

一种适用于无线传感器网络的功率控制 MAC 协议^{*}

李方敏¹⁺, 徐文君¹, 高超²

¹(武汉理工大学 信息工程学院,湖北 武汉 430070)

²(Department of Computer Science, University of Vaasa, Vaasa, Finland)

A Power Control MAC Protocol for Wireless Sensor Networks

LI Fang-Min¹⁺, XU Wen-Jun¹, GAO Chao²

¹(School of Information Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

²(Department of Computer Science, University of Vaasa, Vaasa, Finland)

+ Corresponding author: Phn: +86-27-87290335, E-mail: lifangmin@mail.whut.edu.cn, <http://www.whut.edu.cn>

Li FM, Xu WJ, Gao C. A power control MAC protocol for wireless sensor networks. *Journal of Software*, 2007,18(5):1080–1091. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/18/1080.htm>

Abstract: Power control scheme is used to reduce energy consumption, but asymmetric transmit powers is the problem which can result in increased collisions and degraded throughput in the scheme. A system model following pareto distribution according to a real network situation is proposed. The performance of the power control scheme in saving energy for wireless sensor networks is studied in this paper. A power control scheme based on SMAC (sensor-MAC) for wireless sensor networks is proposed and evaluated. In the new scheme, the optimum neighbor nodes are selected by a scheduling algorithm which can improve the network topology, reduce the collisions, increase goodput, and confirm the network connectivity. The message is transmitted with the optimum power. Furthermore, the protocol provides a fair share of the medium to low power and high power nodes by the reactive mechanism. The experimental results demonstrate that the new power control MAC (media access control) protocol provides longer lifetime and higher goodput than the current important protocols.

Key words: wireless sensor network; MAC (media access control) protocol; power control scheme; reactive mechanism; energy efficient

摘要: 功率控制技术通过减少节点的发射功率来降低能耗,但节点间不对称的发射功率会增加网络的冲突概率并降低吞吐量.根据实际环境中的节点部署情况,引入了基于 Pareto 分布的系统模型.研究了传感器网络中功率控制技术在节省能量方面的性能,提出了一种基于 SMAC(sensor-MAC)可适用于无线传感器网络的功率控制 MAC(media access control)协议.此协议使用功率控制调度算法选择最优相邻节点,使网络中节点的拓扑连接得到优化,在保证网络连通性的同时,降低通信的冲突率,扩大网络的吞吐量.信息的传递以最优功率发射,并使通信节点具有反作用冲突节点的能力,从而在降低网络能耗的同时保证了节点间通信的公平性.实验仿真结果显示,与现有的几

* Supported by the Program for New Century Excellent Talents in University of China under Grant No.NCET-05-0657 (新世纪优秀人才支持计划); the Foundation for Distinguished Young Scientists of Hubei Province of China under Grant No.2006ABB028 (湖北省青年杰出人才基金)

Received 2006-08-14; Accepted 2006-11-16

种重要方案相比,新的功率控制 MAC 协议使网络具有了更大的有效吞吐量及更长的生存时间.

关键词: 无线传感器网络;MAC(media access control)协议;功率控制策略;反作用机制;能量有效

中图法分类号: TP393 文献标识码: A

近年来,随着传感器技术、嵌入式技术以及低功耗无线通信技术的发展,无线传感器网络在环境监测、建筑物结构健康监测、工业智能控制、战场监视以及交通流量监测等诸多方面的应用更加广泛^[1,2].在无线传感器网络中,传感器节点由于受成本和体积的限制,通常采用能量有限的电池提供能量.然而,由于整个网络中部署有大量的节点,并且工作环境通常比较恶劣,替换节点的电池或对电池充电是十分困难的.所以,如何在有限能量的条件下最大化网络生命周期是传感器网络面临的首要挑战.

传感器节点消耗能量的模块包括传感器模块、处理器模块和无线通信模块.随着集成电路的进步,处理器和传感器模块的功耗变得很低,绝大部分能量都消耗在无线通信模块上.传感器节点传输 1 比特信息 100m 距离需要的能量大约相当于执行 3 000 条计算指令消耗的能量^[3].因此,减少节点消耗的通信费用,尤其是发射信号的费用,是延长传感器网络生命周期的有效途径.

无线网络中的功率控制技术可以通过改变发送功率来减少系统能量的消耗^[4].目前,在无线网络通信中已有大量的研究工作从不同的角度运用功率控制技术^[4-11],但是,由于传感器网络自身的特点,例如节点数量规模巨大、活跃-睡眠的状态转换等,使得许多现有的功率控制技术很难适用于传感器网络.本文从能量有效性及网络吞吐量角度出发,提出了一种基于 SMAC(sensor-MAC)的可适用于大规模无线传感器网络环境的功率控制 MAC(media access control)协议.

1 相关工作

1.1 功率控制MAC协议

功率控制对网络性能的影响主要体现在网络的总体能量消耗、网络的连接性以及吞吐量等方面.功率控制技术通过动态地调整节点的发射功率来降低能量的消耗,并以较小的发射功率减少网络节点间的冲突域,扩大网络的容量.

文献[11]描述了如何在功率控制机制中确定最优的发射功率值,根据电波在自由空间传播损耗的 Friis 公式,可以得到接收端功率:

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2 L} \quad (1)$$

其中, P_t 为发送端天线发射功率; G_t, G_r 分别为发射、接收天线增益; λ 为波长; d 为发射端与接收端的距离; L 为系统损耗因子, $L \geq 1$.

节点通过侦听信道中的能量强度来判断是否有信号在信道中传输.当侦听到的能量强度高于节点的接收门限 P_r 时,则表明信道中有信号传输,接收节点能够正确接收信道内的数据.由此可得出发送节点所需的最小发射功率:

$$P_m = \frac{R_t L d^2 (4\pi)^2}{G_t G_r \lambda^2} \quad (2)$$

其中, R_t 为接收节点的接收门限, P_m 为发送节点所需的最小发送功率.

由式(1)、式(2)可得

$$P_m = \frac{P_t R_t}{P_r} \quad (3)$$

由此,根据已知的数据 P_r, R_t 及 P_r 可以计算出发送节点所需的最小发送功率值 P_m .考虑到信道的衰减特性,通常将 P_m 乘以一个调整参数 $c(c \geq 1)$,以此使信号在信道中能够得到可靠的传输.

理论上的功率控制协议称为 OPC(optimal power control)协议,该协议中所有信息的发射均采用最优的发射功率.但是,不对称的发射功率会使网络内通信冲突的概率增加,并导致公平性降低.文献[7]描述了一种适用于 Ad-hoc 网络的功率控制协议 PARO(power-aware routing optimization,后被称为 BASIC 协议).在 PARO 中,RTS/CTS 使用最大功率传输,而数据包和应答包(DATA/ACK)的发射功率大小则使用所需要的最小功率,这样就能达到节省耗能的目的.然而,该协议会导致在载波侦听环带中的节点侦听不到 DATA/ACK 的传输,从而与正在发送的 DATA/ACK 发生冲突.在这种环境下,隐蔽站问题变得比较严重,节点由于过多的冲突而重传数据,也会增加网络的总体能耗,同时对网络的通信连接造成影响.

为了解决 BASIC 协议中的隐蔽站问题,文献[4]提出了 PCM(power control MAC)功率控制协议.PCM 与 BASIC 的方法相似.唯一不同的是,PCM 机制在节点发送 DATA 时,周期性地将发射功率增加到最大,使得在载波侦听环带范围内的节点能够侦听到 DATA 信号,从而延迟发送,避免冲突.PCM 协议有效地解决了 BASIC 协议中的隐蔽站问题,但在提高信道利用率和扩大网络吞吐量方面并没有改进.

文献[8,9]提出了 COMPOW(common power)协议.COMPOW 是在网络中寻找一个能保证各节点联通性的最低发射功率.它通过比较各个路由代理最后得到的全网拓扑图,取其中发射功率最小且所形成的网络拓扑结构和以最大发射功率所得的网络拓扑结构一致的那个发射功率作为全网的统一发射功率.COMPOW 的问题在于,它仍然在全网内使用统一的发射功率,而不是针对不同发射距离自适应地调整发射功率,因此还是会引入不必要的能量消耗和信道噪声.此外,COMPOW 的多个路由代理在探测网络时会给网络带来大量的额外开销.

文献[10]将原始信道划分为多个子信道,并在不同的子信道上分别传输数据和控制信息,对于不同的目的节点使用不同的发射功率.但是,文献[10]在发射 RTS 和 CTS 控制帧时,仍然采用最大发射功率来解决隐藏-暴露节点问题,这会带来不必要的能量消耗和信道干扰.

1.2 能量有效性的传感器网络 MAC 协议

针对传感器网络的特点,MAC 协议的设计需要考虑以下 3 个方面^[3]:(1) 节省能量(energy efficiency).(2) 可扩展性(scalability).对于节点数目、节点分布的密集程度和网络拓扑结构要具有可扩展性,以适应网络中节点个数增加或者减少(因为电池耗尽)和位置等变化.(3) 其他,主要包括网络的公平性、实时性、网络的吞吐量、带宽的利用率等等.目前,针对不同的传感器网络应用,人们从不同方面提出了多种 MAC 协议^[11-15],其中最典型并被广泛认可的协议就是由文献[12]提出的 SMAC 协议,以及由文献[13]提出的在 SMAC 基础上改进的 TMAC (timeout-MAC)协议.SMAC 协议是对 802.11 协议的改进,主要目标是减少能耗,提高良好的扩展性.该协议通过周期性侦听和休眠每个节点独立调度工作状态,避免接收不必要的信息以及分段的消息传输等措施减少能耗.而 TMAC 协议则是在 SMAC 的基础上引入了一个 TA 时隙,根据通信流量动态地调整活动时间,用突发方式发送信息,减少空闲侦听.在 SMAC 和 TMAC 中均未使用功率控制技术,但由于无线传感器网络从某种意义上可以被看作是一种特殊的 Ad-hoc 网络,只是两个系统的某些设计目标不同,因此,许多 Ad Hoc 网络中的功率控制技术成果可以借鉴到无线传感器网络中.

文献[11]将功率控制技术运用到了 SMAC 协议中,提出了适用于传感器网络的 PCSMAC(power controlled sensor-MAC)协议.在该协议中,每个节点发送 SYNC 消息通告自己的调度信息,并根据收到的 SYNC 消息由式(3)计算出节点自身到各相邻节点所需的最小发射功率.同时,每个节点都维护一个调度表,保存所有相邻节点的调度信息.数据传输仍采用 RTS/CTS/DATA/ACK 的通信过程(广播包除外).在传输的每个分组中都有一个域值表示剩余通信过程所需要的持续时间长度,当邻居节点侦听到分组时,记录这个时间值,同时进入睡眠状态直至本次通信结束.节点的发射功率控制依据自身的功率水平表调度,RTS/CTS/ACK 以到达最远的相邻节点的最小发射功率发射,从而确保所有相邻节点在通信过程中进入睡眠状态.在传送消息时,以两种不同的发射功率在物理层发射,帧头以到达最远的相邻节点的最小发射功率发射,而数据帧则以到达目的节点的最小发射功率发射,以此确保在以最优功率传送数据的同时,新近苏醒或加入的节点不会与通信产生冲突.PCSMAC 协议将功率控制技术运用到 SMAC 中,在一定程度上降低了网络的能耗,但由于其使用的功率控制技术与 PCM 协议较类似,因而在网络吞吐量方面并没有明显改进,并且同样存在着隐蔽站所带来的问题.

2 系统模型

在文献[5,6,16]所架构的系统模型中,传感器节点随机、均匀地分布在一个矩形区域内.然而在实际传感器网络中,传感器节点的分布往往与此不同.文献[17]描述了一种基于真实应用环境,服从 Pareto 分布的系统模型,在对灾害地区的环境监测中,大量的传感器节点往往被布置到人类生命较多的区域,以便于实施灾害救援;而对于人烟稀少的区域,则布置较少的节点,以免造成资源的浪费.在这种情况下,人们较关心的区域的节点分布密度较大,从而成为“热点区域”;反之,节点密度较小的区域则成为“非热点区域”.

为了使系统模型能够更加接近实际环境,本文根据文献[17,18]来架构系统模型.由于系统模型区域内节点数量有限,因此,节点的分布服从有边界的 Pareto 分布,密度函数为

$$F(k)=((1-(a/k)^\alpha)/(1-(a/b)^\alpha)) \tag{4}$$

其中, a, b 分别为区域内节点数量的下限与上限; k 为实际存在的节点数;参数 $0 < \alpha < 2$.

系统模型总体区域为 $1250 \times 1250 \text{m}^2$,在整个区域内根据式(4)所示的 Pareto 分布产生一定数量的节点,其中包含节点数量多、密度大的部分区域即成为“热点区域”.如图 1 所示为本文系统模型中的节点分布情况,具体参数设置为:节点总数为 N ,此处设定 $N=250$;其余参数 $\alpha=1.1, a=3, b=100$.

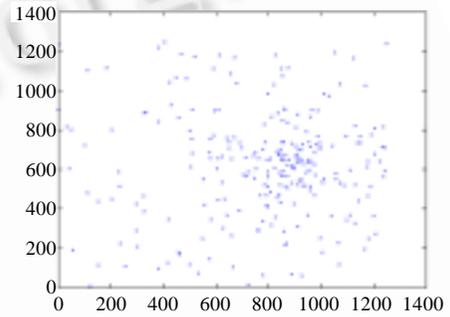


Fig.1 The nodes layout in the system model

图 1 系统模型中的节点分布

此外,系统模型中的传感器节点部署后不再移动,并且不需要人为维护;基站部署在一个固定位置,并且基站是唯一的;所有节点具有相似的能力(处理/通信),并且地位平等;节点无线发射功率可控,即节点自身可以调整发射功率的大小.节点之间无线通信的能量衰减模型采用自由空间(free space)模型,即发送方发送数据的能量损耗与距离的平方成正比.接收方具有一个接收门限,当接收到的信号能量高于接收门限时,接收方正确接收,若信号能量低于这个门限,则数据包被标识为错误的包并被 MAC 层丢弃.

3 功率控制技术中影响网络性能的因素分析

本节将对功率控制技术中影响无线传感器网络性能的因素进行分析.

源节点周围圆周上节点分布数量与距源节点的距离 r 有关,设节点分布密度为 ρ_1 ,发送消息的概率为 λ_1 (可设 $\lambda_1=1$),则在一定面积内节点的数量为

$$CDF=\pi r^2 \rho_1 \tag{5}$$

可与源节点通信的节点数量概率为

$$pdf = \lambda_1 \frac{dCDF}{dr} = 2\pi r \rho_1 \lambda_1 \tag{6}$$

由式(1)、式(5)可以得出,节点的发射能耗和通信节点的数量均与距离 r 成正比,因此,减小发射范围就可以有效降低节点的能耗.并且,发射功率在减小的同时,单个节点控制的覆盖域也随之减小,网络的吞吐量则将得到扩大.但是,功率控制技术中各节点不均匀的发射功率传输则必然会造成网络中的冲突增加,同时高发射功率的节点对低发射功率的节点存在“压制作用”,从而使整个网络的公平性降低.如图 2 所示,节点 A 以最优发射功率向节点 B 传递消息,由于发射功率的不对称性,阴影部分内的节点均有可能在 B 处产生冲突,从而影响 B 对 A 传送的 DATA 的接收.

设节点的分布密度为 ρ_2 ,发送消息产生冲突的概率为 λ_2 (λ_2 与源节点发送数据的长度 T_x 成正比,设 $\lambda_2=T_x$),源节点的最大发射半径为 R ,最优发射半径为 r ,则可以造成冲突的节点数量为

$$N_c(r) = \begin{cases} \rho_2 \lambda_2 (\pi R^2 - \pi r^2), & r \leq \frac{R}{2} \\ \rho_2 \lambda_2 \left(\pi R^2 - \left(2R^2 \arccos \frac{R}{2r} - 2 \left(\pi - 2 \arccos \frac{R}{2r} \right) r^2 + Rr \sqrt{\frac{4r^2 - R^2}{4r^2}} \right) \right), & \frac{R}{2} < r \leq R \end{cases} \quad (7)$$

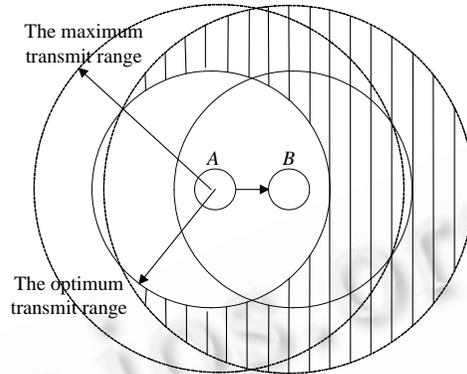


Fig.2 The collision example for power control mechanism

图 2 功率控制机制中的冲突示例

由此可以得到在功率控制机制中节点通信的冲突的期望为

$$Ec = \begin{cases} \frac{7}{32} \pi^2 \rho T_x R^4, & r \leq \frac{R}{2} \\ \pi \rho T_x \left(\frac{\sqrt{3}}{2} + \frac{17}{48} \pi \right) R^4, & \frac{R}{2} < r \leq R \end{cases} \quad (8)$$

其中, $\rho = \rho_1 \rho_2$.

由式(8)可以得出,节点通信的冲突期望与 R^4 , T_x 和 ρ 成正比.由于存在 A 与 B 的对称性,因此在 A 处产生的冲突也可以按式(8)来分析.又由于节点的发射能耗也与发射半径成正比,故在功率控制机制中,影响网络性能的因素为节点的最大发射半径 R 、源节点发送数据的长度 T_x 及节点的分布密度 ρ .本文提出的 SMAC-CRPC(cluster reactive power control)协议正是基于以上因素,从能量有效性及网络吞吐量角度出发来改善传感器网络的性能.

4 SMAC-CRPC 协议描述

这一节将给出基于 SMAC 的 SMAC-CRPC 协议细节描述.在实际环境中,传感器网络的节点往往处于不均匀分布状态,不同区域的节点密度大小不一.基于此,SMAC-CRPC 协议中的节点在维护调度表时根据最优邻居数量原则^[17,19,20],采用功率控制调度机制选择邻居节点,维护调度信息,从而使节点间形成的网络拓扑结构能够较好地适应实际环境.此外,SMAC-CRPC 协议采用双信道的反作用发射功率控制机制来改善由于各节点不对称的发射功率而引起的网络冲突率增大、公平性降低的问题.

4.1 调度表的选择与维护

SMAC 主要依靠周期性的侦听和睡眠机制来降低节点能量的消耗.当节点启动工作时,首先进入一段固定长度的时间(synchronization period),以广播 SYNC 消息,通告自己的调度信息并且侦听其他节点的调度消息,维护一个调度表,保存所有相邻节点的调度信息.在 SMAC-CRPC 协议中,同样利用这一段固定长度的时间,用于节点启动工作后通过功率控制调度机制选择相邻节点和维护调度信息.

设 P_{\max} 表示节点的最大发射功率, P_{init} 表示节点的初始发射功率, $P_{\text{opt}(i)}$ 表示到相邻节点 i 的最优发射功率.

文献[17,19,20]中描述了使用功率控制策略选取邻居节点的相关机制.本文依据文献[17,19,20],将利用功率控制选取邻居节点的策略应用到 SMAC 的邻居列表维护阶段.在启动工作后,每个节点经过随机退避时间,以初

始发射功率 P_{init} 广播一个包含自身信息的信息(Msg packet),收到该广播包的节点 i 通过式(3)计算出到源节点的最优发射功率 $P_{opt(i)}$,并将自身信息及最优发射功率 $P_{opt(i)}$ 包含在确认信息(AckMsg packet)发送给源节点.源节点通过收到的确认信息可以获知相邻节点的数量以及到各个节点的最优发射功率 $P_{opt(i)}$.由文献[17,21,22]可以得到,能够提高信道利用率并使网络吞吐量最大化的最优邻居节点数量为 6~8 个.根据此结论,在 SMAC-CRPC 协议中,每个节点通过功率控制机制选择 6~8 个邻居节点,以此来提高网络容量,并从一定程度上降低由于通信碰撞导致信息重传而引起的能量消耗.

定义 1. 任意节点, P_{init} 为改变前的初始发射功率, P'_{init} 为改变后的初始发射功率, p 为发射功率单位增量(该增量可根据环境设定),初始发射功率的增加满足如下定义:

$$P'_{init} = P_{init} + p \quad (9)$$

当收到的确认信息数量大于 8 时,源节点选取其中所需发射功率最小的 8 个节点作为自身的相邻节点,并在调度表中记录下到这些相邻节点所需的最优发射功率 $P_{opt(i)}$.当收到的确认信息数量在 6~8 时,选取所有发回确认信息的节点为相邻节点.当收到的确认信息数量小于 6 时,源节点根据式(5),以扩大的发射功率重新广播 Msg 包,并接收其他节点返回的 AckMsg 包.若相邻节点数未达到 6~8,则再次扩大发射功率广播 Msg 包,直至相邻节点数达到 6~8 个.若改变后的初始发射功率将超过最大发射功率 P_{max} ,相邻节点数仍未达到 6~8 时,则以 P_{max} 作为源节点的发射功率广播 Msg 包,并将相邻节点的信息记录在调度表中.每个节点依据此调度算法,采用功率控制策略选择相邻节点.这样,每个节点与自身的相邻节点则形成一个最优的“虚拟功率簇”,从而使整个网络的拓扑结构得到优化.

算法 1. “虚拟功率簇”调度算法.

```
#define Max_Pt 0.2818 //For 250m transmission range, the highest level
#define Tinit_Pt 7.214e-3 //For 100m transmission range, the initial level
#define broadcast_period //节点广播周期
unsigned Node_Number=0; //收到的 AckMsg 的节点数量
if (0<time<broadcast_period) {
    节点接收返回的确认包 AckMsg;
    if (Node_Number>8) {
        选取记录  $P_{t\_opt}$  最小的 8 个节点作为相邻节点;
        break; /*不再发送Msg*/
    }
    if (Node_Number>=6) {
        选取记录收到 AckMsg 的节点为相邻节点;
        break; /*不再发送Msg*/
    }
    else {
        if (Tinit_Pt==Max_Pt) {
            选取记录收到 AckMsg 的节点为相邻节点;
            break; /*不再发送Msg*/
        }
        else {
            if (Tinit_Pt+p>Max_Pt) {
                Tinit_Pt=Max_Pt;
                break; /*准备再次发送Msg*/
            }
            else {
                Tinit_Pt=Tinit_Pt+p; /*p为单位能量增量*/
                break; /*准备再次发送Msg*/
            }
        }
    }
}
节点接收返回的确认包 AckMsg {
```

```

if (已接收过此AckMsg) {
    不作处理;
    break;}
将接收到的AckMsg存入数组;
计算出到各AckMsg节点的最优发射功率 $P_{t\_opt}$ ,存入数组;
Node_Number++;}

```

针对本文中提出的系统模型,采用 Matlab 对不同调度算法下的网络拓扑连接进行仿真实验,实验结果如图 3 所示.图 3(a)为系统模型中的节点分布,图 3(b)为在固定发射功率 $P_t=250\text{m}$ 下所形成的网络拓扑连接,图 3(c)为在固定发射功率 $P_t=160\text{m}$ 下所形成的网络拓扑连接,图 3(d)为在本文提出的“虚拟功率簇”调度算法下形成的网络拓扑连接.通过图 3(b)~图 3(d)的比较可以看出,较大的固定发射功率将使网络内的节点竞争激烈,网络竞争密度很大,从而使吞吐量降低;而较小的固定发射功率则会使网络分裂、连接性变差,从而导致许多节点无法建立通信连接,并且“热点区域”的节点通信竞争强度也没有得到改善.本文所提出的调度算法有效地解决了上述问题,在使整体网络具有较好连通性的同时,降低了网络中节点的冲突概率,提高了网络吞吐量.

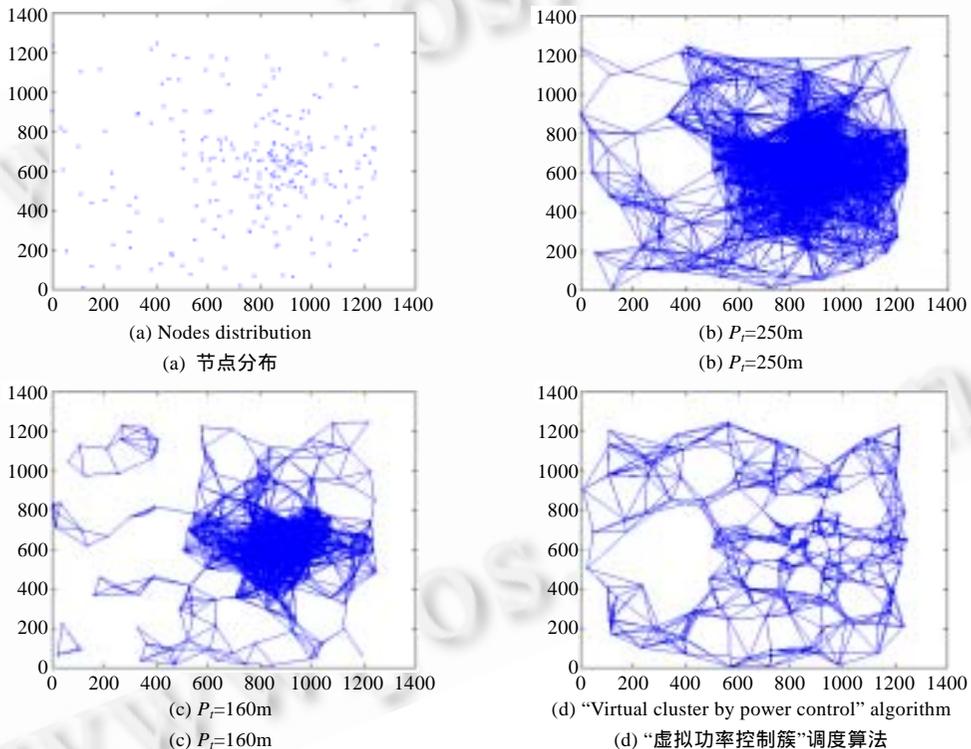


Fig.3 Network topology with different control algorithms

图 3 不同控制算法下的网络拓扑

4.2 具有反作用能力的消息传递发射功率控制

节点在启动工作后的一段固定时间内,按照文中的功率控制调度算法使节点所形成的网络拓扑结构得到优化.然而尽管冲突概率降低,网络中节点间发射功率的不对称性使得隐蔽站的问题也仍然存在,并且发射功率较高的节点对附近发射功率较低的节点的通信具有压制作用,这不仅使整个网络的公平性降低,而且还会加重发射功率较低的节点的能量开销,使其提早死亡.如果被压制的节点是网络中的“瓶颈节点”,当这样的节点提早死亡后,由于没有邻居节点的支援,则会使整个网络割裂,甚至造成网络的死亡^[23].

为了避免功率控制中不对称发射功率造成的隐蔽站问题,文献[4,11,24]均采用以最优发射功率传送数据的

同时周期性地扩大发射功率通告邻居节点的策略,这种策略虽然避免了不对称性所造成的隐蔽站问题,但却忽视了功率控制可以改善网络吞吐量的作用,使得网络吞吐量没有明显的改进.文献[25]也采用了扩大发射功率通告邻居节点的策略,但与上述文献不同之处在于,节点并不是周期性地扩大功率,而是采用当节点受到干扰后才通过获得干扰节点的信息并扩大发射功率的策略通告邻居节点,这既避免了不必要的增大发射功率所消耗的能量,同时也改善了节点间通信的公平性,并使网络的吞吐量得到提高.然而,文献[25]的实验结果显示,随着网络规模的增大,该协议对于网络有效吞吐量方面的性能较之其他典型协议已无明显优势,这是由于该协议中各类数据帧之间的冲突仍然存在,并随着网络规模的增大变得更加恶劣.基于上述分析,SMAC-CRPC 将多信道机制^[10]与文献[25]中的相关策略相结合,引入到 SMAC 的消息传递过程中,以此来改善大规模传感器网络中的能量效率、吞吐量以及节点间通信的公平性等性能.

SMAC-CRPC 协议使用了两条信道,即控制信道与数据信道.控制信道用来发送 RTS 和 CTS 分组,数据信道则用来发送数据 DATA 和 ACK 分组.控制信息和数据包都在各自的信道中传输,互不干扰,从而在一定程度上避免了冲突的发生.为了尽可能地提高网络的能量效率,所有节点在最初的 RTS/CTS/DATA/ACK 过程中均使用最优的发射功率进行通信,仅当节点在通信时受到干扰时,才通过计算扩大 RTS 或 CTS 的发射功率去反作用于干扰节点.网络中的消息传递仍采用 SMAC 中的多个短消息突发传输方式,引入“中断恢复”^[25]的概念,即当通信中的节点受到高发射功率节点的干扰时,记录此时通信的短消息序号及干扰节点的相关信息,并进入睡眠状态直至干扰节点的通信结束后苏醒.苏醒后的节点根据计算所得的到达干扰节点的最优发射功率反作用于干扰节点,以此来确保完成剩余消息的传递.SMAC-CRPC 协议的机制如图 4 所示, P_{reac} 为在反作用情况下的发射功率, P_{max} 为节点的最大发射功率, $P_{opt} \leq P_{reac} \leq P_{max}$.

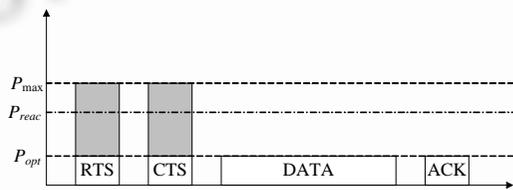


Fig.4 SMAC-CRPC protocol mechanism

图 4 SMAC-CRPC 协议机制

4.2.1 干扰节点的信息获取

被干扰节点反作用于干扰节点,必须知道干扰节点的地址、最优反作用发射功率 P_{reac} 以及何时反作用干扰节点继续完成消息传递的时间,这些信息都将从干扰节点处获得.

由于使用了双信道机制,控制信息 RTS/CTS 将不会与数据的通信冲突.在消息传递时,较高发射功率节点只有在数据信道上才会在较低发射功率节点处产生冲突,促使冲突的因素可能是发送节点的 DATA,也可能是接收节点的 ACK.如果干扰节点为发送节点,则在发送每个 DATA 帧的 MAC 帧头中包含自身的地址以及此时使用的发射功率值等信息;如果干扰节点为接收节点,则上述信息将包含在 ACK 帧中.SMAC-CRPC 协议中设计的 DATA 与 ACK 的帧结构如图 5 所示.节点在产生冲突后,可以从干扰节点的 DATA/ACK 帧处获得相关信息并计算出结果,从而为以后的反作用干扰节点活动做好准备.

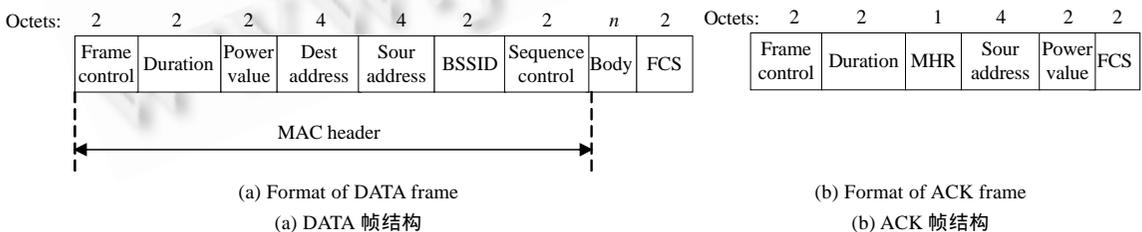


Fig.5 DATA/ACK frame format for SMAC-CRPC protocol

图 5 SMAC-CRPC 协议中的 DATA/ACK 帧结构

4.2.2 对干扰节点的反作用

如图 6 所示为不同情况下高功率发射节点在低功率发射节点处引起的冲突.节点 A 在向节点 B 传递信息的时段内,节点 C 能够在 A 处产生冲突,节点 D 能够在 B 处产生冲突,而节点 E 可以同时 A 和 B 处产生冲突.

在 802.11 协议中,节点发生冲突后就会执行退避算法随机退避一段时间.而在 SMAC-CRPC 协议中,节点如果在传递信息时发生冲突,则不会随机退避,而是停止自身的消息传递.在获取产生冲突的干扰节点的相关信息并通知此次消息传递的另一方节点后进入睡眠状态,直至干扰节点的通信结束后苏醒.苏醒后的节点迅速地在控制信道增大发射功率反作用于干扰节点,并重新建立通信连接完成剩余的消息传递.

如图 6 所示,节点 A 作为发送节点向节点 B 传递信息,节点 C 由于发射功率大于 A,因而无法获知 A 的通信信息并会在自身通信时在 A 处产生冲突,影响 A 接收来自于 B 的 ACK 帧.当在 A 处冲突发生后,节点 A 停止信息传递,并记录此次信息的序列号.在从 C 的 DATA 或 ACK 帧处获取相关信息后,计算出可以到达 C 的最优发射功率 P_{reac} ,并在控制信道以 P_{opt} 向 B 发送一控制帧(可使用 RTS 帧的结构),通知 B 节点与 A 中断此次通信并一同进入睡眠状态,直至干扰节点的通信结束.B 接收到 A 发送的控制帧后,向 A 返回一确认帧(可使用 CTS 帧的结构).当节点 A,B 苏醒后,A 以能够到达 C 的最优发射功率 P_{reac} 向 B 发送一个 RTS 帧,请求重新建立通信连接,节点 C 与其他没有进行通信的节点接收到此 RTS 帧后会进入睡眠状态,直至 A 与 B 完成此次消息的传递.

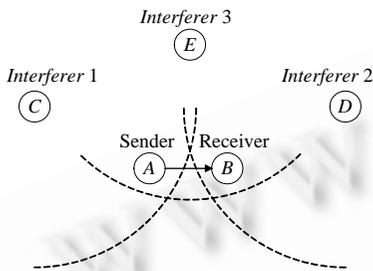


Fig.6 Different examples for the transmission collision

图 6 不同情况的发射冲突示例

作为接收节点的 B 受到 D 的冲突后,将无法正确接收来自于 A 的 DATA 帧,从而会导致 A 不断重传数据而引起过多的能量消耗.在 B 点发生冲突后,节点 B 采用与节点 A 同样的工作方式反作用于干扰节点 D.A,B 苏醒后,仍由 A 向 B 发送 RTS 请求建立通信连接,但此时的 RTS 是以 A 到 B 的最优发射功率 P_{opt} 来发射,而 B 向 A 返回的 CTS 则以能够到达 D 的 P_{reac} 发送,从而能够反作用于 D 点.同样,D 点与其他没有进行通信的节点接收到 CTS 帧后也进入睡眠状态,直至 A 与 B 完成此次消息的传递.

在节点 A,B 处还可能出现同时产生冲突的情况,如节点 E 可同时在 A,B 处产生冲突,或 C,D 同时分别在 A,B 处产生冲突.对于这种情况,在 SMAC-CRPC 协议中任何发生冲突的节点在向另一方通信节点发送控制帧之前,均会随机退避一段时间再发送.这样就使得同时发生冲突的节点很难在同一时刻发送控制帧.其中一个节点率先发出控制帧后,接收到对方控制帧的节点将不再发送自身的控制帧,而是在返回一个确认帧后,依据对方节点的调度完成接下来的工作.这种机制使得通信双方同时被干扰的问题转换为单方受干扰的问题,从而可以运用上文所述的机制加以解决.

5 实验结果与分析

我们使用 NS2 作为模拟实验平台.为了评估 SMAC-CRPC 协议的性能,我们将 BASIC,PCM 等现有典型的功率控制协议应用到 SMAC 中,以 SMAC,SMAC-BASIC,SMAC-PCM 这 3 种协议作为对象,与本文中的 SMAC-CRPC 协议进行比较分析.

在仿真实验中,传感器节点依据本文系统模型中的分布被部署在一块 $1250 \times 1250 \text{m}^2$ 的矩形目标区域中,sink 节点位置坐标为(100,650).同时,在节点分布中的“热点区域”设定 3 个源节点向 sink 节点传递信息.为了研究网络性能随着网络中节点数的增加而受到的影响,实验中网络节点数以 50 个节点的增量在 50~250 之间变化.具体实验参数设置见表 1.

我们首先对上述 4 种协议的网络有效吞吐量进行分析.吞吐量是指在不丢包的情况下,单位时间内通过的数据包数量.如果吞吐量太小,就会成为网络瓶颈,给整个网络的传输效率带来负面影响.在同样的仿真环境中,3 个源节点应用 TCP 应用层流量和 FTP 代理向 sink 节点发送消息,通过对 sink 节点在单位时间内接收到的来自于 3 个源节点的有效数据进行分析,得出对 4 种协议的网络有效流量吞吐(单位:Kbits/s)的测试比较,结果如图 7 所示.从图 7 可以看出,当网络节点规模增大时,节点间的通信竞争更加激烈,网络有效吞吐也受到影响,sink 节点接收到的有效数据也随之降低.SMAC-PCM 协议在网络有效吞吐量方面具有与 SMAC 相似的性能,说明 SMAC-PCM 协议有效地解决了由于不对称的发射功率而引起的网络通信冲突增加的问题,而 SMAC-BASIC 协

议由于网络中的通信碰撞概率增加,从而导致了网络有效吞吐量的下降.本文中提出的 SMAC-CRPC 协议由于优化了网络的拓扑连接,在保证网络具有较好连通性的同时,使节点的通信碰撞概率有效降低.节点通信采用最优发射功率,并具有反作用干扰节点的能力,因此在网络有效吞吐量方面较之其他 3 种协议具有更优的性能.虽然 SMAC-CRPC 协议随着网络规模的增大,网络有效吞吐量也随之降低,但较之其他协议仍然具有更好的网络有效吞吐性能.

Table 1 Parameters used in the simulations

表 1 仿真实验中的参数设置

Parameter	Value
Network area size (m ²)	1250×1250
Number of nodes	50~250
Maximum transmission range (m)	250
Traffic type	TCP traffic flow
Packet length (bytes)	1000
Bandwidth (bps)	2M
SMAC duty cycle (%)	10
Power for transmission (Watt)	2.0 (for 250m)
Power for reception (Watt)	1.0
Power for idle (Watt)	1.0
Power for sleep (Watt)	0.001
Power for sleep/idle transition (Watt)	0.2
Time for sleep/idle transition (s)	0.005

然后,对 4 种协议的公平性进行比较分析.我们在仿真实验中分别记录下 sink 节点接收到的来自于 3 个源节点的有效数据量.通过分析单位时间内 sink 节点所接收到的 3 个源节点的有效数据量的标准差(单位:Kbits/s)来比较各协议公平性的优劣.标准偏差是样本内各变数变异程度的度量.在网络中,节点流量吞吐的标准差越小,说明协议的公平性越好;反之,则公平性较差.4 种协议在不同节点数量环境中单位时间内的节点流量标准差对比如图 8 所示.从图 8 中可以得出,随着网络规模的增大,上述 4 种协议的网络公平性都逐渐得到改善,但 SMAC-BASIC 协议由于通信碰撞概率较高,因而在网络节点规模较大时,网络公平性略低于其他 3 种协议.而 SMAC-CRPC 协议由于网络拓扑连接较好,节点通信冲突域小,并且通信节点具有反作用干扰节点的能力,因而其网络公平性优于其他 3 种协议.随着网络节点规模的增大,SMAC-CRPC 协议的网络公平性优势更加明显.

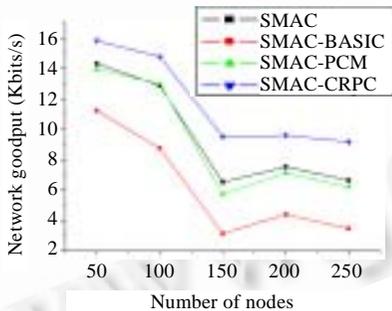


Fig.7 Network goodput

图 7 网络有效吞吐量

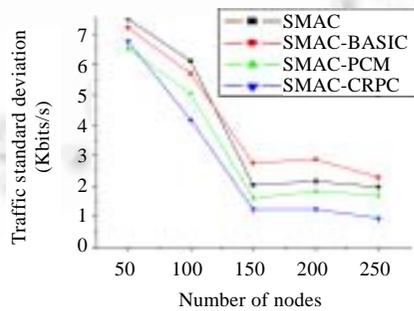


Fig.8 Standard deviation of traffic flows

图 8 网络流量的标准差

最后,对 4 种协议的能量有效性进行分析.在无线传感器网络中,能量是人们最为关心的问题之一.评价一个协议的优劣在很大程度上取决于能量节省,以最大限度地延长网络的生命周期.我们在网络的平均消耗能量方面对 4 种协议进行评估,在此定义网络平均消耗能量为网络中每个节点消耗能量的总和与 sink 节点所接收到的来自于 3 个源节点的数据量总和的比率,即 sink 节点接收每个有效数据量平均消耗的网络能量(单位:Joules/byte).4 种协议的网络平均消耗能量对比如图 9 所示.从图 9 可以看出,随着节点数量的增加,4 种协议的网络平均消耗能量均随之增加.SMAC 协议由于没有应用功率控制策略,所有数据均使用最大发射功率进行传输,因而成功发送每字节信息量所消耗的网络平均能量最大.SMAC-BASIC 和 SMAC-PCM 协议由于应用了功

率控制策略,因此在能量有效性方面较之 SMAC 协议有明显改善,但 SMAC-BASIC 由于存在较高的通信碰撞概率,从而导致信息的重传,引起多余的网络能耗,并且其网络有效吞吐量低于 SMAC-PCM 协议,故 SMAC-BASIC 的网络平均消耗能量高于 SMAC-PCM 协议.SMAC-CRPC 协议每传送 1 字节有效信息量平均消耗的网络能量较之其他 3 种协议都要低.实验结果表明,优化了网络拓扑连接,使用最优发射传递消息,并具有反作用干扰节点能力的 SMAC-CRPC 协议在提高网络能量有效性方面效果显著.

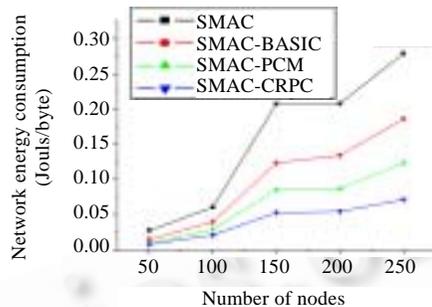


Fig.9 Network energy consumption

图9 网络消耗能量

6 结 论

本文提出了一种基于 SMAC 可适用于无线传感器网络的功率控制 MAC 协议.在该协议中,节点具有周期性苏醒-睡眠的特性,在启动工作后的一段固定时间内,使用功率控制调度策略选择最优相邻节点,建立维护自身的调度表,优化网络连接的拓扑结构,增大网络吞吐量,降低节点通信冲突率.信息的传递以最优发射功率进行,并且,通信节点还具有反作用冲突节点的能力,从而在降低能耗的同时使网络公平性得到提高.实验结果表明, SMAC-CRPC 协议与 SMAC 及应用了 BASIC,PCM 功率控制协议的 SMAC 相比具有更好的性能.由于 SMAC-CRPC 协议使用双信道机制,因此在实际应用中对硬件设备要求较高.在下一步的工作中,我们将考虑构建满足协议要求的传感器网络硬件平台,并准备在其上实现 SMAC-CRPC 协议.

致谢 在此,我们向对本文的工作给予支持和建议的同行以及武汉理工大学信息工程学院无线传感器网络组的同学和老师表示感谢.

References:

- [1] Akyildiz I, Su W, Sankarasubramanian Y, Cayirci E. A survey on sensor networks. *IEEE Trans. on Communications*, 2002,40(8): 102-114.
- [2] Shen XF, Wang Z, Sun YX. Wireless sensor networks for industry applications. In: Sun YX, ed. *Proc. of the WCICA 2004, Vol.4*. Hangzhou: IEEE Press, 2004. 3636-3640.
- [3] Sun LM, Li JZ, Chen Y, Zhu HS. *Wireless Sensor Networks*. Beijing: Tsinghua University Press, 2005 (in Chinese).
- [4] Jung ES, Vaidya NH. A power control MAC protocol for ad hoc networks. In: Akyildiz IF, ed. *Proc. of the MobiCom 2002*. Atlanta: ACM Press, 2002. 36-47.
- [5] Muqattash A, Krantz M. A single-channel solution for transmission power control in wireless ad hoc networks. In: Murai J, ed. *Proc. of the MobiHoc 2004*. Roppongi: ACM Press, 2004. 210-221.
- [6] Mohamed R, Fahmy S, Pandurangan G. Latency-Sensitive power control for wireless ad hoc networks. In: Boukerche A, ed. *Proc. of the MSWiM 2005*. Montreal: ACM Press, 2005. 31-38.
- [7] Gomez J, Campbell AT, Naghshineh M, Bisdikian C. Conserving transmission power in wireless ad hoc networks. In: Satish K, ed. *Proc. of the ICNP 2001*. Washington: IEEE Computer Society, 2001. 24-34.
- [8] Kawadia V, Narayanaswamy S, Rozovsky R. Protocols for media access control and power control in wireless networks. In: Djaferis T, ed. *Proc. of the 40th IEEE Conf. on Decision and Control*. Orlando: IEEE Control Systems Society, 2001. 1935-1940.
- [9] Narayanaswamy S, Kawadia V, Sreenivas RS. Power control in ad-hoc networks: Theory, architecture, algorithm and implementation of the COMPOW Protocol. In: Lenzini L, ed. *Proc. of the European Wireless Conf*. Florence, 2002. 156-162.

http://black1.csl.uiuc.edu/~prkumar/ps_files/compow_ewc_2002.pdf

- [10] Muqattash A, Krunz M. Power controlled dual channel (PCDC) medium access protocol for wireless ad hoc networks. In: Bauer F, ed. Proc. of the IEEE INFOCOM 2003. San Francisco: IEEE Press, 2003. 470–480.
- [11] Nar PC, Cayirci E. PCSMAC: A power controlled sensor-MAC protocol for wireless sensor networks. In: Cayirci E, ed. Proc. of the IEEE EWSN 2005. Piscataway: IEEE Computer Society, 2005. 81–92.
- [12] Ye W, Heidemann J, Estrin D. An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks. In: Kermani P, ed. Proc. the INFOCOM 2002. New York: IEEE Press, 2002. 1567–1576.
- [13] van Dam T, Langendoen K. An adaptive energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks. In: Akyildiz I, ed. Proc. of the SenSys 2003. Los Angeles: ACM Press, 2003. 171–180.
- [14] El-Hoiydi A, Decotignie JD. WiseMAC: An ultra low power MAC protocol for the downlink of infrastructure wireless sensor networks. In: Campolargo M, ed. Proc. of the ISCC 2004. Alexandria: IEEE Press, 2004. 244–251.
- [15] Zheng T, Radhakrishnan S, Sarangan V. PMAC: An adaptive energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks. In: Siegel HJ, ed. Proc. of the IPDPS 2005. Denver: IEEE Press, 2005. 65–72.
- [16] Liu M, Gong HG, Mao YC, Chen LJ, Xie L. A distributed energy-efficient data gathering and aggregation protocol for wireless sensor networks. Journal of Software, 2005,16(12):2106–2116 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/16/2106.htm>
- [17] Yu CS, Shin KG, Lee B. Power-Stepped protocol: Enhancing spatial utilization in a clustered mobile ad hoc network. IEEE Journal on Selected areas in communications, 2004,22(7):1322–1334.
- [18] Watts DJ, Strogatz SH. Collective dynamics of ‘small-world’ networks. Nature, 1998,393(6684):440–442.
- [19] Kubisch M, Karl H, Wolisz A, Zhong LZC, Rabaey J. Distributed algorithms for transmission power control in wireless sensor networks. In: Tachikawa K, ed. Proc. of the IEEE WCNC 2003. New Orleans: IEEE Communications Society, 2003. 558–563.
- [20] Ding P, Holliday JA, Celik A. DEMAC: An adaptive power control MAC protocol for ad-hoc networks. In: Walke B, ed. Proc. of the IEEE PIMRC 2005. Berlin: IEEE Communications Society, 2005. 1389–1395.
- [21] Kleinrock L, Silvester JA. Optimum transmission radii for packet radio networks or why six is a magic number. In: Proc. of the IEEE National Telecommunications Conf. Birmingham: IEEE Press, 1978. 431–435.
- [22] Tagagi T, Kleinrock L. Optimal transmission ranges for randomly distributed packet radio terminals. IEEE Trans. on Communications, 1984,32(3):246–257.
- [23] Tian L, Xie DL, Han B, Zhang L, Cheng SD. Study on bottleneck nodes in wireless sensor networks. Journal of Software, 2006, 17(4):830–837 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/17/830.htm>
- [24] Zawodniok M, Jagannathan S. A distributed power control MAC protocol for wireless ad hoc networks. In: Roberto J, de Marca B, eds. Proc. of the IEEE WCNC 2004. Atlanta: IEEE Communications Society, 2004. 1915–1920.
- [25] Anmol Sheth, Richard Han. SHUSH: Reactive transmit power control for wireless MAC protocols. In: Imre S, ed. Proc. of the IEEE WICON 2005. Budapest: IEEE Communications Society, 2005. 18–25.

附中文参考文献:

- [3] 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.
- [16] 刘明,龚海刚,毛莺池,陈力军,谢立.高效节能的传感器网络数据收集和聚合协议.软件学报,2005,16(12):2106–2116. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/16/2106.htm>
- [23] 田乐,谢东亮,韩冰,张雷,程时端.无线传感器网络中瓶颈节点的研究.软件学报,2006,17(4):830–837. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/17/830.htm>



李方敏(1968 -),男,湖南涟源人,博士,教授,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究领域为网络服务质量,新型网络体系结构,嵌入式系统.



高超(1969 -),男,博士,Senior Lecturer,主要研究领域为移动通信网络,嵌入式系统.



徐文君(1983 -),男,硕士生,主要研究领域为无线传感器网络,嵌入式系统.