

无线传感器网络能耗均衡路由模型及算法^{*}

赵彤⁺, 郭田德, 杨文国

(中国科学院 研究生院 数学科学学院, 北京 100049)

Energy Balancing Routing Model and Its Algorithm in Wireless Sensor Networks

ZHAO Tong⁺, GUO Tian-De, YANG Wen-Guo

(School of Mathematical Sciences, Graduate University, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

+ Corresponding author: E-mail: zhaotong@gucas.ac.cn, http://math.gucas.ac.cn

Zhao T, Guo TD, Yang WG. Energy balancing routing model and its algorithm in wireless sensor networks. Journal of Software, 2009,20(11):3023-3033. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3384.htm>

Abstract: An energy balancing routing model and its solution algorithm in wireless sensor networks are proposed in this paper, taking all the following factors into consideration: link access, packet transmission energy consumption and the remaining energy in the nodes. Its objective is to balance the energy consumption and maximize the network lifetime. Firstly, a distributed dynamic routing tree building algorithm and a routing selection function of two neighbor nodes are proposed with the cross-layer method, which satisfied the nodes' computing capabilities. Secondly, a bi-level programming model and its algorithm are presented to make the energy consumption of the network tend to equilibrium and maximize the network lifetime. A numerical example illustrates the validation of the proposed routing policy and the bi-level programming model.

Key words: wireless sensor network; energy balancing; routing policy; model and algorithm

摘要: 在综合考虑传感器网络中节点链路接入、数据包传输能耗及节点剩余能量的基础上,提出了一种自适应能耗均衡路由策略,并给出了相应的数学最优化模型及求解算法.优化的目标是均衡网络能耗,进而最大化网络寿命.首先采用跨层分析的方法设计了符合传感器节点计算能力的分布式动态路由树生成算法及各节点的路由选择策略函数;然后通过构造一个双层规划模型使传感器网络的整体能耗趋向均衡,尽可能地延长网络寿命.一个数值例子说明,提出的路由选择策略、双层规划模型及求解算法是可行且有效的.

关键词: 无线传感器网络;能耗均衡;路由策略;模型与算法

中图法分类号: TP393 文献标识码: A

无线传感器网络综合了传感器技术、嵌入式计算技术、现代网络及无线通信技术、分布式信息处理技术等,能够通过各类集成化的微型传感器协作地实时监测、感知和采集各种环境或监测对象的信息.传感器网络具有十分广阔的应用前景,在军事国防、工农业、城市管理、生物医疗、环境监测、抢险救灾、反恐反恐、危

* Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant No.10831006 (国家自然科学基金); the Innovation Program of the Chinese Academy of Sciences under Grant No.kjcx-yw-s7 (中国科学院创新团队项目); the Dean Foundation of the Graduate University of the Chinese Academy of Sciences under Grant No.O85101BM03 (中国科学院研究生院院长基金)

Received 2008-01-14; Accepted 2008-04-21

险区域远程控制等许多重要领域都有潜在的实用价值,已经引起了许多国家学术界和工业界的高度重视,被认为是对 21 世纪产生巨大影响力的技术之一^[1-4].

迄今为止,无线传感器网络的研究大致经历了两个阶段:第 1 阶段主要偏重设计小型化的节点设备;第 2 阶段(现阶段)主要关注网络本身问题的研究.由于传感器节点通常运行在人类无法接近的恶劣甚至危险的远程环境中,一般由电池驱动且能源无法更换,因此能耗是无线传感器网络的首要问题.一直以来,国际上有很多专家学者将能耗作为研究的重点^[4-6],提出了一些基于能耗的网络拓扑设计^[6]、基于能耗的 MAC 层协议设计^[7-9]以及基于能耗的路由协议设计^[10,11]等.

虽然上述工作符合通信网络的分层特点,但是各协议层的局部分析往往难以使传输网络的整体能耗达到均衡,进而延长网络寿命.有些基于能耗的路由协议^[12,13]试图让那些拥有更多电能的节点承担更多的路由任务,但传感器网络中单个节点有限的计算及存储能力很难使节点的路由策略具有全局知识.因此,不合理的路由选择策略反而会导致传输跳数过多,通信过程中某些关键节点消耗了太多的能量,不利于网络整体能耗的均衡^[14,15].文献[14]建议采用分层的、更加系统化的数学方法对网络进行结构分析.文献[15]从数学建模角度分析了传感器网络能耗,构造了不同的网络寿命模型.此外,延长网络寿命、均衡能耗单靠路由层协议是不能完全解决的,在路由过程中还需要参考数据链路层能耗及物理层电池电压等信息^[16-18].文献[16,17]利用网络层、数据链路层信息对网络能耗及传输数据之间进行权衡,给出了最佳的分配方案.文献[18]提出了基于通道传输质量、节点剩余能量的网络能耗平衡算法.该算法的优势在于算法简单,易于程序实现;缺点在于该算法的调节能力非常有限.本文借鉴了该分布式算法易于程序实现的特点,构造了全新的经过归一化处理的路由选择函数,并给出了定量的能耗分析数学模型(下层规划模型)以及具有全局调整能力的路由权重调整模型(上层规划模型).

本文在考虑路由策略时,将数据链路层的链路接入和传输能耗、物理层的电池电压(从节点剩余能量角度考虑)两方面因素作为路由选择的主要参考指标,同时还将路由跳数引入路由选择函数中,用于适当控制网络时延.针对无线传感器网络自身的自组织、自适应性以及各节点计算、存储以及通信能力较弱的情况,我们引入了动态规划的思想,设计了符合节点计算能力的动态路由树生成算法,形成分布式节点路由.由于分布式路由策略无法确保网络全局能耗均衡,与文献[12,13,15-18]等做法不同,我们首先构造了该策略的数学分析模型,模拟网络的数据流,得到此时各节点的能耗情况;其次,再由计算能力较强的 Sink 节点依据全网各节点的能耗情况,最优调整整个网络各个节点的路由选择行为.Sink 节点可根据各链路接入和传输能耗、节点剩余能量以及路由跳数等信息,周期性地配置各节点的路由选择函数,使整个网络的能耗趋向平衡并使网络寿命最大化.为此,本文为 Sink 节点进行最优网络能耗均衡设计了一个双层规划模型及其求解算法,用于计算出本周期内各节点路由调整的最优策略.

本文第 1 节讨论节点能耗均衡路由策略:首先,分析 CSMA 传输机制下相邻两节点的链路接入能量和传输能量,提出一个基于 CSMA 传输机制的能耗估计概率模型;其次,给出路由树建立算法,并构造节点的路由选择函数.第 2 节讨论 Sink 节点周期性地配置各节点的路由选择函数,并构造一个双层规划模型:下层模型模拟网络各节点在给定路由策略下的路由选择行为;上层模型则在下层模型已预测出流量分布的情况下最优调整各节点的路由策略函数权重,迫使下层模型中部分节点改变自己的路由行为,使网络各节点的能耗趋向均衡,网络寿命尽可能地延长.第 3 节给出一个网络算例,说明本文提出的能耗平衡策略是可行并且有效的.第 4 节给出结论及进一步的工作.

本文假定:(1) 传感器网络所采用的基于 CSMA 传输机制的 MAC 协议;(2) 网络中的各节点在部署后静止不移动,具有相同的初始能量;(3) 传感器网络应用于周期性地感知被检测物体的某项指标(如每隔 1 分钟检测 1 次给定位置的化学试剂温度等).

1 网络能耗均衡路由策略

1.1 基于概率期望的物理层、数据链路层能耗分析

当节点传输 1bit 数据时,传输能量可定义为 $E_{tx} = E_{ele} + E_{amp}$ ^[19].其中, E_{ele} 为非发射设备(频率合成器、混频器、

滤波器)所消耗的能量; E_{amp} 为发射设备所消耗的能量,其大小为 $E_{amp} = \frac{\beta R^\gamma}{\eta_{amp}}$ [19].其中, β 是与硬件相关的常数, R 为节点传输半径, γ 是路径衰减因子, η_{amp} 为发射器的放大率.因此,当网络中数据包长度为 L 时,节点单跳传输所消耗的能量可以如下表示:

$$E_{1hop} = L(E_{tx} + E_{rx}) = L \left(E_{ele} + \frac{\beta R^\gamma}{\eta_{amp}} + E_{rx} \right) \quad (1)$$

其中, E_{rx} 为节点接收单位比特消耗的能量.

基于CSMA机制传输数据所消耗的能量每次并不确定,它与此时网络中触发的事件数以及竞争传输节点的个数有关.据此,本文用数据包成功传输的期望能量 E_{CSMA} 来衡量数据包传输所消耗的能量.

本文假定在 CSMA 机制下,传感器节点共有 4 个状态:(1) 空闲状态 I ;(2) 活跃状态 A (载波、传输侦测);(3) 传输状态 T ;(4) 退避状态 B .

当节点在时隙 $1 \sim NAV$ (预先定义的值)之间等概率地随机选择一个时隙时,则节点选择时隙 r 的概率为 $P(r)=1/NAV$.根据 CSMA 传输机制,在有 N 个相邻节点同时竞争信道时,节点在时隙 r 成功传输数据的概率为

$$P_{success}(r) = C_N^1 P(r) \left[1 - \sum_{i=1}^r P(i) \right]^{N-1} \quad (2)$$

其中, C_N^1 表示从 N 个节点中任选一个, $P(r)$ 表示选中的节点在第 r 个时隙进行传输的概率, $\left[1 - \sum_{i=1}^r P(i) \right]^{N-1}$ 表示其余 $N-1$ 个节点只能选中 r 之后的时隙(确保前面被选中的节点抢占到信道,并进行传输).与此相对应,节点选择了时隙 r 却需要退避的概率为 $P_{busy}(r)=1-P_{success}(r)$.由此,节点选择不同时隙均可成功传输的概率 $P_{success}$ 和需要退避的概率 P_{busy} 分别为

$$P_{success} = \sum_{r=1}^{NAV} P_{success}(r), \quad P_{busy} = 1 - P_{success} \quad (3)$$

假定节点尝试了 k 次数据传输且最后一次传输成功,则其概率为 $P(X=k) = P_{success} P_{busy}^{k-1}$.由该式可知,本次传输过程中总的传输次数的期望值为 $1/P_{success}$.因此,消耗总能量的期望值为

$$E_{CSMA} = E_{1hop} + (1/P_{success} - 1)E_{busy} \quad (4)$$

其中, E_{busy} 为节点转入退避状态所消耗的能量.

1.2 路由树建立算法及基于跨层分析的路由选择函数

传感器网络通常可以描述为连通图 $G(V,A)$,其中,传感器节点集合 $V=R \cup S \cup T$, R 是数据源传感器节点集合, S 为Sink节点集合, T 为数据传输中继节点集合(这种分配方法仅表示节点在有数据进行传输时的功能划分;在无线传感器网络中,除Sink节点外的其他节点均有可能成为数据采集节点或中继节点).

由于传感器网络具有自组织、自适应的特点,很难预先知道各节点的准确位置及其剩余能量.此外,传感器节点的低处理速度、有限存储空间、有限能量供应、有限通信带宽等特点,也使传感器网络的路由算法不能采用复杂的静态的中央调度算法.因此,周期性地建立路由树及维护路由树会更适合上述传感器网络的特点.下面将建立扩散的分层路由,让每层传感器节点借助路由选择函数确定其最优的下一跳节点.为了确保从数据源节点 r 到Sink节点 s 之间的路径是最优路径,本文以泛洪(flooding)广播方式作为路由树的生成方式并将动态规划的思想引入到了路由树的建立过程中,确保各节点均可找到到Sink节点的最小“费用”路径.传感器路由树的建立过程中可以描述如下:

(1) Sink节点用泛洪方式确定第 i 个节点到Sink节点的深度 D_i (Sink节点的深度定义为0,距离Sink节点1跳的节点深度为1,距离Sink节点2跳的节点深度为2,其他深度的节点依此类推).

(2) 从深度为0的Sink节点开始,各节点(如 i 节点,设其深度为 D)逐次向其相邻的深度为 $D+1$ 的节点通报数据包传输到Sink节点的最优路由“费用”估计 P_i 和该节点的电压值 V_i .

其中, P_i 表示 i 节点到达 Sink 节点的最小“费用”路由的总费用, 值为该路径上各跳传输“费用”之和. 而每跳传输的“费用”由节点路由选择函数计算得出(假定 $P_{Sink}=0$). 对于第 i 个节点, $P_i = \min(P_j + P_{ij}, P_k + P_{ik}, \dots)$. V_i 表示 i 节点的电压值(由于 Sink 节点有与其他传感器节点不同的电能储备, 假定 Sink 节点的电压值为允许的最大电压值 V_{MAX}).

(3) 第 i 个节点收到上一深度级相邻节点 j, k 传送的节点信息后, 为每个相邻节点建立路由信息表(见表 1).

Table 1 Routing selection information table for node i

表 1 i 节点的路由选择信息表

Reach node	Link energy consumption estimation	Link bottleneck voltage	Routing selection function
j	E_{ij}^{CSMA}	$\min(V_j, V_i)$	P_{ij}
k	E_{ik}^{CSMA}	$\min(V_k, V_i)$	P_{ik}
...

表 1 中, E_{ij}^{CSMA} 表示 i 节点向相邻的 j 节点传输一个数据包所估计消耗的能量(由公式(4)确定); V_i 表示 i 节点的电池电压, 且 $P_{ij} = W_1^{ij} \frac{D_i}{D_{MAX}} + W_2^{ij} \frac{V_{MAX} - \min(V_j, V_i)}{V_{MAX}} + W_3^{ij} \frac{E_{ij}^{CSMA}}{E_{MAX}}$ 为归一化处理的、综合路段能耗、链路瓶颈电压以及传输能耗的广义“费用”. $W_1^{ij}, W_2^{ij}, W_3^{ij}$ 为链路 $i-j$ 上对应项指标的权重, 且要求 $W_1^{ij} + W_2^{ij} + W_3^{ij} = 1$, 并由 Sink 节点配置; E_{MAX} 为各节点传输能耗的最大值; D_{MAX} 为传感器网络的总深度. 上述信息在 Sink 节点得到传感器网络全局拓扑后, 告知所有节点.

至此, 最小“费用”路由由树建立完成. Sink 节点在首次建立路由树时可统一初始化各节点的权重 $W_1^{ij}, W_2^{ij}, W_3^{ij}$ 为 1/3. 在每个相对较短的周期内(如 2 秒), 各传感器节点生成数据包后, 将按照最小“费用”路由方式将数据包传输到 Sink 节点. 而 Sink 节点在该周期结束后重新生成路由树并再次接收各点数据.

2 路由调整策略

在完成若干个短周期的数据传输后, 各节点的能耗情况一般会出现较大的差异. 对于远离 Sink 节点的中继节点, 数据传输的任务较轻, 其能耗也较小; 离 Sink 节点较近的节点, 数据中转的任务较重, 能耗往往是巨大的. 此外, 由于各数据源的分布位置不同, 每层传感器节点中, 不同方位上的节点能耗也有较大差异. 而节点路由选择函数仅能依据节点自身及相邻节点的能耗信息调节路由, 没有整个网络的能耗全局知识. 在路由选择函数中采用相同的权重系数, 显然不利于整个网络中各节点的能耗均衡. 本文设计了由 Sink 节点周期性地调整各节点路由选择函数中权重系数的策略, 通过构造一个双层规划模型来得到各节点的最优调整策略. 其中, 下层模型描述了若干个短周期内, 数据源节点按照路由选择函数确定的路径向 Sink 节点进行数据传输的过程, 从而可以计算出各链路的数据传输量、节点能量消耗及节点剩余电能. 上层规划模型得到下层模型提供的上述信息后, 作出各链路的最优的权重调整方案. 虽然下层模型的优化目标是使整个网络的传输“费用”最小(按照路由选择函数进行传输), 而上层模型的优化目标是使网络整体能耗均衡, 两者的优化目标并不一致. 上层模型可以通过修改节点路由选择权重改变下层模型的路由行为, 而下层模型的路由行为对上层模型进行最优决策也会产生一些影响. 当上层和下层模型多次迭代选择各自的妥协方案时, 就可以得到整个传感器网络的能耗均衡最优方案.

2.1 下层规划模型及其求解算法

为了定量描述路由由树建立后的路由选择机制, 可以对该路由问题建立相应的最优化模型(L)并进行分析. 该模型为双层规划模型的下层模型.

定义数据传输过程中链路 a (1 跳)的“费用”函数为 $t_a(x) = xP_a, \forall a \in A$. A 为所有链路的集合. 假定 Sink 节点在一个较长周期后(如 2 小时)进行一次节点路由选择策略函数的权重调整, 则 x 表示从上次 Sink 节点调整路由选择函数权重后到本次调整路由权重时所有路径(路由)经由该链路 a (1 跳)传递的数据包总量, 其中, P_a 为链路 a

的路由选择函数值.从起点 r 到Sink节点 s 之间若干可选的路径(路由)集合 K_{rs} 中,经过路径 k 传输的总“费用” t_{rs}^k 可以如下表示:

$$t_{rs}^k = \sum_{a \in k} x P_a, \quad k \in K_{rs} \quad (5)$$

Sink 节点在调整节点路由策略的每个周期内会进行若干次路由重建,每次重建间隔期内,各节点总是根据路由选择函数将数据包发送到路由“费用”最少的路径上(类似最小费用路由).将这些小的时间片段连续起来观察就会发现,随着各节点电能的下降,当路由树各链路的“费用”更新后,后继数据包有可能会回避该路径,而选择那些电能整体下降较小的路径进行传输.最终在 Sink 节点周期性地调整路由函数权重的时间间隔内,可认为数据流会根据路由选择机制近似均匀地分配到不同的路径上,导致网络中所有可以选择路径上的能耗趋于相同(达到一种均衡,此时要求 Sink 节点调整权重的周期远远大于路由树的重建周期).

为了在下层优化模型(L)中体现网络传输总“费用”最小,即按照路由树中各节点的路由选择函数进行传输的路由策略,可以构造目标函数 $\min_x F = \sum_{a \in A} \int_0^{x_a} t_a(x) dx$. 目标函数本身做了必要的数学等价变换,目的是确保模型(L)的一阶必要条件满足公式(5)所提出的路径选择方式,并在路由选择上优先选择“费用”最小的路由.

传感器网络传输总“费用”最小的最优化模型可以描述如下:

$$(L) \quad \min_x F = \sum_{a \in A} \int_0^{x_a} t_a(x) dx \quad (6)$$

$$\text{st.} \quad \sum_k f_k^{rs} = q_{rs}, \quad \forall r \in R, s \in S \quad (7)$$

$$f_k^{rs} \geq 0, \quad \forall r \in R, s \in S, k \in K_{rs} \quad (8)$$

$$x_a = \sum_r \sum_s \sum_k f_k^{rs} \delta_{a,k}^{rs}, \quad \forall a \in A \quad (9)$$

$$x_a \geq 0, \quad \forall a \in A \quad (10)$$

其中,约束条件(7)为流量守恒条件,要求数据采集节点到Sink节点的所有数据流量等于传输过程中各个路径的流量之和. k 为所对应的某条路径. q_{rs} 是数据源起点 r 到Sink节点 s 的数据量,当传感器网络中数据源节点或Sink节点有多个时, $q=(\dots, q_{rs}, \dots)$.由于传感器网络周期性地从给定的数据源采集数据,因此可以预测出在Sink节点调整路由由函数权重周期内的总数据流量.公式(8)为数据流非负约束, f_k^{rs} 是数据源起点 r 到Sink节点 s 在路径 k 上的流量.公式(9)为路径流量与弧流量的转化关系. $\delta_{a,k}^{rs}$ 表示如果弧 a 在连接 $r-s$ 的路径 k 上,则其值为1;否则为0.模型(L)中描述的路由分配策略确保每次找到的路径都符合最小“费用”路由的特点.因此,该路由方式符合无线传感器网络的自组织、无集中路由调度的特点.一般而言,网络采用自组织路径选择策略所消耗的能量会略大于或等于集中调度路由策略所消耗的能量^[20].

可以证明,模型(L)的一阶必要条件满足本文提出的路由选择方式.模型(L)的Lagrange函数可以表示为

$$L(f, \mu) = F[x(f)] + \sum_k \mu_{rs} \left(q_{rs} - \sum_k f_k^{rs} \right),$$

其中, μ_{rs} 是公式(7)的对偶变量(Lagrange乘子),则目标函数的一阶必要条件为

$$f_k^{rs} \frac{\partial L(f, \mu)}{\partial f_k^{rs}} = \frac{\partial F[x(f)]}{\partial f_k^{rs}} + \frac{\partial}{\partial f_k^{rs}} \sum_{rs} \mu_{rs} \left(q_{rs} - \sum_k f_k^{rs} \right) \quad (11)$$

右式第1项为

$$\frac{\partial F[x(f)]}{\partial f_k^{rs}} = \sum_{b \in A} \frac{\partial F(x)}{\partial x_b} \frac{\partial x_b}{\partial f_k^{rs}} = \frac{\partial}{\partial x_b} \int_0^{x_a} t_a(x) dx \cdot \delta_{b,k}^{rs} = t_k^{rs}.$$

右式第2项为

$$\frac{\partial}{\partial f_k^{rs}} \sum_{rs} \mu_{rs} \left(q_{rs} - \sum_k f_k^{rs} \right) = -\mu_{rs}.$$

目标函数的一阶必要条件可以化简为如下形式:

$$\begin{cases} f_k^{rs}(t_k^{rs} - \mu_{rs}) = 0 \\ t_k^{rs} - \mu_{rs} \geq 0 \end{cases} \quad (12)$$

如果路径 k 上没有数据流通过($f_k^{rs} = 0$),则等式(12)自然满足;如果有流量通过路径 k ($f_k^{rs} > 0$),则右侧的 $t_k^{rs} - \mu_{rs}$ 必须为0才能满足该互补松弛条件.在传感器网络中, t_k^{rs} 与 μ_{rs} 可看成是具有相同量纲的两个指标,且由目标函数的一阶必要条件的性质, μ_{rs} 可被认为是以起点 r 、终点 s 的路径集中最小“费用”路径的总费用,即数据流总是尽可能地分配到那些拥有最小“费用”的路径上($t_k^{rs} - \mu_{rs} = 0, f_k^{rs} > 0$).从网络整体能耗的角度来看,当某条最小“费用”路径因为传输数据而导致“费用”上升时,随后新到的数据流会被重新分配到该时刻的最小“费用”路径上,最终导致整个网络的整体能耗趋向均衡.

在模型(L)中,目标函数的表示形式较为复杂,且在无线传感器网络中,数据传输路由路径可以通过记录路由树的生成路径得到.但是在优化模型中,直接按路径约束条件求解模型是非常困难的.针对此类路径难以确定的问题,Beckmann^[20]提出采用Frank-Wolf^[21]方法将一般网络流问题中难以计算的路径流量转换成为相对容易计算的弧流量,带入到模型中,并用较为简单的“全有全无(all-or-nothing)”方法^[20]进行求解.本文也将该方法引入到求解算法中,并针对所提出的模型(L)构造如下的求解算法:

- Step 1. 初始化.采集各节点的电池电压,并令 $t_a^0(x_a) = t_a(0), \forall a \in A$,用“全有全无”法将所有数据流全部分配到“费用”最小的路径上,得到每条链路(每一跳)的流量 $\{x_a\}$,记迭代次数为 $n=1$.
- Step 2. 计算.令 $t_a^n = t_a(x_a^n), \forall a \in A$.
- Step 3. 寻找算法本次迭代的可行方向.依据 $\{x_a\}$,用“全有全无”法将所有数据流加载到“费用”最小的路径上,并记为 $\{y_a\}$.
- Step 4. 寻找算法本次迭代的最优步长.求解一维最小化问题:

$$\min \sum_{a \in A} \int_0^{x_a^n + \alpha(y_a^n - x_a^n)} t_a(w) dw, \\ \text{s.t. } 0 \leq \alpha \leq 1,$$

令求解结果为 α^n .

- Step 5. 更新数据流.令 $x_a^{n+1} = x_a^n + \alpha^n(y_a^n - x_a^n), \forall a \in A$.

- Step 6. 终止条件.检查 $|x_a^{n+1} - x_a^n| \leq \varepsilon, a \in A$.如果满足终止条件,则停止;否则,令 $n=n+1$,转入 Step 2.其中, ε 为迭代精度.

2.2 上层规划模型及其求解算法

求解优化模型(L)后可得到传感器网络中每对相邻节点之间传输的数据总量,进而估算出各节点总的数据传输量及其能耗.为了描述 Sink 节点经过相对较长周期后可以最优调整各节点的路由选择行为,本文设计了上层规划模型(U):

$$(P)(U) \quad \max_{W_1, W_2, W_3} Z = \sum_{a \in A} W_1^a + \sum_{a \in A} W_2^a + \sum_{a \in A} (1 - W_3^a) \quad (13)$$

$$\text{s.t. } W_1^a + W_2^a + W_3^a = 1, \forall a \in A \quad (14)$$

$$W_1^a \geq 0.1, \forall a \in A \quad (15)$$

$$W_2^a \geq \sum_{a \in A} \left(\frac{2}{3V_{\text{MAX}}} [V_{\text{MAX}} - \min(V_j', V_i')] + \frac{1}{3} \right), \forall a \in A \quad (16)$$

$$W_3^a \leq \sum_{a \in A} \left(\frac{2}{3E_{\text{MAX}}} (E_{\text{MAX}} - E_a^{\text{CSMA}}) + \frac{1}{3} \right), \forall a \in A \quad (17)$$

其中, a 对应节点 i, j 之间的链路.公式(14)要求所有权重之和为1.公式(15)要求在权重调整的方案中必须在一定程度上考虑到传输时延.公式(16)、公式(17)通过权重的不等式要求,希望尽可能大地增加节点剩余能量的权重

并对距离 Sink 节点较近、消耗更多能量的中继传输的节点适当增加其权重. $V_i' = V_i - \sum_{a \in B} v(x_a) E_a^{CSMA}$ 为按下层模型(L)路由方案传输完数据后,节点*i*此刻的电压.*B*为*i*节点与上一层节点所构成的链路集合. $v(x_a)$ 是将数据流量转化成为链路消耗电能并输出电压降的模拟函数(本文假定其为线性函数).模型(U)的目标函数要求对传输能耗、电池电压及路由跳数 3 个指标进行权值分配.显然,在当前策略下,电能剩余不多的节点会使权重系数 W_2^a 明显上升,导致下层模型(L)中数据包经由该节点的数据转发明显减少.由于上层规划模型(U)为典型的线性规划模型,采用常用的最优化方法就可以求解,因此本文不再列出模型(U)的求解算法.

在传感器网络中,当Sink节点需要调整各节点的路由策略时,它需要事先收集各节点此刻的传输能耗估计、电池电压.由于本文所述传感器网络应用于周期性地采集某些数据源的数据信息,因此每周期内的数据采集方式及数量大致相同,Sink节点可以使用上一周期的数据源位置及传输数据量作为本周期内预计的数据源和数据量.Sink节点通过下层模型模拟出本周期的各链路传输数据量,通过 $v(x_a)$ 转化函数将数据流量转化成为电压降后带入上层模型,以确定各链路更加合适的路由选择策略.通过上层模型与下层模型的反复迭代,可以得到一个优化过的能耗均衡路由策略.

在本文提出的能耗均衡路由策略中,Sink 节点的计算量较大,计算量主要体现在上、下两个优化模型的求解上.由于上层模型(U)可化为典型的线性规划模型,可以采用目前较成熟的线性规划模型求解算法,其计算复杂度也等同于该类算法的计算复杂度.下层规划模型(L)虽然是一个非线性优化模型,但通过 Beckmann 提出的基于 Frank-Wolf 算法的方法,可将下层模型转化成为一个“广义费用”的最短路问题,并利用目前现有的最短路算法进行求解.

至此,我们已经构造了一个双层规划模型来描述传感器网络在本文提出的路由调整策略下进行自适应能耗均衡的方式.可以针对双层规划问题(P)构造启发式求解算法.具体计算步骤如下:

- Step 1. 沿用各链路中上一个周期的权重 W_1^a, W_2^a, W_3^a 作为初始解,计为 $W_1^{a0}, W_2^{a0}, W_3^{a0}$ (对于无上一个周期的情况, W_1^a, W_2^a, W_3^a 为 1/3). 令迭代次数 $k=0$.
- Step 2. 对于第 k 次迭代,用给定的权重 $W_1^{ak}, W_2^{ak}, W_3^{ak}$ 求解下层问题(L),得到各链路上分配的流量 x_a^k .
- Step 3. 通过公式 $V_i' = V_i - \sum_{a \in B} v(x_a^k)$ 给出各节点传输数据后的电压值,用 $V_a' = \min(V_i', V_j')$ 公式计算链路上电压的最小值,并带入上层规划模型(U)计算出各链路的最优权重: $W_1^{ak+1}, W_2^{ak+1}, W_3^{ak+1}$.
- Step 4. 如果 $\sum_{a \in A} [(W_1^{ak+1} - W_1^{ak})^2 + (W_2^{ak+1} - W_2^{ak})^2 + (W_3^{ak+1} - W_3^{ak})^2] \leq \epsilon$, 则停止;否则,令 $k=k+1$,转第 2 步.其中, ϵ 为迭代精度.

3 数值分析

为了分析和验证前面提出的双层规划模型,本节用一个小网络的算例进行数值分析.网络如图 1 所示,其中,数据采集节点为 *K* 节点,Sink 节点为 *I* 节点,其他节点为中继节点.表 2 中给出了数值实验所需的各种参数^[2,19,22].

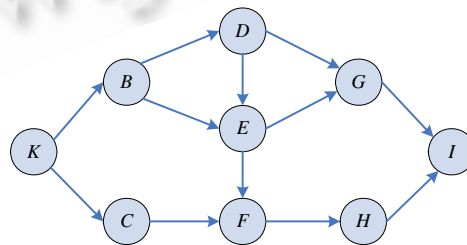


Fig.1 Sample network

图 1 算例网络

Table 2 Parameters used in the numerical example

表 2 数值算例所需的各种参数

Parameter	Value	Parameter	Value
E_{ele}	3.63μJ/bit	α	16bit
E_{rx}	11.13μJ/bit	ρ	16bit
η_{amp}	0.2	β	$10^{-1.882}$
γ	2	n	6400bit
l	34byte	p	3×10^{-4}
R	20m	NAV	10
E_{busy}	$0.5E_{success}$	N	20
V_{MAX}	10	E_{MAX}	$1.2609 \times 10^4 \mu J/bit$
D_{MAX}	4	Dynamic tree building cycle	20s
Periodic change weights of routing by Sink	2 hour		

由公式(4),节点K-I的传输成功的概率 $P_{success}$ 及单位数据包每一跳能量 E_{CSMA} 见表 3,单位:μJ/bit.

Table 3 Probabilities of successful transmission in the sensor nodes

表 3 各节点传输成功的概率

Node K	Node B	Node C	Node D	Node E
0.80, 1.1071×10^4	0.72, 1.1755×10^4	0.80, 1.1071×10^4	0.72, 1.1755×10^4	0.64, 1.2609×10^4
Node F	Node G	Node H	Node I	...
0.72, 1.1755×10^4	0.72, 1.1755×10^4	0.80, 1.1071×10^4

对于如图 1 所示的传感器网络,在传感器网络首次进行数据传输长周期内,当有 8×10^3 个数据包由数据采集节点K传输到Sink节点I时,求解模型(L)可以得到的单跳传输数据量见表 4.

Table 4 Flow distribution of all the links in the network

表 4 网络各链路流量分布

Arc name	K-B	B-E	E-F	F-H	K-C	C-F	D-G	G-I	B-D	D-E	E-G	H-I
Packets	4 625	1 987	0	3 375	3 375	3 375	1 318	4 625	2 638	1 320	1 987	3 375

当上层、下层模型经过若干次迭代后,上层模型最终为下层模型确定了最优的能耗均衡传输方案,并设定了节点路由选择函数传输权重,见表 5.

Table 5 Re-Setting weight coefficients for routing selection function

表 5 重新设定的路由选择函数权重系数

Arc name	W_1^a	W_2^a	W_3^a	Arc name	W_1^a	W_2^a	W_3^a
K-B	0.100 00	0.628 56	0.271 44	K-C	0.100 00	0.628 56	0.271 44
B-E	0.100 00	0.514 56	0.385 44	C-F	0.100 00	0.465 58	0.434 42
E-F	0.100 00	0.465 58	0.434 42	D-G	0.100 00	0.514 56	0.385 44
F-H	0.100 00	0.465 58	0.434 42	G-I	0.100 00	0.514 56	0.385 44
B-D	0.100 00	0.514 56	0.385 44	E-G	0.100 00	0.514 56	0.385 44
D-E	0.100 00	0.436 70	0.463 30	H-I	0.100 00	0.457 88	0.442 12

为了进一步说明本文提出的基于双层规划模型的能耗均衡路由策略是可行并且有效的,本文设计了在传输相同数据包情况下的能耗均衡差异性比较方法,并对第 1 层节点(G,H)以及第 2 层节点(D,E,F)进行了能耗均衡差异性比较(如图 2 所示).

$$VAR = \sum_{a \in C} (E_a - E_{\min}) - \sum_{b \in C} (E_b - E_{\min}) \tag{18}$$

公式(18)等号右边分为左、右两个部分:左侧项描述了对比算法(最小能耗路由策略、下层模型(L)路由策略)的能耗均衡程度, $\sum_{a \in C} (E_a - E_{\min})$ 的计算结果越大,表明能耗的不均衡性越强;右侧的 $\sum_{b \in C} (E_b - E_{\min})$ 则为双层规划模型(P)的能耗均衡程度,且左、右两部分结构相同.在 $\sum_{a \in C} (E_a - E_{\min})$ 结构中,集合 C 为进行比较的某一层节点的集合,如第 1 层节点的集合为(G,H), E_a 为该层任一节点此刻的能耗, E_{\min} 则为该层节点集合内的能耗最小节点的能耗值.

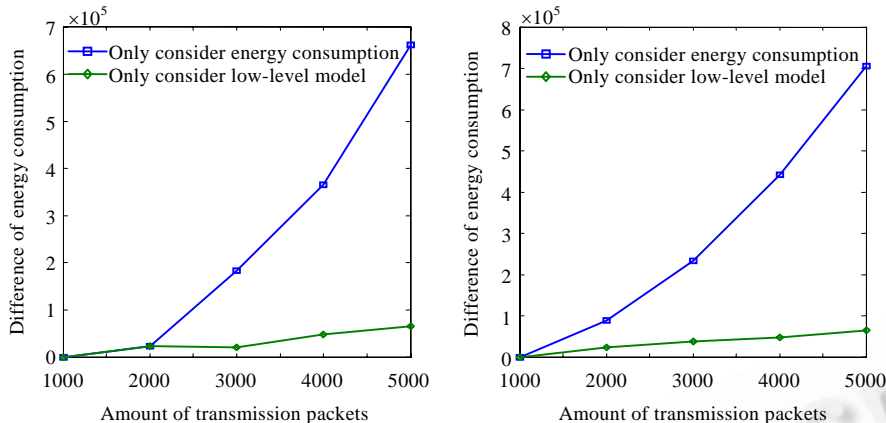


Fig.2 Differences in energy balance among minimum energy transmission strategy, low level transmission model (L) and the bi-level programming model (P)

图2 最小能耗传输策略、下层模型(L)及双层规划模型(P)的能耗均衡差异性

由图2可知,当采用最小能耗方式进行数据传输时,由于没有能耗均衡调节能力,各层节点能耗极不平衡,容易造成某些关键节点能耗过大,缩短网络寿命(曲线迅速上升)。而当仅采用本文提出的下层规划模型(L)进行数据传输时,该算法虽然可以改善各层节点的能耗不均衡性,但由于其路由选择函数的调节能力有限,亦有进一步均衡能耗的可能。本文所提出的基于双层规划方法(节点自身调节与 sink 节点全局调节结合在一起)的能耗均衡路由策略相对而言具有更佳的能耗均衡特性,网络寿命得到了进一步延长。

4 结 论

在综合考虑节点链路接入及传输能耗、节点剩余能量的基础上,本文提出了一种传感器网络自适应能耗均衡路由策略模型及求解算法,用以最大化网络寿命。通过构造一个双层规划模型,使 Sink 节点可以周期性地最优调整各节点路由策略并给出其求解算法。双层规划模型中的下层模型模拟了网络中各节点在给定路由策略下的路由选择行为;上层模型则在下层模型的基础上最优调整各节点的路由选择函数权重,并迫使下层模型中部分节点改变自己的路由行为,使传感器网络的整体能耗趋向均衡,尽可能地延长网络寿命。通过一个简单的数值例子说明提出的路由选择策略、双层规划模型及求解算法是可行并且有效的。

在进一步的研究工作中,还有很多工作需要更细致的分析:(1) 包括本文在内的很多文献均假定电池电压降是线性的,但是在实际问题中,当电池电能快耗尽时,电池电压的下降仅为一个近似线性的曲线。(2) 本文构造的模拟网络传输的理论模型仅考虑了最主要的能耗,且对于链路接入能耗的分析是基于概率模型,并用能耗的期望值作为计算依据的,可能与实际有一定的误差。在后继工作中,我们将建立一个能耗校正机制,确保 Sink 节点进行的能耗判断更加准确。(3) Sink 节点的计算量随着网络规模的增大而迅速增加。在今后的工作中,我们将构造一些有效、简化的次优可行模型来代替相对复杂的全局最优模型。

致谢 在此,我们对匿名审稿人提出的意见及建议深表感谢!

References:

- [1] Ren FY, Huang HN, Lin C. Wireless sensor network. Journal of Software, 2003,14(2):1148–1157 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/14/1148.htm>
- [2] Sun LM, Li JZ, Chen Y, Zhu HS. Wireless Sensor Network. Beijing: Tsinghua University Press, 2005 (in Chinese).

- [3] Cui L, Ju HL, Miao Y, Li TP, Liu W, Zhao Z. Overview of wireless sensor network. Journal of Computer Research and Development, 2005,42(1):163-174 (in Chinese with English abstract).
- [4] Li JZ, Li JB, Shi SF. Concepts, issues and advance of sensor networks and data management of sensor networks. Journal of Software, 2003,14(10):1717-1727 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/14/1717.htm>
- [5] Shib E, Cho S, Lckes N, Min R, Sinha A, Wang A, Chandrakasan A. Physical layer driven protocol and algorithm design for energy-efficient wireless sensor networks. In: Rose C, ed. Proc. of the ACM MobiCom 2001. Rome: ACM Press, 2001. 272-286.
- [6] Salhich A, Weinmann J, Kochhal M, Schwiebert L. Power efficient topologies for wireless sensor networks. In: Proc. of the Int'l Conf. on Parallel Processing 2001. Valencia: ACM Press, 2001. 156-163.
- [7] Haapola J, Shelby Z, Pomalaza-Ráez CA, Mähönen P. Multihop medium access control for WSNs: An energy analysis model. EURASIP Journal of Wireless Communications and Networking, 2005,2005(4):523-540.
- [8] Ye W, Heidemann J, Estrin D. An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks. In: Kermani P, ed. Proc. of the INFOCOM 2002. San Francisco: IEEE CS Press, 2002. 1567-1576.
- [9] Dam TV, Langendoen K. An adaptive energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks. In: Akyildiz I, Estrin D, eds. Proc. of the SenSys 2003. Los Angeles: ACM Press, 2003. 171-180.
- [10] Tang Y, Zhou MT, Zhang X. Overview of routing protocols in wireless sensor networks. Journal of Software, 2006,17(3):410-421 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/17/410.htm>
- [11] Shah RC, Rabaey JM. Energy aware routing for low energy ad hoc sensor networks. In: Proc. of the IEEE Wireless Communications and Networking Conf. (WCNC 2002). Orlando: IEEE CS Press, 2002. 17-21.
- [12] Singh S, Woo M, Raghavendra CS. Power-Aware routing in mobile ad hoc networks. In: Osborne WP, Moghe D, eds. Proc. of the ACM/IEEE Int'l Conf. on Mobile Computing and Networking. IEEE CS Press, 1998. 181-190.
- [13] Stojmenovic I, Lin X. Power-Aware localized routing in wireless networks. IEEE Trans. on Parallel and Distributed Systems, 2001, 12(11):1122-1133.
- [14] Chiang M, Low SH, Calderbank AR. Layering as optimization decomposition: A mathematical theory of network architectures. Proc. of the IEEE, 2007,95(1):255-312.
- [15] Dong Q. Maximizing system lifetime in wireless sensor networks. In: Vetterli M, Yao K, eds. Proc. of the 4th Int'l Symp. on Information Processing in Sensor Networks. Piscataway: IEEE CS Press, 2005. 13-19.
- [16] Junhua Z, Shan C, Brahim B, Ka-Lok H. Tradeoff between lifetime and rate allocation in wireless sensor networks: A cross layer approach. In: Baldwin RL, ed. Proc. of the INFOCOM 2007. Alaska: IEEE CS Press, 2007. 267-275.
- [17] Michele R, Nicola B, Michele Z. Cost and collision minimizing forwarding schemes for wireless sensor networks. In: Baldwin RL, ed. Proc. of the INFOCOM 2007. Alaska: IEEE CS Press, 2007. 276-284.
- [18] Puccinelli D, Sifakis E, Haenggi M. A cross-layer approach to energy balancing in wireless sensor networks. In: Antsaklis PJ, Tabuada P, eds. Proc. of the Workshop on Networked Embedded Sensing and Control (NESC 2005). Notre Dame: Springer-Verlag, 2005. 309-324.
- [19] Chen P, Dea BO, Callaway E. Energy efficient system design with optimum transmission range for wireless ad hoc networks. In: Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Communications (ICC 2002). New York: IEEE CS Press, 2002. 945-952.
- [20] Beckmann M, Mcguire CB, Winsten CB. Studies in the Economics of Transportation. New Haven: Yale University Press, 1955.
- [21] Yuan YX, Sun WY. Optimization Theory and Methods. Beijing: Science Press, 1997 (in Chinese).
- [22] ASH transceiver designer's guide. 2004. www.rfm.com/products/tr_des24.pdf

附中文参考文献:

- [1] 任丰原, 黄海宁, 林闯. 无线传感器网络. 软件学报, 2003, 14(2): 1148-1157. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/14/1148.htm>
- [2] 孙利民, 李建中, 陈渝, 朱红松. 无线传感器网络. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [3] 崔莉, 鞠海玲, 苗勇, 李天璞, 刘巍, 赵泽. 无线传感器网络研究进展. 计算机研究与发展, 2005, 42(1): 163-174.
- [4] 李建中, 李金宝, 石胜飞. 传感器网络及其数据管理的概念、问题与进展. 软件学报, 2003, 14(10): 1717-1727. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/14/1717.htm>

- [10] 唐勇,周明天,张欣.无线传感器网络路由协议研究进展.软件学报,2006,17(3):410-421. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/17/410.htm>
- [22] 袁亚湘,孙文瑜.最优化理论与方法.北京:科学出版社,1997.



赵彤(1976—),男,湖北武汉人,博士,副教授,主要研究领域为无线传感器网络优化与设计,模式识别,城市交通网络分析与设计.



杨文国(1974—),男,博士,副教授,主要研究领域为无线传感器网络优化,交通网络流分析.



郭田德(1964—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为无线传感器网络,模式识别,计算机通信.

Call for Papers

International Conference on E-Business and E-Government

The International Conference on E-Business and E-Government (ICEE2010) will be held from May 7th to 9th, 2010 in Guangzhou, China. With the 30 years of reform and opening in China, Guangzhou is one of the most delightful and modern cities in China. ICEE 2010 aims to provide a high-level international forum for researchers and engineers to present and discuss recent advances and new techniques in E-Business, E-Commerce and E-Government. All the accepted papers will be published by IEEE Computer Society's Conference Publishing Services (CPS). According the website of IEEE Computer Society (<http://www2.computer.org/portal/web/cscps/benefits>), all CPS conference publications are also submitted for indexing to EI's Engineering Information Index, Compendex.

Topics (include but are not limited to)

(1) **E-Business and E-Commerce:** Network and Service Management, Grid Computing for e-Business, Service-oriented Architectures, B2B, B2C and C2C Architectures, E-Business Collaboration, Web and Mobile Business Systems and Services, Collaborative Business Systems, Supply-chain Management, CRM and Business Solutions, Workflow Management Systems, Human resources strategy in e-commerce enterprise. (2) **E-Government:** System and architecture of e-Government, the e-Voting issue and e-Democracy, Measuring e-Government/Economics, Policies of e-government, Legal, agency, trust and governance issues in e-Government, Applications, Case study and Challenges of e-Government. (3) **Engineering Management, Service Management & Knowledge Management:** Innovation and Entrepreneurship, Supply Chain Management, Human Resource Management, Project and Quality Management, Environment and Energy Management, Service Sciences, Service Economy and Policy, National Infrastructure Management, Knowledge Management, Semantic Web and Data Mining, Decision Support System. (4) **Key Enabling Technologies Supporting E-Business/Government:** Digital Image/Video Coding, Interactive design on digital media, Smart home/home networking, Content distribution in wireless home environment, Personal/Local/Metropolitan/Wide area networking, Peer-to-peer computing and mobile computing, Cognitive radio and sensor-based applications, Multimedia delivery over wired/wireless networks, AAA, application-oriented network management, Security and Privacy in wired/wireless networks, VPN Technology and Services, Information hiding and watermarking.

Paper Submit

ICEE 2010 invites authors to submit original and unpublished papers which should not exceed 4 pages. All submitted papers should be written in English or in Chinese. The Chinese papers must have English Titles, abstract, keywords and reference.

Important Date

Submission Deadline: Nov. 15, 2009

Acceptance Notification: Jan. 15, 2010

Registration Deadline: Feb. 15, 2010

Conference: May 7-9, 2010

For more information, please visit: <http://www.icee-meeting.org/>