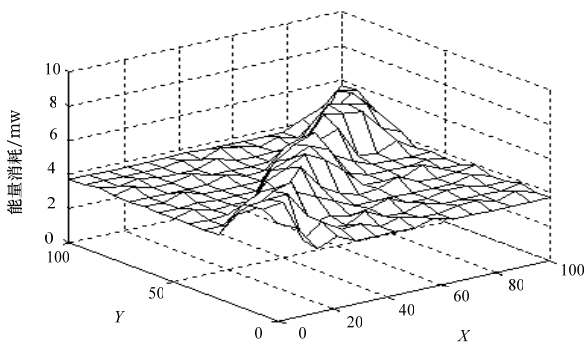
可见, Hops 度量方法丢包率相对较高; ETX 方法和 EBETX 方法则是完全或是部分依靠路径的累计 ETX 值作为路由度量, 充分考虑了链路非对称性和不可靠性。因此丢包率相对较低。但是, 由于在 EBETX 中添加了能量均衡控制机制, 使其在选路过程中兼顾节点能量的均衡消耗, 在尽量保证传输可靠性的时候选择剩余能量相对较多的路径作为路由, 这样会对传输可靠性造成一定影响, EBETX 方法的丢包

率相对 ETX 方法偏低, 并且存在一定的波动性。

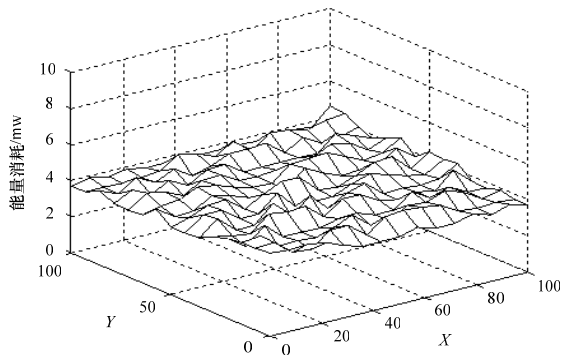
图 2 是 3 种方法的节点能量消耗情况。其中, X 轴和 Y 轴为节点分布区域, Z 轴为节点能量消耗情况。



(a)Hops-AODV 节点能量消耗



(b)ETX-AODV 节点能量消耗



(c)EBETX-AODV 节点能量消耗

图 2 节点能量消耗情况

可见, Hops 度量方法在源节点到目的节点间选择跳数最少的路径, 可靠性较低, 路径上节点能量消耗很快; ETX 度量方法是选择累计 ETX 值最小的路径作为路由, 所以会导致通信质量较高的区域节点能量消耗很快, 而其他节点剩余能量较多; EBETX 度量方法在以路径累计 ETX 值作为路由度量时根据剩余能量, 选择次优路径, 避开能量消耗过快的最优路径, 实现了网络能量的均衡消耗。

图 3 给出在 3 种不同的路由度量方法下, 网络中节点生存时间的变化曲线。与 ETX 方法和 Hops 方法相比, EBETX 方法使网络的生存周期延长了 10%, 有效延长了网络的寿命。

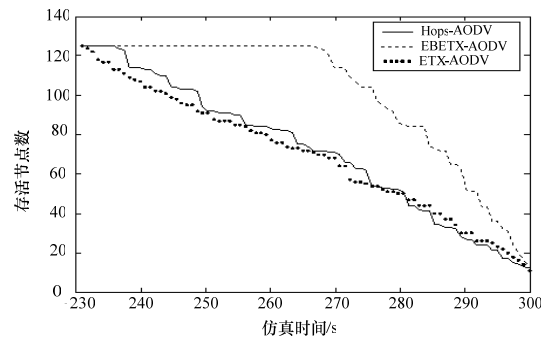


图 3 节点存活数随仿真时间的变化

5 结束语

本文提出一种具有能量均衡性的可靠路由度量方法, 并且建立网络寿命衡量模型。通过对该路由度量方法的仿真实现, 与 ETX 度量方法和 Hops 度量方法进行比较。结果表明, 该方法在保证传输可靠性的前提下, 可实现网络节点能量的均衡消耗, 延长网络的生存时间。

参考文献

- [1] Chang J H, Tassiulas L. Maximum Lifetime Routing in Wireless Sensor Networks[J]. IEEE Trans. on Networking, 2004, 12(4): 609-619.
- [2] Krishnamachari B, Estrin D, Wicker S. Modelling Data-centric Routing in Wireless Sensor Networks[C]//Proc. of the IEEE INFOCOM'02. New York, USA: IEEE Computer Society Press, 2002.
- [3] Shah R, Rabaey J. Energy Aware Routing for Low Energy Ad Hoc Sensor Networks[C]//Proc. of WCNC'02. Orlando, Florida, USA: IEEE Press, 2002.
- [4] Akyildiz I, Su Weilian, Sankarasubramaniam Y, et al. A Survey on Sensor Networks[J]. IEEE Trans. on Communications, 2002, 40(8): 102-114.
- [5] Shen Xingfa, Wang Zhi, Sun Youxian. Wireless Sensor Networks for Industry Applications[C]//Proc. of WCICA'04. Hangzhou, China: IEEE Press, 2004.
- [6] Douglas S J, De C, Daniel A, et al. A High-throughput Path Metric for Multi-hop Wireless Routing[C]//Proc. of MOBICOM'03. San Diego, CA, USA: ACM Press, 2003.
- [7] Kwon H, Kim T H, Lee B G. A Cross-layer Strategy for Energy-efficient Reliable Delivery in Wireless Sensor Networks[J]. IEEE Trans. on Wireless Communications, 2006, 5(12): 3689-3699.
- [8] Loh K, Long Huan, Pan Yi. An Efficient and Reliable Routing Protocol for Wireless Sensor Networks[C]//Proc. of ACC'05. Orlando, Florida, USA: IEEE Communication Society Press, 2005.

编辑 金胡考