

# 基于功率控制的 WSNs 跨层方案\*

杨光松<sup>1</sup>, 肖明波<sup>2</sup>

(1 集美大学 信息工程学院, 福建 厦门 361021 2 厦门大学 通信工程系, 福建 厦门 361005)

**摘要:** 无线传感器网络 (WSNs) 协议设计中既要考虑网络性能, 又要考虑能量消耗。由于考虑的因素众多, 传统的分层方法通常不能满足多个目标。提出一种基于功率控制的跨层路由方案, 基于微经济学中效用的概念, 通过对每个链路的功率进行控制, 减少不必要发送功率, 减少节点之间相互干扰, 节省能耗。通过基于效用的路由度量, 均衡网络性能, 延长网络生存期。

**关键词:** 无线传感器网络; 跨层; 效用; 功率控制

中图分类号: TP393 04 文献标识码: A 文章编号: 1000-9787(2008)07-0089-04

## Cross-layer scheme in wireless sensor networks based on power control\*

YANG Guang-song<sup>1</sup>, XIAO Ming-bo<sup>2</sup>

(1 School of Information Engineering Jinji University Xiamen 361021, China)

(2 Department of Communication Engineering Xiamen University, Xiamen 361005, China)

**Abstract** When designing wireless sensor networks (WSNs) protocol not only network performance is considered but also energy consumption is considered. Tradition layered design method can not satisfy several object parameters in the same time. A cross-layer scheme based on power control is proposed. It can reduce unnecessary energy and the interference between nodes by control power of every links. It can avoid selection of the route of lower battery capacity, which can improve overall network performance.

**Key words** wireless sensor networks (WSNs); cross-layer; utility; power control

### 0 引言

无线传感器网络 (wireless sensor networks, WSNs) 网络协议设计中, 在满足链路的 QoS 条件的同时, 既要考虑控制发送功率, 减少干扰, 又要考虑减少能量的损耗, 延长网络生存期。功率控制在蜂窝网中得到广泛的应用<sup>[1]</sup>, 如用于 Ad Hoc 网络和 WSNs 中, 也能提高整个网络的增益<sup>[2]</sup>。传统的路由协议未考虑功率控制, 因此, 会增加干扰; 以最小跳为度量选择路由, 会增加能耗损。文献 [3] 提出了功率识别的路由方案, 降低了系统总的传送功率。文献 [4] 主要考虑能量损耗, 将电池的容量作为路由度量。但未从全局的角度考虑网络的性能。

由于面临众多的目标函数, 同时满足几个 WSNs 网络性能参数非常困难, 传统的分层方法很难进行一个合理的折中。文献 [6] 研究了联合调度和功率控制的问题, 用于减轻网络的干扰。文献 [5] 提出了能量受限的 Ad Hoc 网络中跨层设计的方法, 综合考虑各层因素进行网络协议的

设计。本文提出一种结合功率控制的跨层设计方案。基于微经济学中效用函数的概念<sup>[7]</sup>, 在物理层, 通过运用非协作博弈算法最大化每个用户的效用来动态调整节点的发送功率; 在网络层, 将效用函数用于路由层的选路, 即把效用作为路由选取的衡量指标。既能减少干扰, 又能减轻能量消耗。

### 1 链路约束条件和效用函数

#### 1.1 功率控制与链路约束条件

在 WSNs 中, 为保证链路正常工作, 对于无线通信的任意一条链路, 必须满足以下 2 个条件:

##### 1) 功率约束条件

假设第  $l$  条链路的发送功率是  $P_l$ , 发送功率由下式约束

$$P_l < P_l^{\max} \quad \forall \text{ link}(l), \quad (1)$$

##### 2) 信噪比约束条件

对第  $l$  条链路, 存在一个 SNR 需求, 反映了链路用于正常运转所需的可靠 QoS 需要满足

$$\gamma_l > \gamma_l^{\min} \quad \forall \text{ link}(l), \quad (2)$$

收稿日期: 2007-09-10

\* 基金项目: 福建省青年创新基金资助项目 (2006F3097)

如果链路  $l$  的始发节点为  $i$  终止节点为  $j$  则式 (2) 为

$$\frac{P_i G_{ij}}{\eta_j + \sum_{k \neq j} P_k G_{kj}} > \lambda = \gamma_{ij}^{\min} \quad (3)$$

每一条链路可以根据信道条件, 通过进行功率控制满足链路的信噪比需求。

对于链路  $ij$  根据公式 (3), 可定义其可容忍的干扰门限值为

$$TH(i, j) = P_i G_{ij} - \lambda \sigma^2 - \lambda \sum_{k \neq j} P_k G_{kj} \quad (4)$$

当  $TH(i, j) > 0$  时, 链路  $ij$  的 SNR 满足要求。

## 1.2 功率控制与博弈问题

节点发送功率控制决定了可最大化相应链路效用的最优功率, 如果该最优功率确实存在的话, 这是一个非协作  $N$  人博弈的例子。因为每一个发送-接收对的行为都表现出一种自私的方式来最大化其自身的效用, 每个传送对选择传送功率, 保证自身的效用最大化, 而不考虑其他的链路<sup>[8]</sup>。

定义网络中所有接入用户的效用总和为

$$NU(P) = \sum_{i \in \mathcal{U}} U_i(\gamma_{ij}(P), P_i) \quad (5)$$

当给定用户集合  $T$ , 每条链路的信道增益矩阵  $G$  和每个用户的效用函数时, 需要找到合适的功率分配以得到最大  $NU$ 。在满足式 (1), 式 (2) 的条件下, 算法可以表述为

$$\begin{aligned} \max_P NU(P), \\ \text{s.t. } 0 \leq P_i \leq P_i^{\max}, \forall i \in T, \\ \gamma_{ij} \geq \gamma_{ij}^{\min} \text{ or } \gamma_{ij} = 0, \forall i \in T. \end{aligned} \quad (6)$$

于是, 将系统建模为一个非协作的功率控制方案。由于在高 SNR 和低功耗之间存在折中, 发送功率将随节点移动和衰减自动地进行调整, 以减少干扰和拥塞。功率控制不再基于某一条链路, 而是根据效用最大化的原则满足全局的利益。

## 1.3 效用函数

分布式功率方案可以最大化每个用户的网络效用。文献 [9] 将这种分布式功率控制问题总结为非协作性博弈, 采用发送功率与信噪比的差作为效用函数, 用它来表示用户的满意程度。

为了简化分析, 本文使用文献 [10] 提出的效用函数, 即消耗每单位能量接收的有效信息比特的数量。假设每个节点在每一个长为  $M$  的帧中传送  $L$  个信息比特,  $M > L$ , 速率为  $R_{\text{bps}}$ , 功率为  $P(W)$ , 节点  $i$  关于  $l(i, j)$  的效用函数可以表示为

$$u = \frac{LRf(\gamma)}{PM} \quad (B/J) \quad (7)$$

$f(\gamma)$  是信噪比的函数, 取决于系统特征, 如, 调制、传播特性和接收机结构等。假设正确接收, 不需要考虑纠错,  $f(\gamma)$  可以表示为  $f(\gamma) = (1 - 2P_e)^M$ , 这里,  $P_e$  是误码率。

假设  $L, R, M$  是常数, 如果使用 DBPSK 调制方式,

式 (3) 可以表示为

$$u = \frac{(1 - 2P_e)^M}{P} = \frac{(1 - \exp(-\gamma))^M}{P} \quad (8)$$

对于链路  $l(i, j)$ , 可以发现最优的效用, 通过调整功率和选择路径, 可以最大化网络的效用。

## 2 基于功率控制的跨层方案

本文综合考虑链路的 SNR 和发送功率, 在满足链路 QoS 的同时, 节省更多的功率。物理层发送功率控制可以最大化效用, 网络层可选择有最大效用的路径, 结合链路调度, 从而可以提高整个网络的性能。

### 2.1 网络模型

为简化分析, 假设各节点在每一个时隙已经掌握了全局的信息, 忽略分布式协议的控制负荷, 求出的性能代表了协议可以达到的上界。

此外, 还作以下假设: 所有的节点工作在同一载波频率; 采用基于 TDMA 的 MAC 层协议和最小跳路由; 每个时隙每个节点仅能传送或者接收数据, 不能同时收发数据; 在分组与分组之间对传送功率进行调整; 传送功率有峰值的限制, 满足式 (1)、式 (2); 每个节点有有限的能量源, 传送功率消耗仅在源节点进行消耗。

多跳路由由协议给每一个源节点分配一条通往中心站的路径, 路径上节点与节点的数据分组传送, 在一个帧中以时隙的形式来调度。网络中的各节点首先根据信噪比和信道增益调整每条链路的功率, 然后, 选择链路效用最小的路径, 最后, 为每一条链路分配时隙。

### 2.2 功率控制过程

虽然式 (6) 的算法提供了一个网络总的效用的上界, 但这是一个非凸、受限的多变量的问题, 并且, 需要知道全局各节点之间的信息, 难于得到全局最优解, 需要一个强力搜索算法来得到数值解。因此, 需要一个分布式的功率控制算法。

本文引入一个分布式的迭代算法来进行功率控制, 它可以建模为一个多人非协作博弈问题。假设每个接收机可以知道本地信息, 如, SNR、信道增益等, 对于每一个分布执行, 算法可以表示成为

$$\max_{P_i \geq 0} U_i(\gamma_{ij}, P_i) \quad (9)$$

假设每个节点初始化发送时, 使用最大功率传送。逐渐以二分法减少发射功率, 使链路上的 SNR 满足信噪比要求。功率控制算法如下:

Start

$$P_i^0 = P_i^{\max}$$

$$A: P_i^{k+1} = P_i^k + \zeta_i^k \left(\frac{\partial U}{\partial P_i}\right)^k$$

$$\text{if } \left(\frac{\partial U}{\partial P_i}\right)^k \cdot \left(\frac{\partial U}{\partial P_i}\right)^{k+1} > 0 \quad \delta_i^{k+1} = 2\delta_i^k$$

$$\text{else } \delta_i^{k+1} = \delta_i^k / 2$$

$$\text{if } |P_i^{k+1} - P_i^k| < \epsilon$$

```

k = k + 1
goto A
else Piest = Pik

```

End

初始状态, 每个节点使用最大功率节点发送。使用迭代步进值  $\delta$  进行迭代, 如果  $(\frac{\partial U}{P_i})^k$  与  $(\frac{\partial U}{P_i})^{k+1}$  同号, 则对  $\delta$  进行调整, 直到达到功率的迭代精度  $\varepsilon$ , 从而可以求得链路的估计功率  $P_i^{\text{est}}$ 。

$$\begin{aligned} \text{其中, } \frac{\partial U_i(y_{ij}, P_i)}{\partial P_i} &= \frac{\partial U_i(y_{ij}, P_i)}{\partial y_{ij}} \cdot \frac{\partial y_{ij}}{\partial P_i} + \frac{\partial U_i(y_{ij}, P_i)}{\partial P_i} \\ &= \frac{\partial U_i(y_{ij}, P_i)}{\partial y_{ij}} \cdot \frac{G_{ij}^{\text{est}}}{RP_i} + \frac{\partial U_i(y_{ij}, P_i)}{\partial P_i} \end{aligned}$$

### 2.3 路由执行和链路调度

当调整链路  $\text{link } l(i, j)$  的功率时, 不仅要考虑 SNR 和这条链路的接收功率, 也要考虑一条路径上总的效用。结合功率控制算法, 它可以最大化效用并减少被选择路径的能量消耗。

$UL_i$  是路径  $i$  的链路效用,  $U(k_i)$  是  $k_i$  跳链路的延迟、队列, 其选路的算法为

$$\max_{i=1, 2, \dots, N} \arg\{UL_i = \sum_{i=1}^N U(k_i)\} \quad (10)$$

当发现最优路由表后, 链路调度根据路由表给每一个节点对分配时隙, 目的是在一个时隙中调度尽可能多的链路, 并维护一个可接受的传送功率环境。如果每一个时隙存在功率矢量, 使链路满足 SNR 的要求, 则调度是可接纳的。为了在一个帧中最小化分组延迟, 跳数最多的分组被优先调度。这是为了在一个帧中最小化分组延迟, 保持最多跳点的分组优先进行调度。给每一个约束集中的成员分配尽可能多的信道。如果由于一个干扰集不能同时传送, 给它们分配独立的信道, 总的用于调度的时隙会降低, 从而增加整个网络的性能。

### 3 仿真结果与分析

仿真场景如图 1 所示, 各节点的最大通信距离为 100m, 节点数据通过多跳连接发往基站 BS, 信道模型采用短距离通信的信道损耗, 每个节点的初始能量为 10 J, 采用 DBPSK 的调制方式, 定义延时为所有的节点到目的节点的平均时隙数, 吞吐量为单位时间内成功发射数据的比特数。为简化分析, 能量消耗定义为某链路发射功率乘以时隙数, 且只考虑发射节点的能量。

仿真对 3 种工作方案进行比较:

方案 A: 每个节点用固定功率发送, 首先, 用最小跳数找到路由, 然后, 给每条满足条件式 (1)、式 (2) 的链路分配时隙。

方案 B 时隙调度和路由选择同方案 A, 每条链路在发送数据分组之前进行功率调整, 对发送的数据分组进行功率控制。

方案 C 按第 2 节提出的跨层功率方案, 首先, 进行功率调整; 然后, 选择效用总和最小的路径; 最后, 给每一条链路分配不公时隙。采用 1.2 的效用函数作为路由度量和功率控制。

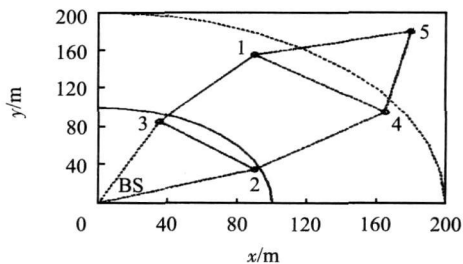


图 1 仿真场景

Fig 1 Simulation scene

图 2 图 3 中随着通信源节点对数的增加, 3 种方案的时延增加, 而吞吐量降低。方案 B 由于采用了功率控制, 单位时间内有更多的链路被调度, 即调度一条链路所用的时延减少, 且单位时间内有更多的数据分组被传送, 因而, 总的平均延迟减少了, 吞吐量增加, 故其时延、吞吐量性能明显优于方案 A 的时延。方案 C 综合考虑了功率控制、调度和路由, 因而, 其链路间干扰进一步减少, 单位时隙内调度的时隙数进一步增多。所以, 时延和吞吐量性能有了进一步的提高。

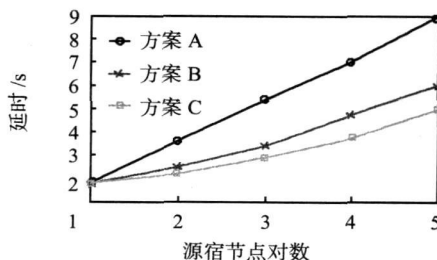


图 2 时延性能

Fig 2 Performance of delay

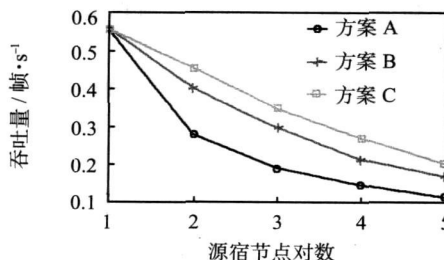


图 3 吞吐量性能

Fig 3 Performance of throughput

由图 4 可见, 能量消耗随源节点对数增加而增加, 但方案 C、B、A 的消耗能量性能依次递减; 图 5 给出了在 2 个源宿对时, 随着通信时间的推移而剩余能量的情况, 其中, 每个“轮回”为所有的源宿对发送完所有数据的一个通信过程。在经历了 10 个轮回后, 方案 A 已消耗了近一半的能量, 而方案 C 只消耗了 20%, 可见采用效用函数为度量, 联

合功率控制、调度和路由进行跨层设计,可以明显地提高 WSNs 的系统性能和能量效率。

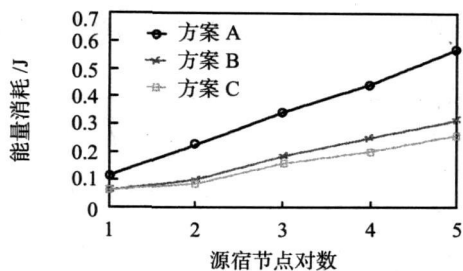


图 4 能量消耗性能

Fig 4 Performance of energy consumption

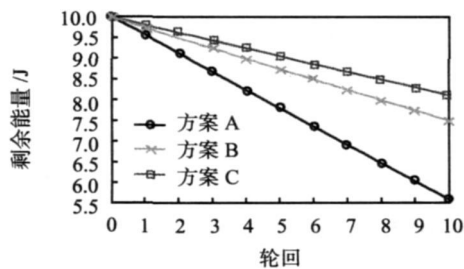


图 5 节点平均剩余能量

Fig 5 Average surplus energy of nodes

#### 4 结论

介绍了一种基于功率控制的路由算法,各节点利用经济学的概念,按效用函数最大化的原则进行了功率控制,同时,在路径选择过程中,选择效用最大的路径,综合考虑了能量效率和 QoS 约束。仿真结果说明:该算法能全面地调整功率,从而减少干扰,减少能量损耗,延长了整个网络的生存期。

#### 参考文献:

[1] Yates R. A framework for uplink power control in cellular radio

systems[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications 1995, 13(7): 1341-1347

[2] Monks J P, Ebert J P, Wolisz A, et al. A study of the energy saving and capacity improvement potential of power control in multi-hop wireless networks[C]. Proc of the 26th Annual IEEE Conf on Local Computer Networks 2001: 550-559

[3] Gomez J, Campbell A T, Naghshineh M, et al. Conserving Transmission Power in Wireless AdHoc Networks[C]. ICNP, 2001

[4] Singh S W, Oom, Raghavendra C S. Power aware routing in mobile AdHoc networks[C]. International Conference on Mobile Computing and Networking (MobCom'98), 1998.

[5] Ebatte T, Ephremides A. Joint scheduling and power control for wireless AdHoc networks[J]. IEEE Trans Wireless Commun, 2004, 3(1): 74-85

[6] Gokhanli A, Wicker S B. Design challenges for energy-constrained AdHoc wireless networks[J]. IEEE Wireless Communications Magazine, 2002, 9(4): 8-27.

[7] Mas-Colell A, Whinston M D, Green J R. Microeconomic theory[M]. Oxford University Press 1995

[8] Fudenberg D, Tirole J G. Game theory[M]. Cambridge, MA: MIT Press 1991

[9] Xiao M, Ingho, Shroff N B, Chong E K P. A utility-based power control scheme in wireless cellular systems[J]. IEEE/ACM Trans on Networking 2003, 11(2): 210-221

[10] Goodman D J, Mandayam N B. Power control for wireless data[J]. IEEE Personal Commun 2000(7): 48-54

#### 作者简介:

杨光松(1968-),男,贵州丹寨人,博士,副教授,主要研究方向为无线传感器网络。

(上接第 88 页)

试验中,将 4 组应变计接入传感信号调理电路模块的应变桥路中,如图 7 所示,传感信号调理电路模块通过 60 针连接器与无线传感器网络节点配接,在平板结构上的 9 个方格内依次加载 5 kg 的砝码,无线传感器网络节点无线发送、接收静态应变信号,记录每格加载时的应变变化模式,并用无线传感器网络载荷定位软件完成模式的判断,如表 3 所示。

表 3 载荷定位模式训练结果

Tab 3 Training result of localization model

传感节点	方格内应变变化值( $\times 10^{-6}$ )									
	无载荷	1	2	3	4	5	6	7	8	9
通道 1	0	0	0	2	8	16	8	13	56	1135
通道 2	0	10	4	374	3	10	32	3	9	13
通道 3	0	10	8	3	38	16	2	201	7	0
通道 4	0	12	16	48	12	4	16	8	4	4
识别率(%)	100	100	100	100	98	97	98	100	100	100

试验结果表明:用于应变监测的无线传感器网络节点

很好地完成了应变数据的采集与处理,并根据应变变化的模式成功地判定了载荷的位置。

#### 7 结论

针对结构健康监测中的应变传感元件输出电信号微弱的特性,本文设计出了用于应变监测的无线传感器网络节点,使应变监测更加方便、稳定、可靠。

#### 参考文献:

[1] 袁慎芳. 结构健康监测[M]. 北京:国防工业出版社, 2007: 1-21

[2] 瞿雷. 一种新的无线网络通信技术 ZigBee[J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2006(1): 12-14

[3] 康华光. 电子技术基础[M]. 北京:高等教育出版社, 1996: 330-375.

[4] 陈杰. 传感器与检测技术[M]. 北京:高等教育出版社, 2002: 1-20

[5] 叶伟松,袁慎芳. 无线传感器网络在结构健康检测中的应用[J]. 传感技术学报, 2006 19(3): 890-894

#### 作者简介:

尚盈(1981-),男,山东泰安人,硕士研究生,主要从事测试技术和无线传感器网络。