

能量捕获无线传感器网络中速率自适应路由算法

邱树伟¹ 袁利永² 李琰琰³

(汕头职业技术学院计算机系 汕头 515078)¹ (浙江师范大学数理与信息工程学院 金华 321004)²
(浙江工业大学计算机科学与技术学院 杭州 310014)³

摘要 能量捕获无线传感器网络是无源感知技术中非常重要的一类,它能够有效解决节点能量受限的问题,保持网络运行的持续性。现有的路由方法并未充分利用节点的能量捕获特性,也没有考虑到链路的成功收包率和节点的传输速率。为进一步提高网络的性能,提出了一种结合链路成功收包率的速率自适应路由算法。通过对节点的剩余能量和链路的成功收包率进行建模,给出了一个节点可作为路由中继节点所需要满足的两个条件;基于优化方程,为传输路径上的每一跳节点自适应配置时延最小化的传输速率;提出路由发现步骤来找出端到端传输时延最小的传输路径。实验结果表明,相比于固定传输速率的路由算法,所提算法所得到的传输路径具有较低的端到端传输时延和较高的吞吐率。

关键词 能量捕获,无线传感器网络,速率自适应,路由算法

中图分类号 TP393 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2015.4.018

Data Rate Adaptive Routing Algorithm in Energy Harvesting Wireless Sensor Networks

QIU Shu-wei¹ YUAN Li-yong² LI Yan-yan³

(Department of Computer Science, Shantou Polytechnic, Shantou 515078, China)¹

(College of Mathematics, Physics and Information Engineering, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, China)²

(School of Computer Science and Technology, Zhejiang University of Technology, Zhejiang 310014, China)³

Abstract Energy harvesting wireless sensor networks are an very important kind of passive sensing technology, which can effectively solve the problem of limited energy of nodes, and maintain continuous operation. Existing routing algorithm does not take advantage of the energy harvesting characteristics of nodes, and does not take the packet delivery ratio and the data rate into account. For improving the performance of the network, we proposed a data rate adaptive routing algorithm combining the packet delivery ratio of wireless link. Two constraints that a relay node on packet delivery route must be required to meet, were given by modeling the residual energy of nodes and the packet delivery ratio of wireless link. Through optimization equation, the data rate which can minimize the packet delivery delay over each hop on route was adaptive configured, and the route discovery procedure was proposed to find the packet delivery path to reduce the end to end delay. Experimental results show that the proposed algorithm can obtain the lower packet delivery delay and the higher throughput than fixed rate routing algorithm in energy harvesting wireless sensor networks.

Keywords Energy harvesting, Wireless sensor networks, Data rate adaptive, Routing algorithm

1 引言

能量捕获无线传感器网络(Energy Harvesting Wireless Sensor Networks, EH-WSN)是一种节点自带能量捕获设备的无线传感器网络,它的节点可以从阳光、无线电波、热量、震动、压力、风力等周围环境捕获能量。相对于传统的有源无线传感器网络(Battery-Powered Wireless Sensor Network, BP-WSN),EH-WSN具备许多新的特征,例如,它没有电池、能量从环境中捕获、能量捕获的快慢无法准确预知、节点的工作状态与环境有关等。由于EH-WSN节点的能量捕获过程具有随机性,因此,这类网络在拓扑控制、能量管理以及数据传递

等方面与BP-WSN存在许多不同之处,尤其是在网络路由方面更值得深入探讨。EH-WSN路由一般会涉及到拓扑结构、节点剩余能量、传输时延以及吞吐率等问题,如何根据节点的能量捕获和能量消耗情况来选择合适的传输路径,是一个亟待解决的问题。

在EH-WSN路由方面,已有一些研究成果。Peng等人^[1]认为,在EH-WSN中,最为重要的问题是在网络满足一定性能指标的基础上,如何确保网络运行的持续性。为了实现这个目标,他们提出了一种能量中和的路由协议,该协议能确保在传输周期之内,参与传输的节点能量捕获的平均值大于或等于能量消耗的平均值,使得网络运行的持续性得到保

到稿日期:2014-05-11 返修日期:2014-07-12 本文受浙江省自然科学基金(y1101183)资助。

邱树伟(1979-),男,博士生,讲师,主要研究方向为计算机网络,E-mail:city-qsw@163.com;袁利永(1978-),男,博士生,讲师,主要研究方向为无线MESH网络;李琰琰(1981-),男,博士生,讲师,主要研究方向为无线网络、GIS、虚拟现实等。

证。Kawashima 等人^[2]提出了一种基于能量捕获模式图的路由协议,该协议规定节点必须周期性地向其邻居节点广播能量捕获模式图,为邻居节点的路由决策提供依据,解决了节点能量消耗过快和休眠时间过长等问题。Dang 等人^[3]根据能量源的可用性、网络的路由需求和服务质量约束等,提出了一种自适应数据质量的多跳路由方法,该方法提高了数据传递的可靠性。Xiao 等人^[4]利用能量势函数对节点的能量捕获能力进行建模,同时,将传统的 LEACH 协议扩展为 Energy Potential LEACH (能量势 LEACH)协议,并验证了该协议能延长网络生命周期。Beheshtiha 等人^[5]设计了一种能量捕获感知的机会路由算法,在该算法中,候选中继节点通过定期交换控制信息来确定中继节点转发数据的优先级,同时引入了能量管理模型,采用能量捕获速率估算方法,自适应地调整节点的占空比,提高了能量的利用率和网络吞吐率。Alrajeh 等人^[6]结合了跨层设计和能量捕获技术,在网络各层中传递参数以节约能耗,并根据节点电容器的能量消耗和能量存储情况来决定节点所处的工作状态,提出了适用于多种场景的路由协议。Eu 等人^[7]将 EH-WSN 以 sink 节点为中心进行分区,每个区为一个圆环,同时,结合节点的能量捕获来源,实现一种高吞吐量的自适应机会路由协议,验证了该协议优于传统的机会路由协议。

从以上的研究工作可以看出,在 EH-WSN 路由方面,成果丰硕。但是,以上的路由算法均假设节点传输速率固定,而且在路由发现时并未考虑到与物理层链路有关的数据包成功收包率。根据 IEEE 802.15.4g 标准^[8],节点可工作在多速率模式之下,而且不同的传输速率对链路成功收包率有一定的影响,进而影响到数据包的重传次数和传输时延。因此,在路由发现时,一个节点是否适合做为中继节点,不仅可以根据节点当前的剩余能量、平均能量捕获速率和能耗等因素来决定,还可以综合考虑节点可能的传输速率和链路的成功收包率,以进一步提高网络性能。

本文结合 EH-WSN 节点的能量捕获特性,以提高 EH-WSN 性能为目标,提出一种结合了链路成功收包率的速率自适应路由算法。本文的主要贡献和创新在于:对 EH-WSN 节点的剩余能量和链路成功收包率进行建模,基于优化模型,在节点满足能量约束条件和链路收包率要求的前提下,对传输路径上每个节点的发送速率进行优化配置,降低了传输时延,提高了吞吐率。

2 EH-WSN 节点的能量模型

2.1 EH-WSN 节点能量变化的特点

EH-WSN 节点与 BP-WSN 节点的能量变化趋势如图 1 所示。从图中可以看出,随着时间的推移,BP-WSN 节点的能量单调递减,最终等于零;而 EH-WSN 节点的能量时而上升,时而下降,虽然有些时刻能量为 0,但随后节点又可以从环境中捕获能量并重新投入运行,显示出良好的“生命”特征。可见,只要根据节点的能量捕获情况、当前剩余能量、传输周期长短等因素,有针对性地调整节点的传输速率,便有望在合理利用节点能量的前提下,实现网络性能的提高和运行时间的持续性。

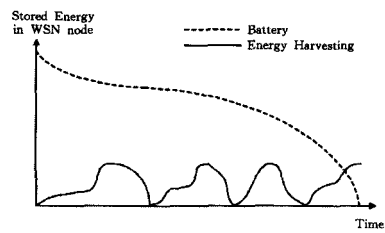


图1 能量消耗对比^[9]

2.2 EH-WSN 节点的剩余能量模型

Ho 等人^[10]假设震动能和太阳能的捕获过程符合 L-阶稳态马尔科夫模型,它是基于特定能量源的参考模型。Chowdhury 等人^[11]指出,节点可在多能量源环境下工作,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,同时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等。Ventura 等人^[12]基于指数分布对能量捕获过程进行建模。

这些研究工作说明了对能量捕获过程的建模一般基于概率模型来进行。不失一般性,本文对节点的能量捕获过程做如下假设:(1)对于任意节点 i ,在长度为 T 的时间区间之内(简称“时间段 T ”)能量源出现的次数 $N_i(T)$ 是一个速率为 λ 的泊松过程 $\{N_i(T), T \geq 0\}$; (2)每次能量源出现后节点捕获到的能量值 $E_x, x=1, 2, \dots, N_i(T)$ 在区间 $[E_1, E_2]$ 上服从均匀分布。通过调整 λ, E_1, E_2 等参数,可以使节点的能量捕获模型接近实际。由于时间段 T 内能量捕获的量 $E_H(T)$ 在 T 之后才能确定,因此,在理论分析时常常用期望值来代替。根据以上假设,有:

$$E_H(T) = E[N_i(T)]E[E_x] = \lambda T \frac{E_1 + E_2}{2} \quad (1)$$

其中, $E[\cdot]$ 表示求期望值。

任意节点 i 的能量捕获过程如图 2 所示。

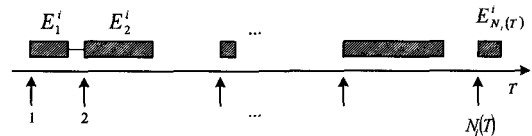


图2 节点的能量捕获示意图

为了考察节点 i 在时间段 T 之后的剩余能量,在考虑能量捕获的同时,必须考虑节点 i 的能量消耗情况。根据文献^[12],可以得到节点每发送 1 个数据包的能耗为:

$$E_{Tx} = l_p(\epsilon_0 + \epsilon_1 d^2) \quad (2)$$

其中, l_p 表示数据包的长度(用比特数表示), ϵ_0 表示发送或接收 1 个比特电路上的能耗, $\epsilon_1 d^2$ 表示自由空间模型中,发送 1 个比特时放大器的能耗。用 E_{Rx} 表示节点接收 1 个数据包的能耗,则有:

$$E_{Rx} = l_p \epsilon_0 \quad (3)$$

在路由转发过程中,节点一般先接收上一跳发来的数据包,然后再转发给下一跳。用 \bar{L}_i 表示时间段 T 之内节点 i 接收到数据包的期望个数,用 N_i 表示 MAC 层每个数据包的期望重传次数,易知节点 i 实际发送的数据包期望个数为 $\bar{L}_i + N_i \bar{L}_i = (N_i + 1) \bar{L}_i$ 。相比于节点的通信能耗,计算能耗可忽

略不计,那么,当节点的通信半径为 d (米)时,时间段 T 之内节点 i 的能耗为:

$$\begin{aligned} E_C(T) &= \bar{L}_i E_{Rr} + (N_i + 1) \bar{L}_i E_{Tr} \\ &= \bar{L}_i l_p \epsilon_0 + (N_i + 1) \bar{L}_i l_p (\epsilon_0 + \epsilon_1 d^2) \\ &= \bar{L}_i l_p [(N_i + 2) \epsilon_0 + (N_i + 1) \epsilon_1 d^2] \end{aligned} \quad (4)$$

综上所述,节点 i 在时间段 T 之后的剩余能量为:

$$E_k(T) = E_k(t_0) + E_H(T) - E_C(T), \forall T \in [0, +\infty) \quad (5)$$

其中, $E_k(t_0)$ 表示节点 i 在时间段 T 的起始时刻 t_0 时的剩余能量,用 \bar{E} 表示节点电容器的容量上限,则 $0 \leq E_k(T) \leq \bar{E}$ 。

为了保证节点 i 在时间段 T 之内能正常工作, $E_k(T)$ 必须满足:

$$E_k(T) \geq \delta, T \in [0, \infty) \quad (6)$$

其中, δ 表示节点正常工作时的能量下限,即节点的能量低于 δ 时,无法正常工作。

式(6)给出了节点 i 在传输路径建立的过程中能够成为中继节点的条件之一。这个条件可确保节点有足够的能量用于参与数据包转发。

3 问题描述

在 EH-WSN 中,纯网络层的路由策略并没有考虑到每跳的发送速率、链路的成功收包率以及重传次数等与物理层和 MAC 层有关的参数。事实上,提高发送速率可能会降低时延或提高吞吐量,但也可能会降低链路的成功收包率或增加重传次数,进而增加能耗;相反,降低发送速率,可能提高了传输时延,但也可能会提高链路的成功收包率,减少数据包的重传次数,降低能耗。另外,提高发送速率是否能降低时延,还要结合无线链路的质量,倘若链路质量很差,高速发送数据导致丢包次数增加,不断重传,最后的总时延也不一定能减少。因此,节点在中继转发数据包时采用何种速率,必须进行综合权衡。

本文需要解决的问题是:在一定成功收包率的约束下,充分考虑节点当前的剩余能量和传输周期之内节点的能量捕获和能量消耗情况,对传输路径上的每个节点配置最优的传输速率,以降低传输路径的端到端传输时延,提高系统的吞吐量。

下面通过数学模型对拟解决的问题进行描述。

首先,节点物理层的传输速率与链路的成功收包率之间的关系与具体物理信道有关,在 IEEE802.15.4 标准中,以 DSSS 直序扩频技术和基于 O-QPSK 调制方式的信道为例,其误码率 p_e 可表示为^[13]:

$$P_e = Q((2\psi(d)B_N/R)^{1/2}) \quad (7)$$

其中, B_N 是噪声带宽, R 是传输速率, $Q(\cdot)$ 是高斯尾部积分函数,有:

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} e^{-t^2/2} dt, x \geq 0 \quad (8)$$

且 $\psi(\cdot)$ 是接收信噪比,它是关于发送节点 i 与接收节点 $i+1$ 之间的距离 $d_{i,i+1}$ 的函数,有:

$$\psi(d) = P_t - PL(d_0) - 10\eta \log_{10}(d_{i,i+1}/d_0) - P_n \quad (9)$$

其中, P_t 为发射功率, $PL(d_0)$ 为单位距离 d_0 (1 米)下的功率损耗, η 为功率衰减系数,取值范围为 $2 \sim 4$, P_n 为接收功率阈值(即节点接收功率大于或等于 P_n 时才能正常接收数据

包)。

将式(8)、(9)代入式(7)中,可求得误码率 p_e 。

若节点 i 拟发送的数据包长度为 l_p ,则链路一次传输成功的收包率可表示为:

$$P_{pkt} = (1 - P_e)^{l_p} \quad (10)$$

若采用无重传机制,则任意节点 i 和它的邻居节点 $i+1$ 之间的链路 $(i, i+1)$ 的成功收包率为:

$$p_{i,i+1} = p_{pkt} = (1 - P_e)^{l_p} \quad (11)$$

若采用重传机制,则节点 $i+1$ 在收到数据包时需向节点 i 发送 ACK 确认包,ACK 确认包也可能发生误码和丢包。若 ACK 确认包长度为 l_a ,则 ACK 确认包被节点 i 正确接收的概率为:

$$P_{ack} = (1 - P_e)^{l_a} \quad (12)$$

结合式(10)和式(12),可得到有重传的情况下链路 $(i, i+1)$ 之间的成功收包率为:

$$p_{i,i+1} = p_{pkt} P_{ack} = (1 - p_e)^{l_p + l_a} \quad (13)$$

其次,若采用重传机制,在最大重传次数为 K 时,在节点 i 发送数据包给节点 $i+1$ 的过程中,恰好在第 k ($0 \leq k \leq K+1$) 次发送成功的概率为:

$$P_{i,i+1}(k) = p_{i,i+1} (1 - p_{i,i+1})^{k-1} \quad (14)$$

重传 K 次之后仍然失败的概率为:

$$P_{f(i,i+1)} = (1 - p_{i,i+1})^{K+1} \quad (15)$$

则,1 个数据包发送成功的概率为:

$$P_{s(i,i+1)} = 1 - P_{f(i,i+1)} = 1 - (1 - p_{i,i+1})^{K+1} \quad (16)$$

那么,节点 i 在采用重传机制的情况下每发送 1 个数据包的期望传输次数为:

$$\begin{aligned} N_i &= \sum_{k=1}^{K+1} [k P_{i,i+1}(k)] + (K+1) P_{f(i,i+1)} \\ &= p_{i,i+1} \sum_{k=1}^{K+1} [k (1 - p_{i,i+1})^{k-1}] + (K+1) (1 - p_{i,i+1})^{K+1} \\ &= \frac{1 - (1 - p_{i,i+1})^{K+1}}{p_{i,i+1}} \\ &= \frac{P_{s(i,i+1)}}{p_{i,i+1}} \end{aligned} \quad (17)$$

式(17)说明了若节点 i 有 \bar{L}_i 个数据包要发送,则期望发送的数据包个数是 $(N_i + 1) \bar{L}_i$ 。这与 2.2 节中在推导式(4)时的考虑相吻合。

在对信道链路质量有一定要求的情况下,可令:

$$P_{s(i,i+1)} \geq P_0 \quad (18)$$

其中, P_0 为链路的成功收包率阈值,可根据实际情况由用户设定。式(18)给出了节点 i 在传输路径建立的过程中能够成为中继节点的条件之二。这个条件对传输质量进行了约束,倘若链路 $(i, i+1)$ 的成功收包率低于 P_0 ,则说明当前链路无法满足传输任务关于传输质量的需求,那么,节点 i 不能成为中继节点。

假设网络中某个源节点到 sink 节点的候选传输路径有 m ($0 < m \leq \infty, m \in Z^+$) 条,现考虑其中的第 r ($1 \leq r \leq m, m \neq 0, r \in Z^+$) 条。令这条路径由编号依次为 $0, 1, 2, \dots, n-1, n$ 的 $n+1$ 个节点组成,其中,0 表示源节点, n 表示 sink 节点,任意节点 i ($0 \leq i \leq n-1$) 和节点 $i+1$ 在这条路径上互为邻居。

以 $T_{i,i+1}(R_i)$ 表示节点 i 以速率 R_i 向节点 $i+1$ 发送数据包的持续时间。由于节点 i 在传输数据时,它自身及其所有

下游节点能量捕获一直在进行,因此,从传输周期(指的是从源节点开始传输的那一刻起至 sink 节点接收结束的那一刻所持续的时间)开始的那一刻(t_0)算起,节点 i 在当前传输周期内的有效能量捕获时间为:

$$\bar{T}_i = \sum_{j=0}^i T_{j,j+1}(R_i) \quad (19)$$

如图 3 所示,由于时间段 \bar{T}_i 之后节点 i 的传输任务已完成,因此,对于本次传输周期来说, \bar{T}_i 之后节点 i 的能量捕获情况与本轮传输无关,可以认为, \bar{T}_i 之后节点 i 捕获到的能量对本轮传输来说是无效的,这就说明了为什么式(19)中的 \bar{T}_i 称为有效能量捕获时间。

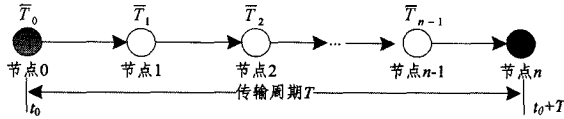


图 3 节点有效能量捕获持续时间

根据式(1)、式(4)、式(5)和式(19),在路径 r 上,任意节点 i 在时间段 \bar{T}_i 之后的剩余能量为:

$$\begin{aligned} E_k^r(\bar{T}_i) &= E_k(t_0) + E_H(\bar{T}_i) - E_C(\bar{T}_i) \\ &= E_k(t_0) + \lambda \frac{E_1 + E_2}{2} \sum_{j=0}^i T_{j,j+1} - \bar{L}_i l_p [(N_i + 2)\epsilon_0 \\ &\quad + (N_i + 1)\epsilon_1 d^2] \end{aligned} \quad (20)$$

要求解式(20),必须先求得 \bar{L}_i 。由于无线链路的不可靠性,在源节点 0 发出 L 个数据包之后,其下一跳节点 1 实际收到的数据包个数是随机数,不妨以随机变量 ξ_1 来表示,易知 $\bar{L}_1 = E[\xi_1]$,由概率论的知识可以推导出节点 1 收到的数据包的期望个数为:

$$\begin{aligned} \bar{L}_1 &= E[\xi_1] \\ &= 1C_L^1 P_{f(0,1)}^{L-1} (1 - P_{f(0,1)}) + 2C_L^2 P_{f(0,1)}^{L-2} (1 - P_{f(0,1)})^2 + \\ &\quad \dots + LC_L^L P_{f(0,1)}^0 (1 - P_{f(0,1)})^L \\ &= \sum_{j=1}^L j C_L^j P_{f(0,1)}^{L-j} (1 - P_{f(0,1)})^j \\ &= L(1 - P_{f(0,1)}) \\ &= LP_{s(0,1)} \end{aligned} \quad (21)$$

同理,节点 2 收到的数据包的期望个数为:

$$\begin{aligned} \bar{L}_2 &= E[\xi_2] = \sum_{j=1}^{L_1} j C_{L_1}^j P_{f(0,1)}^{L_1-j} (1 - P_{f(1,2)})^j \\ &= \bar{L}_1 P_{s(1,2)} = LP_{s(0,1)} P_{s(1,2)} \end{aligned} \quad (22)$$

以此类推,可以得到路径 r 上除源节点 0 之外其它任意节点 i 收到数据包的期望个数的递推式为:

$$\bar{L}_i = L \prod_{j=0}^{i-1} P_{s(j,j+1)}, i=1, 2, \dots, n \quad (23)$$

进一步,将式(23)代入式(20),便可求得任意节点 i 在时间段 \bar{T}_i 之后的剩余能量 $E_k^r(\bar{T}_i)$,再根据式(6),可判断节点 i 是否有足够的能量来完成传输任务。

为了得到路径 r 的端到端传输时延,必须先求出路径 r 上的每一跳链路($i, i+1$)之间的传输时延 $T_{i,i+1}^r(R_i)$, $T_{i,i+1}^r(R_i)$ 是一个关于节点传输速率 R_i 的函数,有:

$$\begin{aligned} T_{i,i+1}^r(R_i) &= \frac{(1+N_i)\bar{L}_i l_p + \bar{L}_{i+1} l_a}{R_i} \\ &= \frac{(1+N_i)l_p + l_a P_{s(i,i+1)}}{R_i} L \prod_{j=0}^{i-1} P_{s(j,j+1)} \end{aligned} \quad (24)$$

$T_{i,i+1}^r(R_i)$ 包含两部分时延,第一部分为节点 i 传输数据包给节点 $i+1$ 的发送时延,第二部分是节点 $i+1$ 回复 ACK

确认包给节点 i 的确认时延。

从式(7)至式(16)可知,成功收包率 $P_{s(i,i+1)}$ 和每个包的期望重传次数 N_i 与发送速率 R_i 有关, R_i 不同,对应的 $P_{s(i,i+1)}$ 和 N_i 也不同。从式(24)可以看出,在 L, l_p, l_a 等参数已知,通过合理配置 R_i ,有望最小化 $T_{i,i+1}^r(R_i)$ 。因此,为了降低路径 r 的时延,可以对 $T_{i,i+1}^r(R_i)$ 进行优化,让节点 i 在满足 $P_{s(i,i+1)} \geq P_0$ 的情况下,调整发送速率 R_i ,使得链路($i, i+1$)的传输时延最小。

至此,本文要解决的主要问题可通过以下优化方程来描述:

$$\begin{aligned} &\text{Min } T_{i,i+1}^r(R_i) \\ &\text{w. r. t } R_i \\ &\text{s. t. } \begin{cases} R_i \in A = \{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N\} \\ i \in \{0, 1, 2, \dots, n-1\} \\ P_{s(i,i+1)} \geq P_0 \\ E_k^r(\bar{T}_i) \geq \delta \end{cases} \end{aligned} \quad (25)$$

其中,集合 A 是节点的候选速率集合,由 N 个速率组成。

得到 $T_{i,i+1}^r(R_i)$ 以后,路径 r 的端到端传输时延自然也就得到了,即:

$$T(r) = \sum_{i=0}^{n-1} T_{i,i+1}^r(R_i) \quad (26)$$

在路径选取时,以 T 表示所选择的路径的传输时延,为了使端到端传输时延最小化,优先选择的路径是使

$$T = \min\{T(r)\}, 1 \leq r \leq m \quad (27)$$

成立的那条路径作为传输路径。

最后,可以求出所选路径的有效吞吐率(指 sink 节点收到数据包的期望个数与端到端传输时延的比值)为:

$$\rho = \frac{\bar{L}_n}{T} = \frac{L \prod_{j=0}^{n-1} P_{s(j,j+1)}}{T} \quad (28)$$

4 路由算法设计

本文所采用的路由发现过程与 AODV 协议^[14](Ad hoc On-Demand Distance Vector)的思想类似,主要包括路由请求和路由回复两个阶段。同时,需要定义路由请求(RREQ)、路由回复(RREP)和路由错误(RERR) 3 种路由控制消息^[14]。本文所定义的 RREQ 主要包含源节点 ID(Source_ID)、目的节点 ID(Destination_ID)、拟传输的数据包个数(Data_Size)、从 t_0 时刻开始截至当前节点的传输时延(Total_Time)以及距离 sink 节点的跳数(Hops_Count)等字段,另外还有其它几个控制字段^[15]。在 IEEE 802.15.4 标准中,Source_ID 和 Destination_ID 长度是 16 位,即各占 2 个字节。Data_Size 和 Total_Time 由本文进行定义,各占 2 字节,可以支持每次发送最大 65536 个数据包和 65536 秒的传输时延,Hops_Count 占 1 个字节,可以支持网络的最大规模是距离 sink 节点 256 跳。RREQ 主要的数据字段如表 1 所列。

表 1 RREQ 的数据结构

Source_ID	Destination_ID	Data_Size	Total_Time	Hops_Count
2Bytes	2Bytes	2Bytes	2Bytes	1Bytes

RREP 和 RERR 的详细结构可参考文献^[14]。

网络可以用一个图 $G(V, E)$ 来表示^[1], V 为节点集, E 为

所有链路组成的边集。网络有一个 sink 节点,任意节点可以通过多跳的方式将感知到的数据传给 sink 节点,如图 4 所示。可以看到,图中源节点 S 对应 4 条候选路径: $\{S, D, F, H, \text{sink}\}$ 、 $\{S, B, A, \text{sink}\}$ 、 $\{S, C, A, \text{sink}\}$ 和 $\{S, C, E, \text{sink}\}$ 。

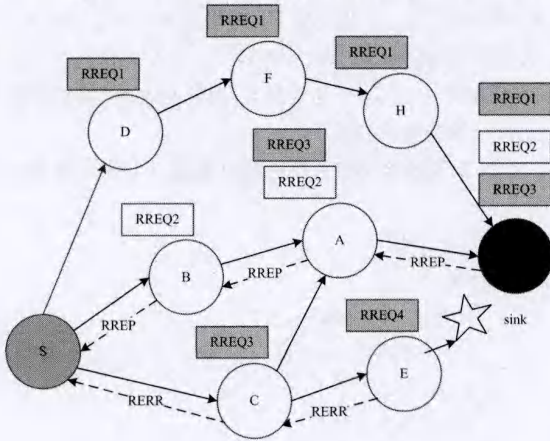


图 4 网络模型

若 S 有 L 个数据包要发送,则它向每个邻居(D, B 和 C)分别单播一个 RREQ。这跟 AODV 协议采用广播的方式来发现路由有很大的区别。考虑到网络中每条链路的质量可能不同, S 在发送 RREQ 之前,必须对与其邻接的每条链路进行估算(例如计算成功收包率、重传次数等),以计算出它的下一跳可能收到的数据包个数 \bar{L} 和对应的传输时延 $T(\alpha_x)$, $\alpha_x \in A, x=1, 2, \dots, N$ 。以 D 所在的路径 $\{S, D, F, H, \text{sink}\}$ (为便于分析,不妨将路径编号为 0, 1, 2, 3, 4) 为例,在 S 向邻居 D 发送 RREQ 之前,要先计算 \bar{L}_1 和 $\min\{T_{0,1}(\alpha_x)\}$, 并更新 RREQ 中的 Data_Size 和 Total_Time 字段。路径 $\{S, D, F, H, \text{sink}\}$ 上的 RREQ 中的 Data_Size 和 Total_Time 两个字段的更新过程如图 5 所示。

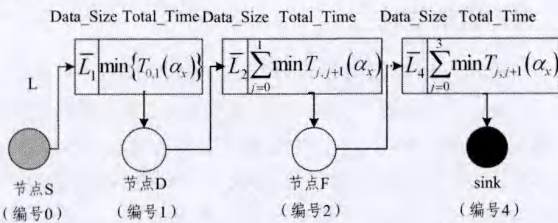


图 5 RREQ 的更新过程

这样,在 D, B 和 C 收到各自的 RREQ 之后,也按相同的方式处理 RREQ。若网络中存在一条或一条以上的可行路径时, RREQ 最终会到达 sink 节点,以图 4 为例, sink 节点最终收到 3 个 RREQ,说明从 S 到 sink 节点存在 3 条可行路径。此时, sink 节点根据这 3 个 RREQ 里的 Total_Time 字段来决定采取哪一条传输路径。不妨设 RREQ2 所对应的 Total_Time 字段的值最小,那么, sink 节点沿 RREQ2 到来的路径反向发送一个路由响应包 RREP 给 S,当 S 收到 RREP 时,就开始传输数据。

此外,当某个节点 i (例如图 4 中的 E)所对应的 $P_{s(i,j+1)} < P_0$ 或 $E_R(T_i) < \delta$ (即不能满足作为中继节点的条件)时,它会向其上游节点发送一个 RERR 消息,以告知 S 此路不通。

详细的算法流程图如图 6 所示。图中,左边是普通传感节点处理 RREQ 的算法流程图,右边是 sink 节点选择传输路径

的算法流程图。当节点的邻居个数为 N 且速率集合 A 中的元素个数为 P 时,节点处理 RREQ 的算法的时间复杂度主要由规模为 P 的内循环和规模为 N 的外循环这两重循环来决定,即算法的时间复杂度为 $O(NP)$,这个算法在源节点以及所有可能的候选路径上的中继节点上执行,如果算法存在可行解,则继续向下一跳节点传递 RREQ 消息,以进一步搜索可能的传输路径;如果算法不存在可行解,则向上一跳节点发送 RERR,以告知此路不通。sink 节点选择最优传输路径(即端到端时延最小的路径)的算法是一个查找算法,当 sink 节点收到的 RREQ 的个数为 M 时,说明这个查找算法的规模为 M ,采用二分查找算法,其时间复杂度为 $O(\log_2 M)$ 。那么,该路由算法总的复杂度为 $O(NP) + O(\log_2 M)$ 。

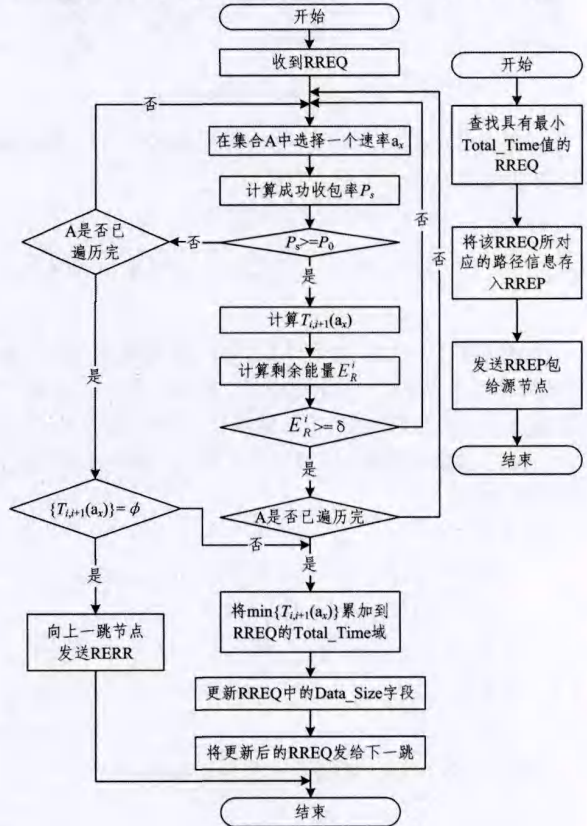


图 6 算法流程

在路由发现的过程中,路径上的节点除了要处理 RREQ、RREP 和 RERR 等控制消息外,还要在内存中维护一张路由表,路由表的表项主要包括^[14]:目的节点 ID、路由状态(有效、无效等)、距 sink 节点的跳数、下一跳 ID、先驱表、TTL 等。

5 性能评价

为了验证所提算法的性能,进行了仿真实验。实验环境配置如下: Windows7 操作系统, Intel Pentium 2.2G CPU, 2.0G 内存, MATLAB R2012b。

实验参数配置如下:

在 $400\text{m} \times 400\text{m}$ 的方形区域中随机部署 100 个节点, sink 节点的坐标固定在 $(400\text{m}, 400\text{m})$ 处,节点的通信半径 $d=75\text{m}$,数据包的长度 $l_p=127\text{B}$, ACK 包的长度 $l_a=5\text{B}$ 。

物理层参数设置^[15]如下: $P_t=0\text{dBm}$, $B_N=30\text{kHz}$, $PL(d_0)=55\text{dBm}$, $\eta=2$, $P_n=-95\text{dBm}$ 。采用 O-QPSK-A 调

制技术,共有 6.25kb/s、12.25kb/s、25kb/s、50kb/s 4 种可选速率^[6],因此,集合 $A = \{6.25, 12.25, 25, 50\}$,MAC 层最大重传次数 $K = 7$ ^[8]。

借鉴文献^[16],在 10cm^2 的捕获面积之下,节点的能量捕获速率介于 $0.000032\text{ J/s} - 0.037\text{ J/s}$ 之间。因此,本文置 $E_1 = 0.000032, E_2 = 0.037, \lambda = 1$,表示能量捕获机会平均每秒出现 1 次,每次捕获到的能量在区间 $[0.000032, 0.037]$ 上等概率随机出现。节点能量下限 $\delta = 10\text{J}$,电容器的容量 $\bar{E} = 100\text{J}$ ^[17]。

设置 $L = 1000$,链路收包率阈值 $P_0 = 0.9$ 。这样设置有一定的应用背景,例如在多媒体传感网中,每次节点捕捉到一些图像或声音要传送给 sink 节点,此时, $L = 1000$ 表示节点有 $1000 \times 127\text{B} \approx 124\text{KB}$ 的多媒体数据要发送; $P_0 = 0.9$ 表明传输过程中每一跳的成功收包率不能小于 90%。

实验分 8 轮进行,第 1 轮实验的源节点从距离 sink 节点 1 跳的节点集中随机选择;第 2 轮实验的源节点从距离 sink 节点 2 跳的节点集中随机选择,以此类推。每一轮选定源节点之后,在该节点上分别运行自适应速率(Adaptive Rate, AR)路由算法和固定速率(Fixed Rate, FR)路由算法,路径选择策略按图 6 所示的算法流程进行。实验首先观察路径上各节点的运行状态,然后对比分析所选路径的传输时延、能量消耗和吞吐率等指标。

首先,考察算法的运行效果。以第 8 轮为例,AR 算法的运行结果如图 7 所示。

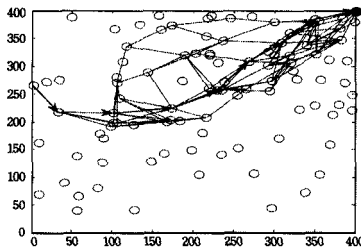


图 7 AR 算法的运行效果

图中带箭头的路径 $90 \rightarrow 55 \rightarrow 39 \rightarrow 18 \rightarrow 33 \rightarrow 44 \rightarrow 27 \rightarrow 5 \rightarrow 100$ 为时延最低的路径,其它路径(浅灰色连线)表示可行路径。节点 90 是源节点,节点 100 是 sink 节点,传输时延为 798.14s。源节点及各中继节点的运行状态如表 2 所列。

表 2 节点运行状态数据

节点编号	数据速率 (kb/s)	链路收包率	传输时延 (s)	平均重传次数	平均能量捕获速率 (J/s)	能量消耗 (J)	初始能量 (J)	剩余能量 (J)
90	25	1.0000	87.49	1.1528	0.0078	0.2324	63.60	64.06
55	12.25	1.0000	168.80	1.0353	0.0091	0.2705	32.89	36.47
39	12.25	1.0000	169.86	1.0480	0.0113	0.2719	49.28	58.56
18	50	0.9707	72.96	2.5904	0.0226	0.4384	20.87	39.61
33	50	1.0000	46.87	1.3170	0.0219	0.2996	25.65	46.70
44	25	1.0000	79.57	1.0541	0.0266	0.2598	13.18	41.93
27	25	1.0000	92.61	1.3908	0.0220	0.2944	54.73	82.42
5	25	1.0000	79.98	1.0646	0.0103	0.2609	63.44	76.95

从表 2 可以看到,路径上各节点在转发数据时能自适应调节传输速率,节点 90 采用 25kb/s 进行传输,节点 55 和 39 采用 12.25kb/s,而节点 18 和 33 则将速率提高到 50kb/s,节点 44、27 和 5 又将速率下降到 25kb/s。从这条路径的具体运行情况来看,传输任务结束之后节点的剩余能量均不低于初

始能量,这说明节点的能量捕获能力有助于维持网络运行的持续性。

然后,对比分析算法的性能。算法从路径的传输时延、吞吐率和能量消耗等 3 个指标进行对比,如图 8—图 10 所示。

从图 8 可以看出,AR 算法在不同路径长度(以距离 sink 节点的跳数来衡量,有 1—8 跳共 8 种路径长度)之下时延均优于 FR 算法。值得注意的是,FR-25.00kb/s 算法在路径长度为 5、6 和 7 跳时时延为 0,这表示不存在可行路径;而 FR-50kb/s 则在路径长度为 2—8 跳时不存在可行路径,这是因为采用 25.00kb/s 和 50kb/s 时,多数链路的成功收包率低于 0.9,导致节点无法达到既定的传输质量要求,从而可行路径减少。存在不可行路径的 FR-25.00kb/s 和 FR-50kb/s 在图 8—图 10 中未加入连接线。此时,若采用 AR 算法,节点就会自动降低速率,使得在采用 FR 算法时走不通的路径成为可行路径。这是 AR 算法的优点之一。

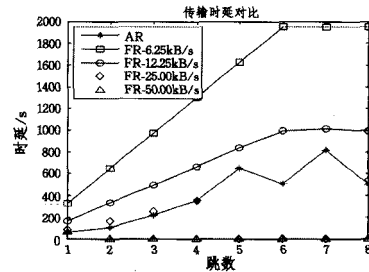


图 8 传输时延对比

AR 算法所找到的路径的吞吐率要高于 FR 算法,主要是因为采用 AR 算法后路径时延明显降低了,相应地,路径的吞吐率可得到提升,如图 9 所示。

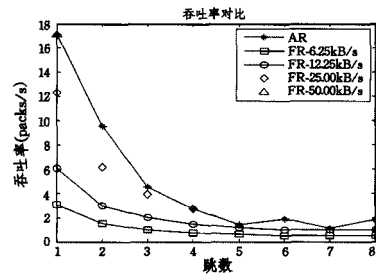


图 9 吞吐率对比

在传输能耗方面,AR 算法要高于 FR 算法,如图 10 所示。这是因为 AR 算法在路径上传输数据包总数要多于 FR 算法。但对于 EH-WSN 路由算法来说,能耗偏高并不一定是缺点,因为 EH-WSN 的能量可以从环境中捕获而来,事实上,能耗的增加也从侧面说明了性能方面也有所提高。

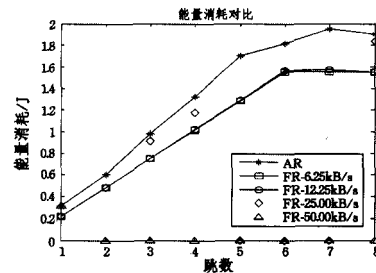


图 10 能量消耗对比

结束语 EH-WSN 是无源感知技术中尤为重要的一类,是物联网感知客观世界必不可少的基础平台。提高 EH-

WSN 的性能有一定的应用背景和实际意义。EH-WSN 的路由算法对于网络运行的持续性和网络性能的提升有很大的影响,结合 EH-WSN 节点能量捕获的特性,在路由发现时考虑链路的成功收包率,为节点配置合适的传输速率,有利于确保传输质量、减少传输时延和提高网络的吞吐率。从实验的结果来看,所提出的方法是可行的和有效的。

参 考 文 献

[1] Shuai Peng, Chor Ping Low. Energy Neutral Routing for Energy Harvesting Wireless Sensor Networks[C]// Proceedings of 2013 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). Shanghai, 2013:2063-2067

[2] Kawashima K, Sato F. A Routing Protocol Based on the Power Generation Pattern of Sensor Nodes in Energy Harvesting Wireless Sensor Networks[C]// Proceedings of 2013 16th International Conference on Network-Based Information Systems (NBIS). Gwangju, 2013:470-475

[3] Nga Dang, Roshanaei M, Bozorgzadeh, et al. Adapting Data Quality with Multihop Routing for Energy Harvesting Wireless Sensor Networks[C]// Proceedings of 2013 International Green Computing Conference (IGCC). Arlington, 2013:1-6

[4] Xiao Meng, Zhang Xue-dan, Dong Yu-han. An Effective Routing Protocol for Energy Harvesting Wireless Sensor Networks[C]// Proceedings of 2013 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). Shanghai, 2013:2080-2084

[5] Beheshti S S, Tan H, Sabaei M. Opportunistic Routing with Adaptive Harvesting-aware Duty Cycling in Energy Harvesting WSN[C]// Proceedings of 2012 15th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC). Taipei, 2012:90-94

[6] Alrajeh N A, Han S U, Lloret J, et al. Secure Routing Protocol Using Cross-Layer Design and Energy Harvesting in Wireless Sensor Networks[J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2013, 2013:1-11

[7] Eu Z A, Tan H-P. Adaptive Opportunistic Routing Protocol for Energy Harvesting Wireless Sensor Networks[C]// Proceedings of 2012 IEEE International Conference on Communications

(ICC). Ottawa, 2012:318-322

[8] LAN/MAN Standards Committee. Part 15. 4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks[S]. 2012

[9] Ali M I, Al-Hashimi B M, Recas J, et al. Evaluation and Design Exploration of Solar Harvested-Energy Prediction Algorithm[C]// Proceedings of 2010 Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (DATE). Dresden, 2010:142-147

[10] Chin Keong-Ho, Pham Dang Khoa, Pang Chin Ming. Markovian Models for Harvested Energy in Wireless Communications[C]// Proceedings of 2010 IEEE International Conference on Communication Systems (ICCS). Singapore, 2010:311-315

[11] Ventura J, Chowdhury K. Markov Modeling of Energy Harvesting Body Sensor Networks[C]// Proceedings of 2011 IEEE 22nd International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC). Toronto, 2011:2168-2172

[12] Heinzelman W B, Balakrishnan H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks[J]. IEEE Trans on wireless communications, 2002, 1(4):660-670

[13] Landolsi M A, Stark W E. On the accuracy of Gaussian approximations in the error analysis of DS-CDMA with OQPSK modulation[J]. IEEE Transactions on Communications, 2002, 50(12):2064-2071

[14] Perkins C, Belding-Royer E, Das S. Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing[OL]. <http://moment.cs.ucsb.edu/AODV/>

[15] Vuran Mehmet C, Akyildiz I F. Cross-Layer Analysis of Error Control in Wireless Sensor Networks[C]// Proceedings of 2006 3rd Annual IEEE Communications Society on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks. Reston, 2006:585-594

[16] Seah W K G, Zhi Ang Eu, Tan H. Wireless Sensor Networks Powered by Ambient Energy Harvesting (WSN-HEAP)-Survey and Challenges[C]// Proceedings of 1st International Conference on Wireless Communication, Vehicular Technology, Information Theory and Aerospace & Electronic Systems Technology. Aalborg, 2009:1-5

[17] Wu Yin, Liu Wen-bo. Routing protocol based on genetic algorithm for energy harvesting-wireless sensor networks[J]. IET Wireless Sensor Systems, 2013, 3(2):112-118

(上接第 75 页)

[3] Hei Xiao-jun, Liu Yong, Ross K W. IPTV over P2P streaming networks: the mesh-pull approach [J]. Communications Magazine, 2008, 46(2):86-92

[4] Chen Y-F, Huang Yen-nun, Jana R, et al. Towards capacity and profit optimization of video-on-demand services in a peer-assisted IPTV platform [J]. Multimedia Systems, 2009, 15(1):19-32

[5] Xu C, Li S. Digital rights management solutions based on IPTV DRM[C]// 2010 2nd International Conference on Networking and Digital Society (ICNDS). IEEE, 2010, 2:43-46

[6] 陈粒, 王汝传, 李致远, 等. 基于 P2P 的 IPTV 的 CAS 密钥管理机制[J]. 计算机与数字工程, 2010, 38(11):100-103

[7] Moon J, Kim J, Park J, et al. A dynamic conditional access system for IPTV multimedia systems[C]// Fourth International Conference on Systems and Networks Communications, 2009 (ICSNC'09). IEEE, 2009:224-229

[8] Wang Chun-ling, Feng Jing-yu. A Study of Mutual Authentica-

tion for P2P Trust Management[C]// 2010 Sixth International Conference on Intelligent Information Hiding and Multimedia Signal Processing (IIH-MSP). IEEE, 2010:474-477

[9] 王真, 张志勇, 常亚楠. 一种面向 Android 平台的多媒体数字版权管理系统[J]. 计算机科学, 2014, 41(5):129-132, 142

[10] Wu Wei-chen, Chen Yi-ming. A anonymous DRM scheme for sharing multimedia files in P2P networks[J]. Multimedia Tools and Applications, 2014, 69(3):1041-1065

[11] Liu Xiao-yun, Huang Tie-jun, Huo Long-she, et al. A DRM architecture for manageable P2P based IPTV system[C]// 2007 IEEE International Conference on Multimedia and Expo. IEEE, 2007:899-902

[12] Zhang Yuan, Huang Yong-feng, Yuan Jian. An efficient group rekey scheme for P2P IPTV DRM system[C]// 2011 13th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT). IEEE, 2011:1479-1483