

传感器网络利用效用模型的跨层优化路由策略*

李燕君, 邵剑集, 雷艳静

(浙江工业大学 计算机科学与技术学院, 浙江 杭州 310023)

通讯作者: 李燕君, E-mail: yjli@zjut.edu.cn

摘要: 在传感器网络路由设计中, 可靠性与能耗是两个重要但相互抵触的性能指标. 为满足不同传输需求对这两个指标的不同要求, 引入经济学中的效用模型, 将这两个指标融合到统一的框架下进行路由决策的优化. 以期望传输效用最大化为目标, 将物理层的发射功率、MAC 层的重传次数与网络层的路由决策在效用模型的框架下进行了联合优化. 针对不同重要程度的数据, 选择不同的路由方案、每跳发射功率及重传次数. 仿真显示所提出的跨层优化路由性能优于固定传输功率和固定重传次数的路由, 并且能更好地兼顾可靠性、能耗和传输优先级等多维度需求.

关键词: 效用; 跨层优化; 可靠性; 能耗; 传感器网络

中文引用格式: 李燕君, 邵剑集, 雷艳静. 传感器网络利用效用模型的跨层优化路由策略. 软件学报, 2013, 24(Suppl. (1)): 117-124. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/13013.htm>

英文引用格式: Li YJ, Shao JJ, Lei YJ. Cross-Layer-Optimized routing using utility model for sensor networks. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2013, 24(Suppl. (1)): 117-124 (in Chinese). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/13013.htm>

Cross-Layer-Optimized Routing Using Utility Model for Sensor Networks

LI Yan-Jun, SHAO Jian-Ji, LEI Yan-Jing

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

Corresponding author: LI Yan-Jun, E-mail: yjli@zjut.edu.cn

Abstract: In routing design in sensor networks, reliability and energy-efficiency are two important but conflicting performance metrics. To better reconcile the two metrics for different packet delivery requirements, utility model in economics is introduced, to integrate the cost and reliability metrics in a unified framework to evaluate the optimality of the routing decisions. This paper simultaneously optimize the transmission power in physical layer, the maximum retry count in MAC layer and the routing decisions in network layer using the framework provided by the utility model to achieve the objective of maximizing the expected utility of packet delivery. In the process, packets of different importance are delivered through different routing paths with different transmission powers and retry counts in each hop. Simulation results show that our cross-layer-optimized routing strategy performs better than those with fixed transmission power and fixed retry count. It also makes a good tradeoff among reliability, energy cost and the transmission priority.

Key words: utility; cross-layer optimization; reliability; energy consumption; sensor network

效用是经济学中常用的一个概念, 是消费者通过消费使自己的需求得到满足的度量. Lu 和 Wu^[1]首次将经济学中的效用概念引入无线网络的路由设计中以同时优化可靠性和能耗两个指标, 建立了无线网络的数据传输与效用模型的对应关系: 认为数据包从源节点成功传输到目的节点可获得一定的收益, 该收益大小与数据包本身的重要程度相关, 若传输失败, 收益为 0; 传输过程中消耗的能量对应于消费代价; 而传输效用等于获得收益与付出代价的差值. 通常, 收益越高的数据包优先级越高, 节点更倾向选择一条较可靠的路径传输, 而可靠传输往往依赖于更高的发射功率和更大的重传次数, 可能会带来能耗的增加. 效用模型的优势在于可以在路由决策时更好地权衡传输可靠性、能耗和数据包的优先级. 从经济学角度看, 效用越大, 系统整体性能越优. 效用模型应

* 基金项目: 国家自然科学基金(61003264); 浙江省自然科学基金(LY13F020028, LQ12F02015)

收稿时间: 2013-05-02; 定稿时间: 2013-08-22

用到无线网络的传输中,将链路可靠性、能耗和数据包的优先级归纳到统一的优化框架中,以效用最大化为最终优化目标来制定路由决策,可达到数据传输整体性能的优化.由于实际获得收益和付出代价只能在传输完成时才能得到,因此在决策时常用期望值替代,即期望效用等于期望收益和期望代价的差值.

本文的研究也是基于效用模型的优化框架,但是与以往文献不同的是,本文将物理层的发射功率,MAC 层的重传次数与网络层的路由决策在效用模型的框架下进行了跨层联合优化,即每个节点自适应地优化发射功率和重传次数,找到最优的下一跳转发节点.之所以选取物理层的发射功率和 MAC 层的重传次数进行联合优化,是因为发射功率和重传次数会同时影响可靠性和能耗这两个性能指标.具体地说,发射功率和重传次数越大,可靠性越高,但能耗越大.可靠性和能耗对应了效用模型中的期望收益和期望代价.因此,联合优化物理层发射功率和 MAC 层重传次数能权衡期望收益和期望代价,有机会获得最大的期望效用.本文提出的跨层优化路由策略可以在优化资源配置的同时更好地兼顾可靠性,节能和数据包优先级等多维度需求.

1 相关工作

已有很多学者对无线网络中通过跨层设计优化路由选择策略的方法做了研究,其主要思想是通过物理层和 MAC 层将底层参数传递给网络层,网络层适应这些参数的变化,制定更好的路由选择决策.专利^[2]公开了一种基于跨层优化的自适应无线传感器网络路由方法,物理层将无线传感器网络中的节点能量信息与发射功率参数传递给 MAC 层进行睡眠调度,网络层适应下层参数变化采用两跳贪婪路由选择策略.该方法利用各个层次参数信息的交互达到延长网络寿命,提高数据传输可靠性与实时性的整体优化目标.文献[3]提出了一种基于跨层优化策略的协作路由算法,该算法在 DSDV^[4]的基础上通过获取信道信息,自适应地调整 MAC 协议并选取最佳转发节点,可提高数据包平均递交率,并降低端到端平均延迟.Zeng 等人^[5]针对恶劣环境监控的应用设计了一种传感器网络跨层路由机制,该机制结合路由选择,功率控制和链路调度,尽可能为优先级高的事件数据提供无干扰实时传输.Almalkawi 等人^[6]针对无线多媒体传感器网络提出了一种跨层多径路由策略,结合基于 QoS 的 MAC 层调度来优化多路路径路由,以获得可靠,高吞吐量和节能的多媒体数据传输.

无线网络中基于效用的路由协议首先由 Lu 和 Wu 提出^[1],用于权衡传输可靠性和能耗两个指标.由于该模型的有效性,进而被扩展应用于机会路由和低占空比网络的路由设计中,出现一系列基于效用的路由算法^[7-9].但是,以上基于效用的路由协议都没有考虑结合物理层和 MAC 层的参数优化配置获得更优的路由选择策略.由以往文献基于跨层优化路由选择策略的经验可知,网络层适应物理层和 MAC 层的参数变化,可制定更好的路由决策.但是现有的跨层优化路由策略大多结合 MAC 的链路调度,设计过于复杂,不利于实现.因此,本文的跨层设计主要是将物理层的发射功率,MAC 层的重传次数与网络层的路由决策在效用模型的框架下进行了联合优化,不依赖具体的物理层协议和 MAC 协议,仅在各层间进行简单的参数传递,以传输效用最大化为目标,自适应地优化发射功率和重传次数获得最优的路由选择策略.

2 系统模型与问题描述

2.1 网络模型

网络用图 $G(V,E)$ 描述, V 为节点集合, E 为链路组成的边集.考虑的网络场景是目的节点 d 期望收到是源节点 s 发送的数据包, s 通过多跳将数据包送至 d .每个数据包的成功传输将获得一定的收益,记为 v .对任意节点对 i,j ,给定发射功率 P_i ,令 p_{ij} 为链路一次传输成功收包率(无重传), c_{ij} 为一次传输能耗,当且仅当 $p_{ij} \geq p_{th}$ 时,链路 $(i,j) \in E$,其中 p_{th} 是链路可靠性阈值,可由用户自己定义.

2.2 基本效用模型

在基于基本效用模型的路由协议中,源节点通过多跳将数据包送至目的节点.每个数据包的成功传输将获得一定的收益 v ,总的传输代价为 c .若传输成功,系统效用 $u=v-c$;若传输失败, $u=0-c$.若成功收包概率为 p ,那么期望效用为:

$$U = p(v - c) + (1 - p)(0 - c) = pv - c \quad (1)$$

考虑到多跳网络的端到端传输路径由多条链路组成,假设路径 R 上的节点依次为 $0, 1, 2, \dots, n-1, n$. 其中, 0 为源节点, s, n 为目的节点 d , 相邻节点 i 和 $i+1$ 之间的链路收包率记为 $p_{i,i+1}$, 传输代价记为 $c_{i,i+1}$, 那么端到端成功收包率 $p = \prod_{j=0}^{n-1} p_{j,j+1}$, 端到端传输代价的期望值 $c = c_{0,1} + \sum_{i=1}^{n-1} c_{i,i+1} \prod_{j=0}^{i-1} p_{j,j+1}$. 因此, 式(1)可改写为

$$U = \left(\prod_{j=0}^{n-1} p_{j,j+1} \right) v - \left(c_{0,1} + \sum_{i=1}^{n-1} c_{i,i+1} \prod_{j=0}^{i-1} p_{j,j+1} \right) \quad (2)$$

文献[1]认为,从目的节点的角度看,任何中间节点都可以看做虚拟的源节点和目的节点,那么期望效用可由目的节点递推地返回源节点进行计算.例如,对目的节点 n 来说,若成功传输包的收益为 v ,那么假定它的上一跳节点 $n-1$ 为虚拟源节点,则节点 $n-1$ 的期望效用为 $u_{n-1} = p_{n-1,n}v - c_{n-1,n}$, 依此类推,以节点 $n-1$ 为目的节点,它的上一跳节点 $n-2$ 为虚拟源节点,则节点 $n-2$ 的期望效用为 $u_{n-2} = p_{n-2,n-1}u_{n-1} - c_{n-2,n-1}$, 对任意 $i \in 0, 1, \dots, n-1$, 递推表达式为

$$u_i = p_{i,i+1}u_{i+1} - c_{i,i+1} \quad (3)$$

直至递推到节点 0 , 有 $U = u_0 = p_{0,1}u_1 - c_{0,1}$, 文献[1]证明了通过反向递推得到的 u_0 与通过式(2)计算得到的 U 值相等.

2.3 扩展效用模型

基本效用模型中没有细化每跳成功收包率、能耗代价等与物理层发射功率和MAC层重传次数的关系.实际上,增加发射功率可提高信噪比,从而提高成功收包率,但会增加能耗;同样,增加MAC层的重传次数,能提高链路可靠性,但也会带来额外能耗.本文需要解决的问题是如何配置最优的发射功率和重传次数,以获得最大的效用.因此,必须在效用模型中引入发射功率和重传次数作为控制变量.首先,发射功率与链路收包率的关系取决于具体的信道模型.以IEEE 802.15.4信道^[10]为例,采用DSSS直序扩频技术和基于O-QPSK的调制方式,则误码率 p_e 可表示为

$$p_e = Q\left(\sqrt{2\psi(d)B_N/R}\right) \quad (4)$$

其中, B_N 是噪声带宽, R 是数据率, $Q(\cdot)$ 是高斯尾部积分函数, 有 $Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} e^{-t^2/2} dt, x \geq 0$, ψ 是接收信噪比, 它是收发节点间距离 d 的函数, 有:

$$\psi(d) = P_t - PL(d_0) - 10\eta \log_{10}(d/d_0) - P_n \quad (\text{dB}) \quad (5)$$

其中, P_t 为发射功率, $PL(d_0)$ 为单位距离 $d_0(1\text{m})$ 下的功率损耗, η 为功率衰减系数, 通常取值 $2 \sim 4$, P_n 为接收阈值. 将式(5)代入式(4)即可得到任意收发方距离, 任意发射功率下的误码率值. 已知误码率 p_e , 数据帧长度 l , 成功收包率 p_{pkt} 可表示为

$$p_{pkt} = (1 - p_e)^l \quad (6)$$

若采用重传机制, 需引入 ACK 确认, ACK 也可能发生误码和丢包, ACK 的成功接收率用 p_{ack} 表示, 若 ACK 长度为 l_a , 则 $p_{ack} = (1 - p_e)^{l_a}$. 结合式(5)可得任意链路 (i, j) 之间的一次传输成功收包率 p_{ij} 为

$$p_{ij} = p_{pkt} p_{ack} = (1 - p_e)^{l+l_a} \quad (7)$$

其次, 采用重传机制, 考虑任意节点 i 和它的下一跳节点 j , 若最大重传次数为 K_{ij} , 则发送 k 次成功的概率为 $P_s(k) = p_{ij}(1 - p_{ij})^{k-1}$, 重传 K_{ij} 次仍失败的概率为 $P_f = (1 - p_{ij})^{K_{ij}+1}$, 那么, 总的期望传输次数为

$$\bar{N}(K_{ij}) = \sum_{k=1}^{K_{ij}+1} [kP_s(k)] + (K_{ij} + 1)P_f = p_{ij} \sum_{k=1}^{K_{ij}+1} [k(1 - p_{ij})^{k-1}] + (K_{ij} + 1)(1 - p_{ij})^{K_{ij}+1} \quad (8)$$

若每次传输消耗的能量为 c_{ij} , 则最大重传次数为 K_{ij} 时, 节点 i 的效用递推式, 即式(3)可改写为

$$u_i |_{K_{ij}} = \left(1 - (1 - p_{ij})^{K_{ij}+1}\right) u_j - \bar{N}(K_{ij}) c_{ij} \quad (9)$$

类似地,最大重传次数为 $K_{ij}+1$ 时节点 i 的效用为

$$u_i |_{K_{ij}+1} = \left(1 - (1 - p_{ij})^{K_{ij}+2}\right) u_j - \bar{N}(K_{ij} + 1) c_{ij} \quad (10)$$

式(10)减去式(9)得:

$$u_i |_{K_{ij}+1} - u_i |_{K_{ij}} = (1 - p_{ij})^{K_{ij}+1} p_{ij} u_j - (1 - p_{ij})^{K_{ij}+1} c_{ij}.$$

为得到使得效用最大的最小重传次数,令 K_{ij}^* 为满足 $(1 - p_{ij})^{K_{ij}+1} p_{ij} u_j - (1 - p_{ij})^{K_{ij}+1} c_{ij} \leq \varepsilon$ 的最小值,可得:

$$K_{ij}^* = \frac{\ln \varepsilon - \ln(p_{ij} u_j - c_{ij})}{\ln(1 - p_{ij})} - 1,$$

其中 ε 为用户指定的一个极小值,由于重传次数为整数,故对 K_{ij}^* 取整,得

$$K_{ij}^* = \left\lceil \frac{\ln \varepsilon - \ln(p_{ij} u_j - c_{ij})}{\ln(1 - p_{ij})} - 1 \right\rceil \quad (11)$$

由此,我们将发射功率和重传次数都引入了效用模型,并且对每跳重传次数给出了优化方案.

2.4 问题描述

根据递推模型,要使数据包的传输效用最大化,等效于使源节点 s 的效用最大化.因此,本文要解决的问题是可描述为

$$\begin{aligned} & \max u_s \\ & \text{w.r.t } P_i, K \end{aligned}$$

其中, u_s 的递推表达式由式(9)决定,需要优化的变量是每跳的 P_i 和 K ,即通过逐跳优化发射功率,重传次数和路由策略,以获得数据包传输效用的最大化.

3 跨层优化路由算法

本节首先描述了跨层优化路由算法的基本思想和具体工作流程,然后分析了该算法的复杂度.

3.1 算法流程

本算法中计算期望效用从目的节点开始,目的节点的初始效用等于成功传输包的收益.然后,期望效用在每次经过目的节点上游的中间节点时,都按照式(8)重新计算;算法迭代地寻找使得效用下降最小的节点,同时在一跳自适应地得到最优的发射功率和重传次数.算法中涉及到的一些符号定义如下:

V :所有节点的集合;

Q :效用已最大化的节点集合;

u_i :节点 i 当前的期望效用值;

N_i^m :发射功率为 m 下节点 i 的邻居节点集合;

p_{ij}^m :发射功率为 m 下链路 (i,j) 的一次传输成功收包率;

c_{ij}^m :发射功率为 m 下链路 (i,j) 的一次传输能耗.

算法工作流程见算法 1 的伪代码.首先进行初始化,除目的节点外所有节点的效用值都置为 $-\infty$,目的节点的效用置为 v .这时,目的节点 d 的效用最大,因此 d 被选出放入 Q 中,对应于算法 1 的 1~5 行.对于不同的传输功率,得到 d 的邻居节点,对于任意邻居 j ,根据式(11)计算 j 的最优重传次数 K_{ij}^* ,然后根据式(9)计算节点 j 的效用,新计算出来的节点效用与它的原值比较,若新值较大,则用新值替换原值,对应于 6~16 行.一轮过后,目的节点 d 的每个邻居节点都获得了使得效用最大的传输功率和重传次数,若源节点不在 Q 中,继续进入下一轮 while.若网络中节点的最大效用小于 0,则算法结束,说明在收益 v 下无法找到一条效用为正的路径.

算法 1. 基于扩展效用模型的跨层优化路由算法.

```

1 Initialize,  $Q \leftarrow \emptyset$ 
2 While  $s \notin Q$  do
3   Find node  $i$  with the largest  $u_i$  in  $V$ , delete it from  $V$ ;
4   Terminate if  $u_i \leq 0$ 
5    $Q \leftarrow Q \cup \{i\}$ 
6   for each power level  $m$ 
7     find the set of neighbor nodes of node  $i$ :  $N_i^m$ 
8     for each node  $j$  in  $N_i^m$ 
9       compute  $K^*$  according to Eqn(10)
10      if  $u_j < u_i P_{ij}^m - \bar{N}(K_{ij}^*) c_{ij}^m$ 
11         $u_j = u_i P_{ij}^m - \bar{N}(K_{ij}^*) c_{ij}^m$ 
12        power( $j$ )= $m$ 
13        maxRetry( $j$ )= $K_{ij}^*$ 
14      end if
15    end for
16  end for
17  end while

```

3.2 算法复杂度分析

在算法 1 中,步骤 3 的复杂度为 $O(n \log n)$,其中 n 是节点总数,内部 for 循环最多执行 e 次, e 是网络中的链路总数,而内部 if 语句的算法复杂度为 $O(\log n)$,所以内部 for 循环的复杂度为 $O(e \log n)$,外部 for 循环执行 m 次, m 为可用发射功率的等级总数,因此算法的复杂度为 $O(n \log n) + O(em \log n) = O((n+em) \log n)$.

4 性能评价

在本节中,我们对提出的基于效用的跨层优化路由选择策略进行了仿真验证,并与固定发射功率和固定重传次数的路由算法进行了比较.比较的性能指标包括期望效用值、成功传输单位数据包的能耗和端到端成功传输率.

4.1 参数设置

节点随机均匀部署在 $500\text{m} \times 500\text{m}$ 的方形区域,源节点和目的节点的坐标固定在 $(5\text{m}, 5\text{m})$ 和 $(495\text{m}, 495\text{m})$.在仿真中,节点的一次传输能耗为发送方和接收方的电流损耗值之和(考虑到即使数据包丢失,接收方仍然在监听信道,认为监听能耗与接收能耗相等),表 1 列出了仿真中采用的 TelosB 节点^[11]在 7 个不同发射功率发送和接收状态下的电流损耗.传输数据包的收益在不同的仿真中设置为 2 000 或 3 000.与链路收包率相关的参数设置如下: $p_{th}=0.1, R=19.2\text{kb/s}, B_N=30\text{kHz}, PL(d_0)=55\text{dBm}, \eta=2$ 和 $2.2, P_n=-95\text{dBm}, l=60\text{bytes}, l_a=5\text{bytes}, \varepsilon=1$.

Table 1 Current consumptions of TelosB mote under different transmission powers and receiving states

表 1 TelosB 节点不同发射功率和接收状态下的电流损耗值

	Output power (dBm)						Receive	
	0	-1	-3	-5	-7	-10		-15
Current consumption (mA)	17.4	16.5	15.2	13.9	12.5	11.2	9.9	18.8

对于每组参数,仿真设置的节点数从 200 变化到 400,步长为 50,在相同的节点数下随机产生 100 个拓扑,每个拓扑中源节点产生 1 000 个数据包,独立地运行各个算法,比较各个算法在 100 个随机拓扑下的期望效用,成

功传输单位数据包的能耗和端到端成功传输率的平均值。

4.2 仿真结果

在基于效用的路由框架下,我们将自适应优化发射功率的算法与固定发射功率的算法相比较,固定发射功率为 0dBm 和 -1dBm.为了排除最大重传次数对仿真结果的影响,将所有算法的最大重传次数都按照式(11)进行了优化.从图 1(a)可以发现,自适应优化发射功率后的期望效用相比固定发射功率更大,图 1(b)和图 1(c)分别显示了能耗和端到端成功收包率.可以看出,采用本文提出的算法自适应优化发射功率后,成功传输单位数据包的平均能耗比固定发射功率更低,而对于端到端成功收包率,其性能略小于采用最大发射功率时的性能,说明采用本文提出的算法自适应优化发射功率后,可在能耗和端到端可靠性的性能上获得较好的折衷.

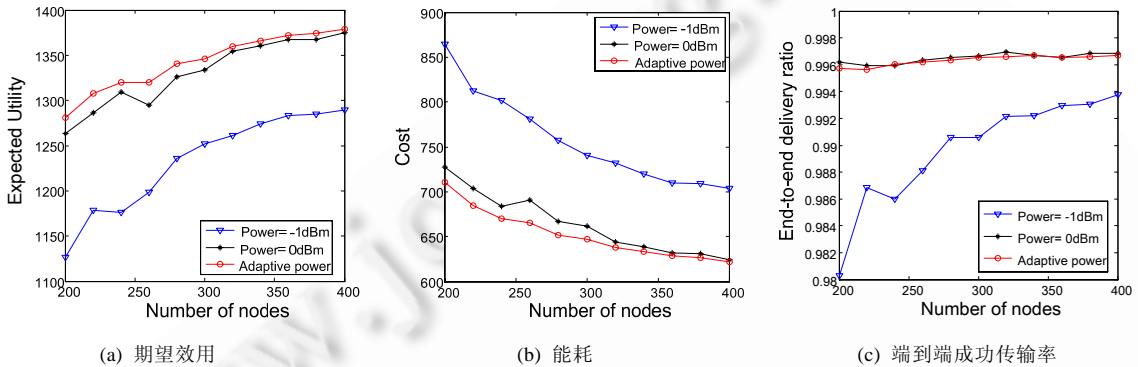


Fig.1 Performance comparison of the cross-layer-optimized algorithm and the fixed transmission power algorithm (with the retransmission count optimized), $v=2000$

图 1 跨层优化算法与固定发射功率算法的性能比较(重传次数已优化), $v=2000$

其次,为了验证不同重传次数对性能的影响,我们比较了自适应优化最大重传次数的性能与固定重传次数的性能,IEEE 802.15.4 标准规定的重传次数典型值为 3,最大不超过 7,因此我们在固定重传次数的算法中分别取了无重传(重传次数为 0),重传次数为 3 和重传次数为 7 的情况.为了排除不同发送功率表对仿真结果的影响,将所有算法的发射功率都按照算法 1 进行了优化.图 2 和图 3 选取了不同的功率衰减指数 η 值,反映了不同的链路质量.总的来说,不采用重传的方式性能最差,由于 $\eta=2.2$ 时无重传的方法性能与其他几种方法相差太大,故在图 3 中省略.当链路质量较好时($\eta=2$),最大重传次数为 3,7 与自适应优化重传次数的结果相差不大,如图 2 所示;但是当链路质量较差时($\eta=2.2$),采用自适应优化最大重传次数的算法性能明显优于固定重传次数的情况,如图 3 所示.值得一提的是,本文的理论推导部分都是基于期望值的,由于实际链路质量的不确定性,仿真结果会呈现一些波动和偏差.但总体上看,在效用模型下,优化发射功率和重传次数的路由能获得最大效用,且能在可靠性和能耗这两个性能指标间获得最佳权衡.

最后,我们比较了不同收益 v 对性能的影响.一般来说,收益较大的数据包传输优先级更高,会避免用较小的发射功率在不可靠的链路上传输.因此,直觉上收益较大的数据包更倾向牺牲一定的能耗,在更加可靠的链路上传输.而仿真结果也印证了这一假设.如图 4(a)所示,收益越大,数据包传输的期望效用越大;而当收益较大时,成功传输单位数据包的能耗增加,如图 4(b)所示,但是端到端可靠性更高,如图 4(c)所示.

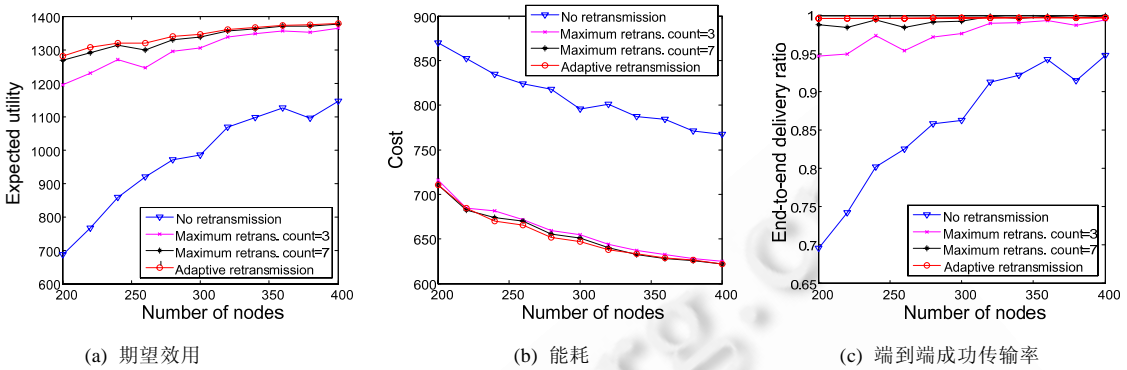


Fig.2 Performance comparison of the cross-layer-optimized algorithm and the fixed retransmission count algorithm (with the transmission power optimized), $\eta=2, v=2000$

图 2 跨层优化算法与固定重传次数算法的性能比较(发射功率已优化), $\eta=2, v=2000$

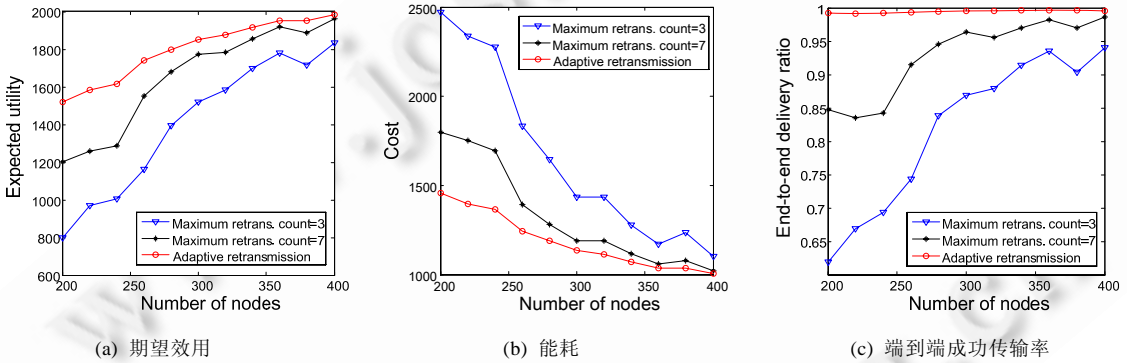


Fig.3 Performance comparison of the cross-layer-optimized algorithm and the fixed retransmission count algorithm (with the transmission power optimized), $\eta=2.2, v=2000$

图 3 跨层优化算法与固定重传次数算法的性能比较(发射功率已优化), $\eta=2.2, v=2000$

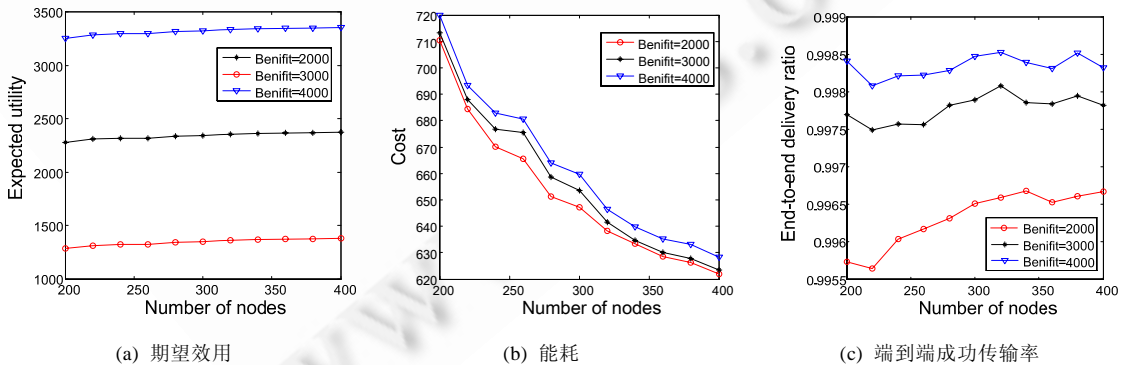


Fig.4 Performance comparison of the cross-layer-optimized algorithm under different transmission benefits, $\eta=2$

图 4 不同传输收益下跨层优化算法的性能比较, $\eta=2$

5 结论

本文在效用模型的框架下提出一种跨层优化路由策略,可以根据数据包的优先级要求,优化每跳发射功率和重传次数,找到兼顾可靠性和节能的最优路由策略.大量仿真结果验证了本文提出的跨层优化算法的性能优

于固定发射功率和固定重传次数情况下的性能.并且可以根据数据包的收益情况,找到对应效用最大的跨层优化方案,在数据包优先级,能耗和端到端可靠性等性能指标上获得更好的权衡.

References:

- [1] Lu M, Wu J. Social welfare-based routing in ad hoc networks. In: Proc. of the Int'l Conf. on Parallel Processing (ICPP). Washington: IEEE Computer Society, 2006. 211–218. [doi:10.1109/ICPP.2006.65]
- [2] Han GJ, Dong HY, Zhu C, Zhang N, Guo H, Chao J, Zhang YC. Cross-Layer-Optimization based adaptive routing method for wireless sensor networks. Patent No. 201210034979 (in Chinese).
- [3] Chen C, Zheng BY, Zhao XJ. A cooperative routing algorithm based on relay selection through cross-layer optimization strategy. Journal of Electronics and Information Technology, 2007,29(12):2981–2985 (in Chinese with English abstract).
- [4] Perkins CE, Bhagwat P. Highly dynamic destination-sequenced distance-vector routing (DSDV) for mobile computers. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 1994,24(4):234–244.
- [5] Zeng Y, Xiong N, Yang, LT, Zhang Y. Cross-Layer routing in wireless sensor networks for machine-to-machine intelligent hazard monitoring applications. In: Proc. of the IEEE Conf. on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS). Shanghai: IEEE Communications Society, 2011. 206–211. [doi: 10.1109/INFCOMW.2011.5928810]
- [6] Almalkawi IT, Zapata MG, Al-Karaki JN. A cross-layer-based clustered multipath routing with QoS-aware scheduling for wireless multimedia sensor networks. Int'l Journal of Distributed Sensor Networks, 2012, 11. [doi: 10.1155/2012/ 392515]
- [7] Wu J, Lu M, Li F. Utility-Based opportunistic routing in multi-hop wireless networks. In: Proc. of the 28th Int'l Conf. on Distributed Computing Systems (ICDCS). Washington: IEEE Communications Society, 2008. 470–477. [doi: 10.1109/ICDCS.2008.90]
- [8] Xiao M, Wu J, Huang L. Time-Sensitive utility-based routing in duty-cycle wireless sensor networks with unreliable links. In: Proc. of the IEEE 31st Symp. on Reliable Distributed Systems (SRDS). IEEE Computer Society, 2012. 311–320. [doi: 10.1109/SRDS.2012.75]
- [9] Xiao M, Wu J, Liu C, Huang L. TOUR: Time-Sensitive opportunistic utility-based routing in delay tolerant networks. In: Proc. of the 32nd IEEE Int'l Conf. on Computer Communications (INFOCOM). Turin: IEEE Communications Society, 2013. 1–9.
- [10] IEEE-SA Standards Board. IEEE Std. 802.15.4 Part 15.4: Wireless medium access (MAC) and physical layer (PHY) specifications for low-rate wireless personal area networks (WPANs). 2006.
- [11] TelosB datasheet. http://www.willow.co.uk/TelosB_Datasheet.pdf

附中中文参考文献:

- [2] 韩光洁,董玉慧,朱川,张娜,郭惠,巢佳,张晨语.基于跨层优化的自适应无线传感器网络路由方法.专利号:201210034979.
- [3] 陈超,郑宝玉,赵贤敬.一种利用跨层优化策略选择中继的协作路由算法.电子与信息学报,2007,29(12):2981–2985.



李燕君(1982—),女,江苏南通人,博士,副教授,主要研究领域为无线网络的协议与算法.

E-mail: yjli@zjut.edu.cn



雷艳静(1979—),女,博士,讲师,主要研究领域为无线传感器网络存储策略.

E-mail: leiyj@zjut.edu.cn



邵剑集(1991—),男,硕士生,主要研究领域为无线网络协议与算法仿真.

E-mail:shaojianji@126.com