

# 无线传感器网络中跨层能耗优化模型及求解算法<sup>\*</sup>

李丽娟<sup>1</sup>, 赵彤<sup>2†</sup>

(1 北京铁路局北京西站, 北京 100055; 2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

(2010 年 7 月 5 日收稿; 2010 年 7 月 23 日收修改稿)

Li L J, Zhao T. Cross-layer energy consumption optimal model and its solution algorithm in wireless sensor networks [J]. Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, 2011, 28(3): 375–381.

**摘要** 采用跨层优化法, 定量描述了网络层和数据链路层的能耗问题. 首先用概率模型分析了 CSMA 机制下节点的传输能耗, 并提出了路径累积能耗路由策略; 通过建立最优化模型及其求解算法, 说明所提出的路由策略在尽可能延长网络寿命的情况下, 可使网络整体能耗最低; 求解该最优化模型可以获得网络中各节点的传输总能耗, 进而得到网络中随数据传输量增加而首先失效的节点; 最后通过一个简单的网络算例说明了跨层能耗优化模型及求解算法是有效的.

**关键词** 无线传感器网络, 能耗, 跨层分析, 多跳传输

**中图分类号** TP212.9, TP929.5

无线传感器网络综合使用了传感器技术、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<sup>[1-4]</sup>.

迄今为止, 无线传感器网络的研究大致经历了 2 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, 因此能效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效作为研究的重点<sup>[4-6]</sup>, 它们包括基于能效的硬件设计<sup>[5]</sup>, 基于能效的网络拓扑设计<sup>[6]</sup>, 基于能效的 MAC 层协议设计<sup>[7-9]</sup>以及基于能效的路由协议设计<sup>[10-11]</sup>等.

虽然上述网络分层优化问题符合通信网络的分层传输特点, 但是各协议层的局部最优往往无法使传输网络的整体性能达到最优. 近几年来, 有一些学者采用跨层优化的方法设计高效低能耗的多跳无线通信系统, 这种研究方法逐步成为研究能耗问题的新方法. 其基本思想就是在原有 OSI 分层模型中允许各层之间有一定的交叠, 使各层之间不是完全“透明”的, 目的就是为了更好地满足面向具体应用的网络设计的需要. 在无线传感器网络中, 由于传感器节点的低处理速度、有限的存储空间、有限的能量供应、有限的通信带宽等特点, 跨层网络优化可全面、高效地整合这些系统资源, 从而提高网络的整体性能.

本文采用跨层优化方法时, 不仅用概率模型定量分析了 CSMA 机制中相邻 2 节点之间的传输能耗, 还将其能耗计算融合到路由选择策略中, 并通过构造路径累积能耗路由方法描述了传感器网络的最优

<sup>\*</sup> 中国科学院创新团队项目(kjcx-yw-s7)和中国科学院研究生院院长基金(O85101BM03)资助

<sup>†</sup>E-mail: zhaotong@gucas.ac.cn

路由选择行为. 在无线传感器网络中, 采用最小能耗路由算法时, 数据包被转发到能耗最小的路径中. 此路由的优势在于传输能耗最低, 劣势是导致部分路径上的节点能耗过快, 影响整个网络的生命期; 而采用最大生命周期路由策略时, 数据包会从节点的剩余能量最多角度选择路径, 这会导致网络整体能耗的大幅上升, 当再次补充新节点时, 节点的补充量较多. 路径累积能耗路由方法平衡了最小费用路由及最大生命周期路由各自的优势和缺点, 在网络传输过程中使传输路径上的累积能量消耗基本趋同. 即确保每条路径不会因为经常使用而很快失效, 而当有多条路径可选时, 选择累积能耗最低的路径进行传输. 该路由策略的设计目标旨在尽可能延长网络寿命的基础上, 使网络的整体能耗最低. 此外该平衡路由策略考虑到无线传感器网络的路由选择行为具有分布式(无中央控制)的特点, 路由选择机制较简单, 需采集的中继节点信息较少. 本文构造了一个跨层最优化模型, 对采用此路由策略的无线传感器网络进行了定量能耗分析, 并给出该模型的求解算法, 通过数值算例说明模型及算法是可行并且有效的.

## 1 相关工作

网络跨层优化在无线通信领域中逐渐成为一个新热点, 有很多的文章发表在一些如 INFOCOM 等重要会议上, 其主要有以下几个方面的应用: 1) 提高能效<sup>[12]</sup>; 2) 提高数据吞吐量<sup>[13]</sup>; 3) 满足特定的 QoS<sup>[14]</sup>等. 跨层优化问题中有代表性的研究工作有: 文献[15]综述了跨层优化方法在无线传感器网络中的应用, 并构造了最优传输能量、路段调度及路由流量的数学优化模型. 该模型以最小化平均传输能耗为设计目标, 采用 Lagrange 乘子法求解模型. 该文献为数学优化模型描述及解决跨层优化问题提供了经典范例. 文献[16]首次利用 MAC 层信息来实现能量有效使用路由, 提出了能量受限路由选择 (ECPS) 和能量高效负载 (E2LA) 的方法, 通过利用随机动态规划技术对模型进行了求解. 文献[17]主要关注于 TDMA-CDMA 的多跳无线网络联合路由, 能量控制及调度问题. 随着更多的学者开始关注网络寿命, 文献[18]在基于 TDMA 传输机制的基础上, 提出了一个基于生命期的最优路由流量、路段调度及传输能量的非线性最优化模型. 由此更多的跨层优化文献将路由层与 MAC 层设定为跨层优化的重点.

本文第 2 节定量分析了 MAC 层的能耗问题; 第 3 节提出了路径累积能耗路由策略, 并通过最优化模型及求解算法对网络的能耗进行了定量分析; 第 4 节通过对网络数值算例分析说明本文提出的最优化模型是可行并且有效的; 最后是简短的总结.

## 2 基于概率期望的 MAC 层能耗分析

本文假定: 1) 传感器网络所采用的 MAC 协议基于 CSMA 传输机制; 2) 网络中的节点在部署后静止不移动; 3) 传感器节点撒布后具有相同的初始能量; 4) 传感器节点具有相同的传输半径; 5) 网络寿命定义为网络中首个节点能量耗尽时网络工作的时间<sup>[18]</sup>.

当节点传输 1bit 数据时, 传输能量为  $E_{tx} = E_{ele} + E_{amp}$ <sup>[19]</sup>. 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  $E_{amp} = \frac{\beta R^\gamma}{\eta_{amp}}$ <sup>[19]</sup>, 其中  $\beta$  是与硬件相关的常数,  $R$  为节点传输半径,  $\gamma$  是路径衰减因子,  $\eta_{amp}$  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表示如下:

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

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.

假定在 CSMA 机制下传感器节点共有 4 个状态: 1)  $I$  空闲状态; 2)  $A$  活跃状态(载波、传输侦测); 3)  $T$  传输状态; 4)  $B$  退避状态. 状态转移如图 1 所示.

当节点在时隙 1 到 NAV<sup>[19]</sup> (network allocation value) 之间, 等概率地随机选择一个时隙, 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  $N$  个节点同时竞争信道时, 节点在时隙  $r$  进行成功传输数据的概率为

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

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,  $[1 - \sum_{i=1}^r P(i)]^{N-1}$  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  $P_{\text{busy}}(r) = 1 - P_{\text{success}}(r)$ . 由此, 节点选择不同时隙均可成功传输的概率  $P_{\text{success}}$ , 需要退避的概率  $P_{\text{busy}}$  分别为

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

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  $P(X = k) = P_{\text{success}} P_{\text{busy}}^{k-1}$ . 由该式可知, 本次传输过程中总的传输次数的期望值为  $\frac{1}{P_{\text{success}}}$ . 因此消耗总能量的期望值为

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

其中,  $E_{\text{busy}}$  为节点转入退避状态所消耗的能量.

### 3 路径累积能耗路由及其能耗分析模型

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 (该种分配方法仅表示节点在有数据进行传输时的功能划分, 在大规模无线传感器网络中, 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).

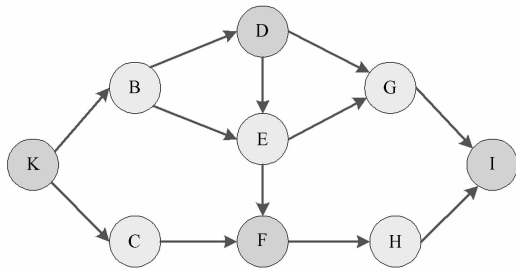


图 2 算例网络连接图

图 2 中假定传感器数据采集节点集合为  $R = \{K, D\}$ , 中继节点为  $T = \{B, C, E, F, G, H\}$  以及 Sink 节点  $S = \{I, F\}$ . 当节点 K 采集到数据并要求发送到节点 I 时, 它可以选择路径 K-B-D-G-I、K-B-E-G-I、K-C-F-H-I、K-B-D-E-G-I 以及 K-B-D-E-F-H-I 等 5 条路. 节点 D 采集到数据传往节点 F 时, 仅存在唯一的路径 D-E-F.

鉴于无线传感器网络的传输特性及传感器节点的计算能力, 路径累积能耗路由的选择机制较为简单, 对中继节点的路由判断由以下几步完成: 1) 计算可选各路径的路径累积能耗大小; 2) 将数据包转发到累积能耗最小的路径; 3) 更新该路径各条弧的累积传输能耗.

为了定量描述路径累积能耗路由选择机制, 在数据传输过程中我们先定义每一条弧 (一跳) 累积的能耗为  $t_a(x) = x E_{\text{CSMA}}, \forall a \in A$ . 其中  $x$  表示经过该弧 (跳) 传递的所有路径 (路由) 上的数据总量, 其中  $E_{\text{CSMA}}$  为传输一个数据包所消耗的能量期望值 (参见式 (4)). 定义如下的路径累积能耗函数 (该函数隐含在最优化模型 (P) 中目标函数的一阶必要条件里) 来描述其路由选择方式:

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

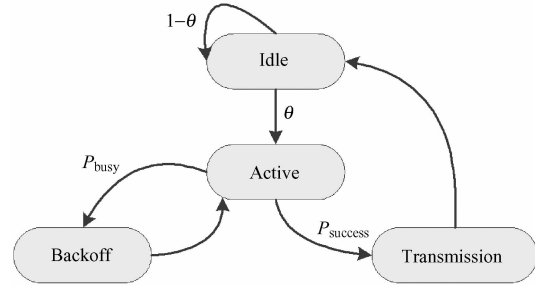


图 1 CSMA 传输机制

其中,  $K_{rs}$  表示起点  $r$  到 Sink 节点  $s$  之间可选的路径集合,  $t_{rs}^k$  为路径  $k$  上的累积能耗. 根据上述路由策略及路由选择函数, 在传感器网络初始建立时当大量的数据包需要传输时, 数据流会分配到最短路径上 (类似最小能耗路由), 但随着路径累积能耗的上升, 后继数据包会尽可能地回避该路径, 而选择那些传输数据包总量较小的次最短路径进行传输. 当数据包流量达到一定数量后, 数据流将根据路径累积能耗量均匀地分配到不同的可选路径上, 由此导致网络中最终所有可选路径上的累积能耗趋于相同 (达到一种平衡), 此时再进行数据传输时则侧重于平衡各路径的总消耗能量, 延长网络寿命.

为了在优化模型中体现在尽可能延长网络寿命的基础上, 使网络消耗的总能量最小, 即选择最小累积能耗路径进行传输的路由策略, 可以构造目标函数为:  $\min_x F = \sum_{a \in A} \int_0^{x_a} t_a(x) dx$ . 目标函数本身在计算累积能耗时做了必要的数学等价变换, 目的是确保该式一阶必要条件严格满足 (5) 式所提出的路径选择方式.

传感器节点及网络能耗的跨层最优化模型可以描述如下:

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

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

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

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

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

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,  $q = (\dots, q_{rs}, \dots)$ ; (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; (9) 式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, 其值为 1, 否则为零. (10) 式要求每次传输要符合节点之间每跳的传输能力, 如果大于这个传输能力  $P_a$  将出现延迟, 此时应该将部分仍处于在排队状态下的数据切换到其他的节点上, 走其他路径进行传输. 模型 (P) 中描述的路由分配策略, 确保每次找到的路径都是符合最小路径累积能耗的特点. 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. 但一般而言, 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<sup>[21]</sup>.

在模型 (P) 中, 目标函数的表示形式较为复杂, 且在大规模无线传感器网络中, 数据传输路由路径可以通过一系列路径探测算法得到; 但是在优化模型中, 直接按路径约束条件求解模型却是非常困难的. 针对该类路径难以确定的问题, Beckmann<sup>[21]</sup> 提出采用 Frank-Wolf<sup>[22]</sup> 方法, 对在一般网络流问题中难以计算的路径流量转换为相对容易计算的弧流量代入到模型中, 并采用较为简单的“全有全无” (All-or-Nothing) 方法<sup>[22]</sup> 进行求解. 由于有了传输能力限制, 本文不能直接采用该方法. 由此本文将引入罚函数的方法对接近传输能力的 2 节点的数据传输进行惩罚, 迫使排队数据走其他路线, 减少延迟. 重新构造目标函数:  $\min_x F = \sum_{a \in A} \int_0^{x_a} t_a(x) dx + \frac{1}{2\delta} \sum_{a \in A} \{ [\max(0, \lambda_a - \delta(P_a - x_a))]^2 - \lambda_a^2 \}$ , 其中,  $\lambda_a$  为传输能力约束 (10) 式的拉格朗日乘子,  $\delta$  为罚因子. 针对所提出的模型 (P) 可以构造如下的求解算法:

Step 1 初始化 设定参数  $\delta$  初始值, 允许误差  $\varepsilon > 0$ , 常数  $\alpha > 1, \beta \in (0, 1)$ , 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路径累积能耗最小的路径上, 得到每条弧 (每一跳) 的流量  $\{x_a\}$ , 记迭代次数为  $n = 1$ , 设定  $\delta$  的初始值;

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  $\{x_a^n\}$ , 用“全有全无”法将所有数据流加载到路径累积能耗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:求解一维最小问题:

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

令求解结果为  $\alpha^n$ ;

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

Step 6 终止条件 如果  $\|P_a - x_a^{k+1} - \frac{1}{\delta} \max[0, \delta(P_a - x_a^{k+1}) - \lambda_a^k]\| < \varepsilon, a \in A$ , 则停止计算.

其中  $\varepsilon$  为迭代精度;

Step 7 如果  $\frac{\|P_a - x_a^{k+1} - \frac{1}{\delta} \max[0, \delta(P_a - x_a^{k+1}) - \lambda_a^k]\|}{\|P_a - x_a^k - \frac{1}{\delta} \max[0, \delta(P_a - x_a^k) - \lambda_a^k]\|} \geq \beta, a \in A$ , 则置  $\delta = \alpha\delta$  转下步;

Step 8 计算  $\lambda_a^{k+1} = \max[0, \lambda_a^k - \delta(P_a - x_a^k)], \forall a \in A$ ; 否则令  $n = n + 1$ , 转入 Step 2.

模型求解结束时可得到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.在此基础上,随着网络传输数据量的增大,可以计算出网络中第一个因能量耗尽而失效的节点.

### 4 数值分析

为了分析和验证前面提出的跨层优化模型,用一个小型网络的算例进行数值分析.网络如图2所示,表1中给出了数值试验所需的各种参数<sup>[7,19,23]</sup>.

由(4)式可得出节点 K~I 的传输成功的概率  $P_{\text{success}}$  及单位数据流每一跳能量  $E_{\text{CSMA}}$ , 如表2所示.

表1 数值试验所需各种参数

参数	数值	参数	数值
$E_{\text{ele}}/(\mu\text{J}/\text{bit})$	3.63	NAV	5
$E_{\text{rx}}/(\mu\text{J}/\text{bit})$	11.13	$\beta$	$10^{-1.882}$
$\eta_{\text{amp}}$	0.2	$N$	determined by network topology
$\gamma$	2	$R/m$	20
$L/\text{byte}$	30	$E_{\text{busy}}$	$0.5E_{1\text{hop}}$

表2 各节点传输成功的概率

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

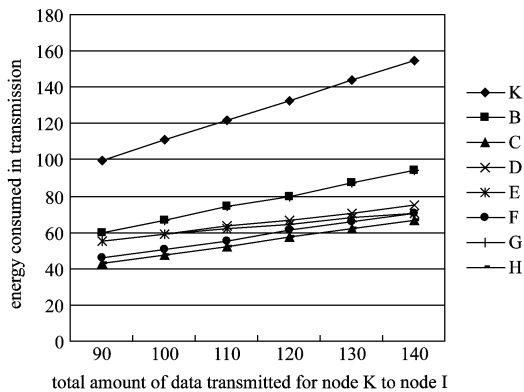


图3 网络中各节点的能耗情况

表3给出了当节点 K 的传输总量从 90 个数据包逐步增加到 140 个数据包时,网络中各个节点的累积数据发送量.

随着整个网络传输数据包个数的增加(从 90 个数据包增加到 140 个数据包),由图3可知 K 节点的能量消耗是最多的,其次是(B、G)节点. K 节点是本例假定的 2 个数据源之一,因此传输的数据量最大.由网络拓扑结构可知,一半以上的数据分配到经过 B、G 节点的路径上,且这 2 个节点又恰是这些路径的关键入口、关键出口,因此能量消耗也较高.因此如果不考虑 K 节点(数据源),仅考虑网络中的中继

点节点时, B、G 节点将是最先因为能量耗尽而失效的节点.

表 3 每个节点传输的数据总量

总传输量	K	B	C	D	E	F	G	H
90	90	51	39	47	44	39	51	39
100	100	57	43	50	47	43	57	43
110	110	63	47	54	49	47	63	47
120	120	68	52	57	51	52	68	52
130	130	74	56	60	54	56	74	56
140	140	80	60	64	56	60	80	60

## 5 结论

针对传感器网络的能耗问题, 本文采用跨层分析的方法, 定量地描述了 CSMA 机制的传输能耗. 采用路径累积能耗路由策略描述了传感器网络的路由判定行为, 在此基础上构造了最优化模型及其求解算法. 该模型的设计目标旨在尽可能延长网络寿命的同时, 使网络的整体能耗最低. 通过分析一个简单的算例, 给出了网络中各节点传输的能耗情况和数据传输中第 1 个失效的节点, 为确定网络寿命提供了定量的分析方法.

在进一步的研究工作中, 我们将细化该分析模型, 并通过仿真的方法进一步验证模型的有效性.

## 参考文献

- [ 1 ] Ren F Y, Huang H N, Lin C. Wireless sensor network[J]. Journal of Software, 2003, 14(2): 1148-1157 (in Chinese).  
任丰原, 黄海宁, 林闯. 无线传感器网络[J]. 软件学报, 2003, 14(2): 1148-1157.
- [ 2 ] 孙利民, 李建中, 陈渝, 等. 无线传感器网络[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [ 3 ] Cui L, Ju H L, Miao Y, et al. Overview of wireless sensor network[J]. Journal of Computer Research and Development, 2005, 42(1): 163-174 (in Chinese).  
崔莉, 鞠海玲, 苗勇, 等. 无线传感器网络研究进展[J]. 计算机研究与发展, 2005, 42(1): 163-174.
- [ 4 ] Li J Z, Li J B, Shi S F. Concepts, issues and advance of sensor networks and data management of sensor networks[J]. Journal of Software, 2003, 14(10): 1717-1727 (in Chinese).  
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[J]. 软件学报, 2003, 14(10): 1717-1727.
- [ 5 ] Shib E, Cho S, Lckes N, et al. Physical layer driven protocol and algorithm design for energy-efficient wireless sensor networks[C]//Proc ACM MobiCom'01. Rome: ACM Press, 2001: 272-286.
- [ 6 ] Salhich A, Weinmann J, Kochhal M, et al. Power efficient topologies for wireless sensor networks[C]//Proc of the Int'l Conf on Parallel Processing 2001. Valencia, Spain: ACM Press, 2001: 156-163.
- [ 7 ] Haapola J, Shelby Z, Pomalaza-Rúez C A, et al. Multihop medium access control for WSNs: an energy analysis model[J]. EURASIP Journal of Wireless Communications and Networking, 2005(4): 523-540.
- [ 8 ] Ye W, Heidemann J, Estrin D. An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks[C]//Proceeding of the INFOCOM 2002. San Francisco: IEEE CS Press, 2002: 1567-1576.
- [ 9 ] Dam T V, Langendoen K. An adaptive energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks[C]//Proc of the SenSys 2003. Los Angeles: ACM Press, 2003: 171-180.
- [ 10 ] Tang Y, Zhou M T, Zhang X. Overview of routing protocols in wireless sensor networks[J]. Journal of Software, 2006, 17(3): 410-421 (in Chinese).  
唐勇, 周明天, 张欣. 无线传感器网络路由协议研究进展[J]. 软件学报, 2006, 17(3): 410-421.
- [ 11 ] Shah R C, Rabaey J M. Energy aware routing for low energy ad hoc sensor networks[C]//IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC'02). Orlando: IEEE CS Press, 2002: 17-21.
- [ 12 ] Sichertiu M L. Cross-layer scheduling for power efficiency in wireless sensor networks[C]//IEEE INFOCOM 2004. Hongkong: IEEE CS Press, 2004, 3: 1740-1750.

- [13] ElBatt T, Ephremides A. Joint scheduling and power control for wireless ad hoc networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2004, 3(1): 74-85.
- [14] Kozat U C, Koutsopoulos I, Tassiulas L. A framework for cross-layer design of energy-efficient communication with QoS provisioning in multi-hop wireless networks[C]//IEEE INFOCOM 2004. Hongkong: IEEE CS Press, 2004: 1446-1456.
- [15] Cruz R L, Santhanam A. Optimal routing, link scheduling and power control in multi-hop wireless networks[C]//IEEE INFOCOM 2003. San Francisco: IEEE CS Press, 2003: 702-711.
- [16] Safwati A, Hassanein H, Moustah H. Optimal cross-layer designs for energy-efficient wireless Ad hoc and sensor networks [C] // Performance, Computing, and Communications Conference, Proceedings of the 2003 IEEE International Conference. Phoenix: IEEE CS Press, 2003: 123-128.
- [17] Bhatia B, Kodialam M. On power efficient communication over multi-hop wireless networks: Joint routing, scheduling and power control [C]//IEEE INFOCOM 2004. Hongkong: IEEE CS Press, 2004: 1446-1456
- [18] Madan R, Cui S, Lall S, et al. Cross-layer design for lifetime maximization in interference-limited wireless sensor networks[C]//IEEE INFOCOM 2005. Miami, Florida: IEEE CS Press, 2005: 1964- 1975.
- [19] Chen P, Dea B O, Callaway E. Energy efficient system design with optimum transmission range for wireless Ad hoc networks[C]//IEEE International Conference on Comm (ICC 2002). New York: IEEE CS Press, 2002 (2): 945-952.
- [20] Sheffi Y. Urban transportation networks: equilibrium analysis with mathematical programming methods[M]. New Jersey:Prentice-Hall Inc, Englewood Cliff, 1985.
- [21] Beckmann M, McGuire C B, Winsten C B. Studies in the economics of transportation[M]. Yale University Press, 1956.
- [22] 袁亚湘, 孙文瑜. 最优化理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 1997.
- [23] ASH transceiver designer's guide[R/OL]. 2004 [2010-07-01]. [http://www.rfm.com/products/tr\\_des24.pdf](http://www.rfm.com/products/tr_des24.pdf).

## Cross-layer energy consumption optimal model and its solution algorithm in wireless sensor networks

LI Li-Juan<sup>1</sup>, ZHAO Tong<sup>2</sup>

(1 West Station, Beijing Railway Bureau, Beijing 100055, China; 2 Graduate University, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract** We propose a cross-layer optimal design for the two layers: medium access and routing. First, an energy consumption function is discussed based on CSMA transmission mechanism. Secondly, the path cumulative energy consumption routing policy is proposed based on CSMA transmission energy consumption. An optimal programming model is established, and it aims at not only minimization of the total energy consumption, but also maximization of the network lifetime. The amount of transmission at each node in the network can be achieved by solving the programming model and it is the basis of the calculation of the network lifetime. One numerical example shows that the cross-layer model is efficient.

**Key words** wireless sensor network, energy consumption, cross-layer analysis, multihop communication