

一种能量捕获无线传感网络机会路由算法

田贤忠 肖 贇

(浙江工业大学计算机科学与技术学院 杭州 310023)

摘要 在无线传感网络中,采用能量捕获技术理论上可以无限延长节点的使用寿命。基于该技术,提出了一种新的机会路由算法——能量潜能机会路由(Energy Potential Opportunistic Routing, EPOR)算法。该算法首先用到目的节点的期望传输次数衡量各节点到目的节点的距离,然后用节点的剩余能量与节点所捕获的能量之和表示节点的能量潜能,最后用期望传输次数和节点能量潜能决定节点的退避时间,退避时间最短的节点即为转发节点。理论分析和仿真实验表明,该算法不但可以延长网络生命期,而且可以明显改善网络中节点能量的均衡性。

关键词 能量捕获,机会路由,能量均衡,无线传感网络

中图法分类号 TP393 文献标识码 A

Algorithm of Opportunistic Routing Based on Energy Harvesting Wireless Sensor Networks

TIAN Xian-zhong XIAO Yun

(College of Computer Science and Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

Abstract In wireless sensor networks, using energy harvesting technology can theoretically extend infinitely the life of the nodes. Based on this technology, this paper presented a new opportunistic routing algorithm called energy potential opportunistic routing (EPOR) algorithm. First, the algorithm uses expected transmission count between the transmission node and the destination node to measure the distance between them. Then, the sum of the residual energy and the harvested energy of the node is used to express the energy potential of the node. Finally, the expected transmission count and the potential energy of the node are used to determine the back off time of the node. The node which has the shortest back off time is the transmission node. Theoretical analysis and simulation results show that this algorithm can not only prolong the life of the network, but also significantly improve the energy balance of the nodes in the network.

Keywords Energy harvesting, Opportunistic routing, Energy balance, Wireless sensor networks

1 引言

无线传感器网络(Wireless Sensor Networks, WSNs)已被广泛应用于各种重要领域,如环境监测、安全领域监控、工业控制、军事^[1]等。在无线传感网络中传感器节点通常都是由电池供电,一旦节点的电池能量耗尽,网络的生命周期也就结束了。到目前为止,能耗问题仍然是无线传感网络中的一个关键性问题。

能量捕获无线传感器网络(Energy Harvesting Wireless Sensor Networks, EH-WSNs)是近几年的热点研究问题, EH-WSNs 中的节点自带能量捕获设备,其运行所需的能量从周围环境(比如阳光、无线电波、震动、风力、压力等)中捕获而来。相对于传统的有源无线传感器网络, EH-WSNs 具备许多新的特征。例如,它的能量从环境中捕获、能量捕获的捕获率(单位为 J/s)无法准确预知、节点的工作状态与环境有关等。

机会路由是由麻省理工学院 Biswas^[2]等人提出的一种动态路由算法,该路由算法是一种后择路由,能够充分利用无线信道的广播特性、时变性,使网络吞吐量和传输可靠性得到

提高。然而,在能量捕获无线传感网络中,传统的机会路由没有考虑节点的捕获能量,这就导致传统的机会路由并不能很好地适用于新的网络环境。

针对上述问题,本文对传统的机会路由算法进行了改进,提出一种能量潜能机会路由(Energy Potential Opportunistic Routing, EPOR)算法。EPOR 算法采用了一种新的度量方法,它不仅考虑了节点的地理位置信息和节点间数据传输的丢包率,而且通过引入能量潜能函数^[3],综合考虑了节点的剩余能量和能量捕获能力。节点的能量潜能函数值越大,说明该节点的能量潜能越高,该节点成为转发节点的优先权也就越大。综合以上几个因素提出的机会路由算法 EPOR 不但可以延长网络生命期,增加网络吞吐量,而且也可以明显改善网络中节点能量的均衡性。

本文第 2 节介绍相关工作;第 3 节将介绍本文提出的能量潜能机会路由算法 EPOR 的基本思想;第 4 节详细介绍 EPOR 算法的具体实现;第 5 节讨论仿真实验,最后对全文进行总结。

本文受浙江省自然科学基金项目:能量捕获无线传感器网络数据传输关键理论与方法(LY15F020027)资助。

田贤忠(1968—),男,博士,教授,主要研究方向为无线网络、网络编码和大数据, E-mail: txz@zjut.edu.cn;肖贇(1990—),男,硕士生,主要研究方向为无线传感网络。

2 相关工作

在 EH-WSN 节点的能量捕获方面已有一些研究成果。Kansal 等^[4]给出了节点预测太阳能捕获规律的指数加权移动平均算法; Adelina 等^[5]提出了一种新的分层协作无线充电协议,它利用移动的充电源均衡地给节点充电; Cristiano 等^[6]研究了数据融合技术在能量捕获无线传感网络中的应用。Lin 等^[7]指出,节点可在异构能量源环境下工作,即节点之间的能量捕获设备呈异构状态(例如,有些节点捕获太阳能,而有些节点则捕获震动能,等等),而且还假设每个节点可以知道短时间之内的能量补给方案,例如能量捕获的速率或者能量捕获设备的开关过程; Vladimir 等^[8]讨论了如何在能量捕获无线传感网络中优化充电策略; Ventura 等^[9]认为能量源的出现是一个泊松过程。可见,对 EH-WSN 的研究目前大都集中在对网络节点的能量捕获方面。对 EH-WSN 的路由方面的研究还比较少。

一个合适的路由算法可以极大地提高网络的性能。其中,机会路由算法(Opportunistic Routing, OR)可以很好地改善网络中数据传输的效率。与机会路由相关的算法有很多,如 Petros 等人在文献^[10]中提出了基于能量感知的机会路由算法(Energy Aware Opportunistic Routing, EAOR);在文献^[11]中, Petros 等人研究了机会路由在无线传感网络中的性能; Zhi 等^[12]以及 Wei Yang 等^[13]也对机会路由做了相应的研究, Zhi 提出的是一种自适应的机会路由算法, Wei Yang 等人对实时的机会路由算法进行了研究。

虽然这些算法都能一定程度上提高网络中数据传输的效率,但它们也存在着一些不足。例如 OR 算法在选择下一个转发节点的时候仅仅考虑了地理位置信息,这样会导致节点能量不均衡。而 EAOR 算法虽然同时考虑了地理位置信息和剩余能量,但没有考虑在 EH-WSNs 中节点能量捕获能力这个因素。针对这些问题,本文提出了 EPOR 算法,它综合考虑了丢包率、节点剩余能量以及节点能量捕获能力,可以延长网络生命期,并改善网络中节点能量的均衡性。

3 算法的基本思想

一般的机会路由算法如图 1 所示,源节点 t 有数据包向目的节点 d 传输时,它将向周围广播数据包,转发候选节点集中的多个节点收到源节点广播的数据包(假设节点 a, b, c 都收到了)后,根据一定的准则选择一个合适的节点转发收到的数据包,目的节点最后收到所需的数据包。转发候选节点集一般会选离目的节点最近的节点(或转发次数最少的节点)转发。转发节点之间的协调采用类似 IEEE 802.11MAC 层协议中的 DCF 机制,给最佳的转发节点以最小的退避时间 $T_{Backoff}$,这样最佳转发节点将获得优先的数据转发权。

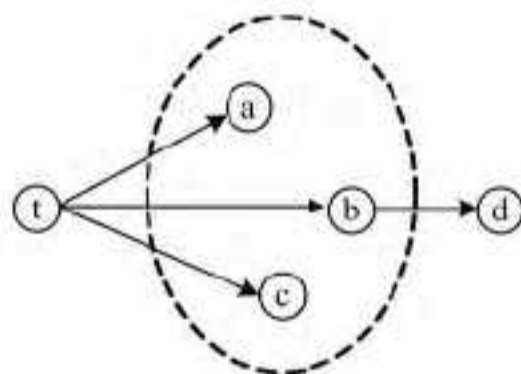


图 1 机会路由原理图

上述的机会路由算法只考虑了地理位置信息,离目的节点越近,成为转发节点的优先权就会越高,它并没有考虑转发

节点剩余能量和节点捕获能量能力的影响。如果离目的节点近的转发节点所剩的能量不足以转发收到的数据包,则这个节点并不适合被选为转发节点。本文算法 EPOR 的基本思想是在选择转发节点时综合考虑节点的丢包率、节点剩余能量和节点捕获能量能力的影响,从而选择最佳的节点作为转发节点,即在计算 $T_{Backoff}$ 时考虑了节点期望传输次数和能量潜能。节点期望传输次数越少,则表明该节点离目的节点越近。其中,丢包率是影响最小期望传输次数的主要因素,而节点能量潜能主要是由节点剩余能量和捕获能力决定。EPOR 算法步骤如下:

(1) 首先确定网络中节点到目的节点的期望传输次数,即计算出每个节点的 ETX 值,并根据 ETX 值选择发射节点的候选转发集节点。

(2) 通过引入能量潜能函数,计算各个候选集节点的能量潜能。

(3) 基于期望传输次数和节点能量潜能,计算出各节点的退避时间,最终选择最佳的节点作为转发节点。

这里定义一个概念——候选转发集节点,即接收到了发射节点数据包,而且离目的节点 ETX 值比发射节点的 ETX 值近的邻居节点。

4 算法的具体实现

从上面的分析可以看出,EPOR 需要解决以下几个问题: 1) 如何计算网络中各个节点到目的节点的期望传输次数,以及如何确定候选转发集节点; 2) 如何计算节点的能量潜能; 3) 节点收到数据包后,如何计算节点的退避时间。

4.1 期望传输次数

期望传输次数(Expected Transmission Count, ETX)是文献^[14]提出的概念,表示平均一个数据包要传输多少次才能被目的节点收到。它不但考虑了离目的节点的跳数,还考虑了信道丢包率的影响,特别适用于无线网络。本文以此度量来选择候选转发节点集。

每个节点的 ETX 值的计算可以按下列步骤完成。

步骤 1 目的节点发送一个广播包。广播包中含有一个字段 ETX ,目的节点的 ETX 值为 0,即 $ETX=0$ 。

步骤 2 目的节点的一跳邻居收到广播包后,根据其目的节点的丢包率和收到的广播包中的 ETX 值计算出本节点 i 的 $ETX(i)$ 值,即 $ETX(i)=ETX+1/p$,其中 p 表示节点 i 与目的节点之间信道的丢包率, ETX 是广播包中的字段,然后,各节点根据自己的 $ETX(i)$ 值,修改广播包中的 ETX 字段,并继续广播广播包。

步骤 3 下层节点收到广播包后做同样的工作。如果节点收到多个广播包,则首先按步骤 2 计算本节点的 ETX 值,如果这个 ETX 值比之前计算出的 ETX 值小,更新本节点的 ETX 值,并修改广播包后继续广播广播包;如果比之前计算出的 ETX 值大,则不作处理。

步骤 4 直到每个节点都算出自己的 ETX 值。

根据每个节点的 ETX 值可以方便地选出候选转发节点集。每个节点的候选转发节点集就是那些 ETX 值小于本节点 ETX 值的节点集合。

4.2 节点能量潜能

本文通过引入能量潜能函数计算节点的能量潜能。先把时间分成多个相等的时隙,每个时隙的长度为 ΔT 。能量潜

能函数定义为:

$$P_k(i) = \frac{e^{\lambda_k(i)[R_k(i) - \mu_k(i) + \sum_{j=i}^{i+T_h} H_k(j)]}}{1 + e^{\lambda_k(i)[R_k(i) - \mu_k(i) + \sum_{j=i}^{i+T_h} H_k(j)]}} \quad (1)$$

其中, $P_k(i)$ 表示节点 k 在第 i 个时隙的能量潜能, $R_k(i)$ 表示节点 k 在第 i 个时隙的剩余能量, $H_k(j)$ 表示节点 k 在第 j 个时隙所捕获到的能量。 $R_k(i) + \sum_{j=i}^{i+T_h} H_k(j)$ 是指节点 k 在 i 时隙的剩余能量加上从 i 时隙到 $i+T_h$ 时隙捕获的能量, 用它表示一个节点的能量潜能。 因为这部分能量越大, 节点可用于转发节点的能量越多, 节点被选为转发节点的概率也越大。 $\mu_k(i)$ 和 $\lambda_k(i)$ 是用来标准化本文所引入的函数模型的参数, 其中 $\mu_k(i)$ 表示平均值, $\lambda_k(i)$ 的倒数表示标准差。 $\mu_k(i)$ 和 $\lambda_k(i)$ 的具体定义如下:

$$\mu_k(i) = E[R_k(i) + \sum_{j=i}^{i+T_h} H_k(j)] \quad (2)$$

$$\lambda_k(i) = \frac{1}{\sqrt{\text{Var}[R_k(i) + \sum_{j=i}^{i+T_h} H_k(j)]}} \quad (3)$$

经过标准化处理后, $P_k(i)$ 的取值范围是 0 到 1, 其中 0 表示节点将在下一个时隙处于无效状态, 1 表示节点有充足的能量来作为转发节点。

从式(1)~式(3)可以看出, 要想求出 $P_k(i)$, $\mu_k(i)$ 和 $\lambda_k(i)$, 就需要确定节点的能量捕获时间。 本文定义 T_h 为节点传输一个数据包所用的时隙数, 即每传输一个数据包所需要的时间 T_t 除以时隙长度 ΔT 。 假设数据包长度为 $L(\text{bit})$, 节点每次转发数据包的速率为 $r(\text{bps})$, 则传输一个数据包所用的时间 T_t 为:

$$T_t = \frac{L}{r} \quad (4)$$

所以节点的能量捕获时间 T_h 最终定义为:

$$T_h = \frac{T_t}{\Delta T} \quad (5)$$

由于存在丢包率, 因此节点在一次中继任务中可能需要多次传输数据包。 定义中继转发节点至少有一个数据包传输成功的概率为 P_k , 则 P_k 有:

$$P_k = 1 - P_1 P_2 \dots P_n \quad (6)$$

其中, P_1, P_2, \dots, P_n 是指中继转发节点 t 到其候选转发节点集中各节点的丢包率, 是可以事先知道的。

节点在完成一次转发任务后, 它的剩余能量为:

$$R_{after} = R_k(i) + \frac{\sum_{j=i}^{i+T_h} H_k(j)}{P_k} - \frac{E_{consume}}{P_k} \quad (7)$$

其中, R_{after} 表示转发节点完成一次转发任务后的剩余能量, $R_k(i)$ 与式(1)中的含义相同, 等式右边第 2 项表示在整个转发任务中捕获的能量, 等式右边第 3 项表示在整个转发任务中消耗的能量, $E_{consume}$ 表示转发一次数据包所消耗的能量。

4.3 节点退避时间

候选转发节点集的多个节点收到数据包后, 采用类似 IEEE 802.11 MAC 层协议中的 DCF 机制选择一个最佳节点转发收到的数据包。 如图 2 所示, 每个候选节点收到数据包后, 首先侦听信道是否空闲, 如果空闲则等待 DIFS 时间, 然后开始竞争信道, 即再等待 $T_{backoff}$ 时间, 给最佳节点以最小的 $T_{backoff}$ 时间, 从而可以使其优先获得信道, 进而获得数据转发权。 最佳节点竞争到信道后给目的节点发送 RTS 信息包, 目的节点接收到数据包后返回 CTS 信息包, 然后节点开

始传输数据给目的节点, 目的节点接收完数据包后发送确认信息包 ACK, 一次传输结束。

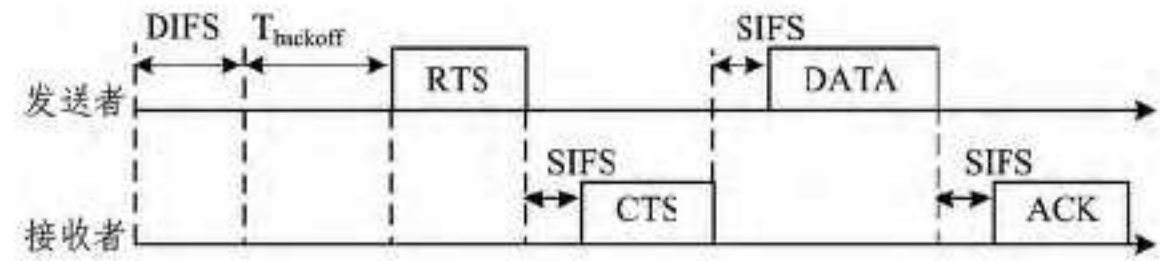


图 2 转发节点所经历的各个时间段

在 4.1 和 4.2 小节中, 分别计算出了节点到目的节点的期望传输次数和节点能量潜能。 基于此, 本算法中计算 $T_{Backoff}$ 的公式定义为:

$$T_{Backoff} = C_0 \times ETX(k) + \frac{C_1}{P_k(i)} + SIFS, t \neq d \quad (8)$$

其中, $ETX(k)$ 表示节点 k 到目的节点 d 的期望传输次数, $P_k(i)$ 表示节点 k 在第 i 个时隙的能量潜能, C_0 表示一个与期望传输次数相关的常数, C_1 表示一个与能量潜能相关的常数, $SIFS$ 表示短帧间隔。

$T_{Backoff}$ 不但考虑了丢包率和节点剩余能量, 而且也考虑了节点能量捕获能力, 文中提出的算法 EPOR 更符合实际情况。

5 实验仿真

用 MATLAB 进行仿真实验。 本次仿真主要是用 EPOR 算法与 OR 算法、EAOR 算法进行对比, 这里假设 3 种算法中节点都具有捕获能力。 如图 1 所示, 假设发射节点 t 不断向目的节点 d 发送数据包, 随机设置发射节点 t 到中继转发节点 a, b, c 的丢包率分别为 0.1, 0.1 与 0.2。 节点 a, b, c 到目的节点 d 的丢包率分别为 0.2, 0.3 与 0.1。 其它与实验相关的数据为: 节点的最大能量容量 E_{max} 为 2J, 节点初始能量 E_0 为 2J, 节点每传输 1bit 数据包消耗的能量为 $7 \times 10^{-6} \text{J}$, 数据包的长度 $L = 2000 \text{bit}$, 节点转发数据包的速率 $r = 1.0 \times 10^4 \text{bps}$ 。 每个时隙的长度 $\Delta T = 10 \mu\text{s}$, 节点 a, b, c 在每个时隙所捕获的能量分别为 $H_a = 3.0 \times 10^{-7} \text{J}$, $H_b = 2.0 \times 10^{-7} \text{J}$ 和 $H_c = 1.0 \times 10^{-7} \text{J}$ 。 图 3 表示网络节点平均剩余能量与发送数据包个数的关系, 图 4 表示网络节点剩余能量标准差与发送数据包个数的关系。 其结果都是实验 100 次后的平均值。

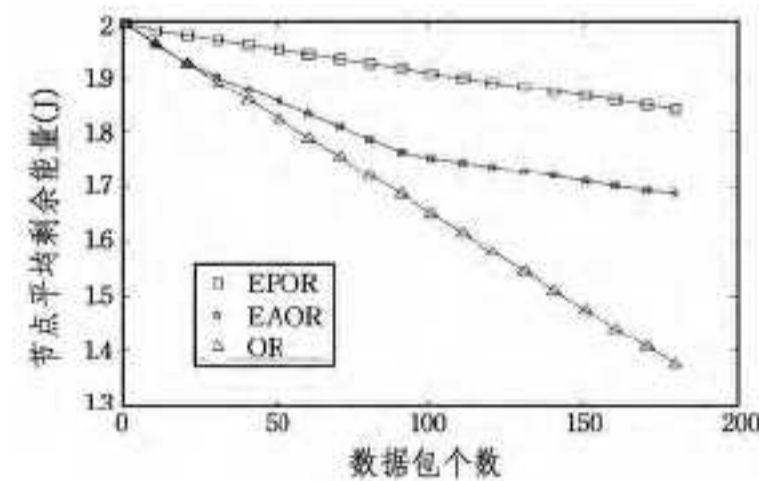


图 3 节点平均剩余能量随着发送数据包个数的变化情况

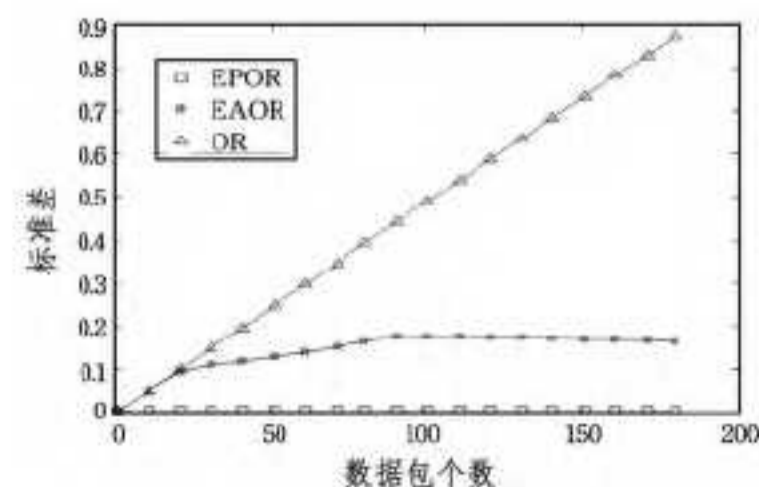


图 4 节点剩余能量标准差随着发送数据包个数的变化情况

(下转第 327 页)

武汉理工大学学报,2009(18):39-42

- [15] 蔡伟杰,张晓辉. 关联规则挖掘综述[J]. 计算机工程,2001,27(5):31-33
- [16] 张怡,赵凯,来森. 警报关联图:一种网络脆弱性量化评估的新方法[J]. 国防科技大学学报,2012,34(3):109-112
- [17] Ashenden D. Information Security management: A human challenge? [J]. Information Security Technical Report, 2008, 13(4):195-201

- [18] 陈亮. 信息系统安全风险评估模型研究[J]. 中国人民公安大学学报,自然科学版,2008,13(4):50-53
- [19] L Hui-ying, C Yuan-da. Research on Network Risk Situation Assessment Based on Threat Analysis[C]// International Symposium on Information Science and Engineering, 2008 (ISISE'08). IEEE, 2008, 2:252-257
- [20] 高志民. 漏洞关联图在风险评估中的应用[J]. 电讯技术,2009,49(10):26-30

(上接第 290 页)

从图 3、图 4 中可以看出,1)采用 EPOR 算法的网络节点平均剩余能量明显比其它两种算法要多,这基本符合预期的结果,因为该算法使捕获能力强的节点成为转发节点的次数更多,让整个网络浪费的能量更少;2)采用 EPOR 算法的网络节点剩余能量标准差比另外两种算法明显要小,这说明网络中节点能量更均衡;3)采用 OR 算法剩余能量最小是因为 OR 算法会选择离目的节点最近的中继节点 c 转发,其它两个节点 a, b 基本保持能量饱和状态,不再接收能量。

接下来讨论这 3 种算法的吞吐量和网络生命期。在发射节点和目的节点之间设置 3 个转发节点,节点初始能量在 $1 \sim 4J$ 之间变化,发射节点不断地传输数据,直到网络停止工作。

图 5 和图 6 中的结果是算法各运行 100 次取平均值得到的,从中可以看出 EPOR 算法的网络吞吐量明显比其它两种算法的更高,网络生命期也明显更长。

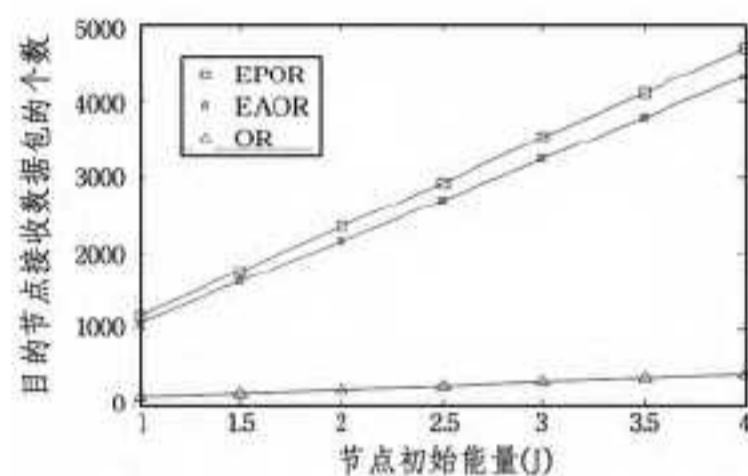


图 5 网络吞吐量与节点初始能量的关系

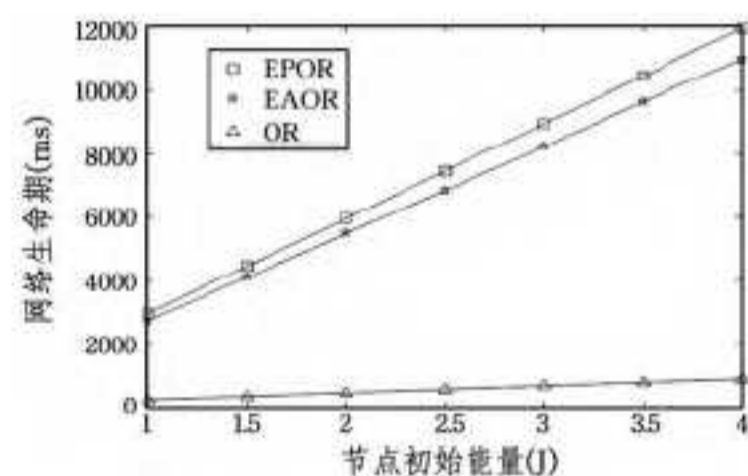


图 6 网络生命期与节点初始能量的关系

结束语 本文提出一种基于能量捕获无线传感网络机会路由算法,用期望传输次数衡量节点到目的节点的距离,用能量潜能衡量节点是否能够成为转发节点。此算法综合考虑了节点丢包率、节点剩余能量以及节点能量捕获能力,这可以改善网络中节点能量的均衡性,使节点平均剩余能量更高,进而提高网络的生命期和吞吐量。仿真实验充分证明了这一点。

参考文献

- [1] Zheng J, Jamalipour A. Wireless Sensor Networks: A Networking Perspective [M]. Wiley, 2009
- [2] Biswas S, Morris R. Opportunistic routing in multi-hop wireless

- networks [J]. SIGCOMM Comput. Commun. Rev., 2004, 34(1):69-74
- [3] Xiao Meng, Zhang Xue-dan, Dong Yu-han, et al. An Effective Routing Protocol for Energy Harvesting Wireless Sensor Networks [C]// IEEE Wireless Communications and Network Conference (WCNC). 2013
- [4] Kansal A, Hsu J, Zahedi S, et al. Power management in energy harvesting sensor networks [J]. ACM Transactions on Embedded Computing Systems, 2007, 6(4):32
- [5] Madhja A, Nikolettseas S. Hierarchical, Collaborative Wireless Charging in Sensor Networks [C]// IEEE Wireless Communication and Networking Conference (WCNC). 2015
- [6] Tapparello C, Simeone O, Rossi M, et al. Dynamic Compression-Transmission for Energy-Harvesting Multihop Networks With Correlated Sources [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2014, 22(6)
- [7] Lin L, Shroff N B, Srikant R. Asymptotically optimal energy aware routing for multihop wireless networks with renewable energy sources [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2007, 15(5):1021-1034
- [8] Shakhov V, Migov D A, Rodionov A S, et al. Operation Strategy for Energy Harvesting Wireless Sensor Networks [C]// IMCOM'15. January 2015
- [9] Ventura J, Chowhury K. Markov modeling of energy harvesting body sensor networks [C]// Pimrc 2011; Proceedings of the 2011 IEEE 22nd International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications. Piscataway; IEEE, 2011; 2168-2172
- [10] Spachos P, Chatzimisios P, Hatzinakos D, et al. Energy aware opportunistic routing in wireless sensor networks [C]// IEEE Globecom Workshops. Dec 2012; 405-409
- [11] Spachos P, Song Liang, Hatzinakos D, et al. Performance comparison of opportunistic routing schemes in wireless sensor networks [C]// Proceedings of the Ninth Annual Communication Networks and Services Research (CNSR) Conference. May 2011; 271-277
- [12] Zhi Ang-eu, Tan H P. Adaptive Opportunistic Routing Protocol for Energy Harvesting Wireless Sensor Networks [C]// IEEE ICC 2012-Ad-hoc and Sensor Networking Symposium
- [13] Yang Wei, Liang Wei-fa, Dou Wen-hua, et al. Energy aware real-time opportunistic routing for wireless ad hoc networks [C]// Proceedings of the IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). 2010; 1-6
- [14] De C D, Aguayo D, Bicket J, et al. A high-throughput path metric for multi-hop wireless routing [C]// ACM/IEEE MobiCom. vol 11, Sept 2003; 134-146