

无线传感器网络的链路稳定成簇与功率控制算法

李方敏 刘新华 徐文君 韩 屏

(武汉理工大学信息工程学院 & 宽带无线通信与传感器网络湖北省重点实验室 武汉 430070)

摘 要 在能量有限条件下通过降低能耗来延长网络生存时间是无线传感器网络面临的重要挑战之一。在层次体系结构中,MAC层和网络层的能耗是影响系统能量有效性的关键,因此可以将这两层结合起来考虑,从网络跨层优化的角度来分析其能耗。针对现有典型成簇算法理论前提条件多、无法适应网络动态变化、不易在实际环境中实现的不足,结合功率控制理论及算法,基于跨层优化的策略提出了一种易于实现、能动态适应网络变化、能量有效的链路稳定成簇算法。该算法能在降低能耗的同时扩大网络的吞吐量。实验仿真结果表明,与现有的几种典型方案相比,新算法在保证网络稳定性的同时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;成簇算法;功率控制;跨层优化

中图法分类号 TP393

Link-Stable Clustering and Power Control for Wireless Sensor Networks

LI Fang-Min LIU Xin-Hua XU Wen-Jun HAN Ping

(Hubei Key Laboratory of Broadband Wireless Communication and Sensor Network,
School of Information Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070)

Abstract Reducing power consumption to extend network lifetime with limited energy resource is one of the most important challenges in wireless sensor networks. A cross-layer strategy that considers MAC layer and network layer jointly should be adopt to improve the performance of the network due to the fact that both the layers have an great effect on the energy-efficient capability of wireless sensor networks. Aiming at the disadvantages that the traditional clustering algorithms can not suit to dynamic network environments and it is hard for people to apply those algorithms in reality, a link-stable clustering algorithm (LSC) which is simple, dynamic and energy-efficient for wireless sensor networks is proposed based on cross-layer improving strategy in this paper. The algorithm can expand the network throughput and reduce the power consumption. The experimental results demonstrate that the novel cross-layer improving protocol which use clustering and power control scheme can provide longer lifetime and higher throughput than the current important protocols while keeping the network stably.

Keywords wireless sensor networks; clustering algorithm; power control; cross-layer improving

1 引 言

无线传感器网络(Wireless Sensor Networks,

WSNs)通常由大规模的传感器节点组成,每个节点装有针对特定应用的传感器、无线收发机、简单的处理器等。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

收稿日期:2007-01-22;最终修改稿收到日期:2007-11-09。本课题得到国家自然科学基金(60773212,50620130441)、新世纪优秀人才支持计划(NCET-05-0657)、教育部重点项目(107130)和湖北省国际科技合作重点项目(2007CA009)资助。李方敏,男,1968年生,博士,教授,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。E-mail: lifangmin@whut.edu.cn。刘新华,男,1974年生,博士研究生,讲师,主要研究方向为无线传感器网络、嵌入式系统。徐文君,男,1983年生,博士研究生,主要研究方向为网络服务质量、无线传感器网络、嵌入式系统。韩 屏,男,1980年生,博士研究生,主要研究方向为无线传感器网络、嵌入式系统。

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]。

在无线传感器网络中,由于有限的电池寿命,能量是非常珍惜的资源,并且其主要应用于不能提供固定设施的场合,能量利用问题在网络通信中尤其突出。在无线自组网络中,MAC层和网络层的能耗是影响系统能量有效性的关键。因此,在考虑能量有效性问题时,可以将这两层结合起来分析,从网络跨层优化的角度降低能耗,达到延长网络生存周期的目的。

采用有效的功率控制机制不仅能降低网络的能量消耗,而且还能减少节点间的相互干扰,扩大网络容量,并增强网络的连通性。同时,一系列已有的研究^[2-4]表明,网络拓扑控制对无线自组网络性能影响很大,良好的拓扑结构能够提高路由协议和MAC协议的效率,并且分簇的层次性拓扑控制机制较均衡节点的功率控制连通拓扑控制机制能更好地适用于大规模无线自组网络。因此,利用高效分簇算法及与其适应的功率控制机制是提高无线传感器网络性能的有效途径。

本文结合功率控制理论,从网络能量有效性、吞吐量及稳定性出发,提出了一种可适用于无线传感器网络的链路稳定成簇算法(Link-Stable Clustering algorithm, LSC),并从跨层优化角度分析和讨论MAC层功率控制对网络性能的影响,研究适合于LSC算法的功率控制策略,以提升网络的整体性能。本文第2节讨论相关的研究工作;第3节给出LSC算法的基本理论、算法描述及相关分析,并结合功率控制机制给出LSC的改进算法;在第4节和第5节对算法进行仿真实验及结果分析,并针对实测环境对算法做初步的探讨;第6节对全文的研究工作进行总结。

2 相关工作

2.1 网络层路由协议

从网络拓扑结构的角度,无线传感器网络的网络层路由协议可以分为两类:平面路由协议和分簇路由协议。在平面路由协议中,所有网络节点的地位是平等的,不存在等级和层次差异。目前,研究者们已经提出了很多可适用于无线传感器网络的平面路由协议,如SAR协议(Sequential Assignment Routing)、SPIN协议(Sensor Protocols for Information

via Negotiation)和DD协议(Directed Diffusion)等,然而已有研究表明,由于平面路由协议要求所有节点均具有路由功能,会导致节点因能耗过快而失效,网络的拓扑结构经常发生变化,路由性能较低。并且随着网络规模的增大,路由开销将急剧增加,网络性能也大大降低。因此,对于大规模无线自组网络,分簇算法是延长节点生存期限,提高网络稳定性与路由性能的有效途径。

LEACH^[5]是一种最具代表性的分簇路由算法,它的成簇思想贯穿于其后发展出的很多分簇路由协议中。然而LEACH算法也存在许多不足,例如①簇首节点分布不均匀;②每个簇首直接将信息传送给BS,根据Friis公式,发送能耗与距离的指数成正比,直接发送要比多跳转发能耗大,特别是在大规模网络中,较远簇头能量消耗较快,从而降低整个网络寿命;③未考虑簇首的优化措施。除上述以外,在实际应用中,簇首占有所有节点的最佳百分比 P 确定十分困难,并且LEACH的簇首概率当选算法 $T(n)$ 并没有考虑能量因素,这种算法必须基于两个前提假设才能达到每个节点平均耗费能量的预期目标^[6]:(1)每个节点初始能量均等;(2)每个节点担任簇首期间耗费的能量均等。但是由于每个簇的大小以及簇首到基站的距离不一样,前提假设(2)不符合现实。此外一旦簇形成之后,簇的结构就不再改变,簇内节点根据簇首列表依次成为簇首,不能动态处理节点的加入、失败和移动。因此,LEACH算法很难适用于真实的网络应用。

2.2 功率控制协议

功率控制对于网络性能的影响主要体现在网络的总体能量消耗、拓扑连接性和吞吐量等方面。功率控制技术通过设置或动态调整节点的发射功率,在保证网络拓扑结构连通、双向连通或者多连通的基础上,使得网络中节点的能量消耗最小,延长整个网络的生存时间。并且,较小的发射功率可以减少网络节点间的冲突域,提高网络的容量。

文献[7]描述了最为典型的功率控制协议BASIC协议。在BASIC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,以此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,增加网络总体能耗。为了解决BASIC协议中的隐蔽站问题,文献[7]提出了PCM功率控制协议。PCM与BASIC功率控制协议

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、扩大网络吞吐量方面并没有改进.

文献[8]提出的 COMPOW 协议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. 通过使用不同发射功率的路由代理探测全网, 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发射功率作为全局统一发射功率. 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, 因此还是不可避免地引入不必要的能量消耗和信道噪声. 多个路由代理对网络进行探测也会带来较大的额外开销.

文献[9]则引入了多信道技术, 在不同的子信道上分别传输数据和控制信息, 并使用由控制信道得到的信息针对不同的目的节点来指导数据信道的功率控制策略. 但是文献[9]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, 这仍会带来不必要的能量消耗和信道干扰.

上述协议在均匀分布的拓扑环境中可以得到较好的适用, 但是如果当网络中节点的分布不均, 呈现局部集中的情况时, 为了与其它稀疏区域的节点通信, 集中区域中的相应节点会提高自身的发射功率. 在这种情况下, 节点的发射功耗将无法降低, 整个网络的容量也会受到影响. 对此, 文献[10]提出了 CLUSTERPOW 协议, 利用三种功率等级来处理远近不同的节点传输距离. 然而在协议中, 每个节点必须为三个功率等级都维护一个路由列表, 这无疑会增加节点的存储负担.

2.3 跨层优化

与传统的无线网络相比, 无线传感器网络具有处理速度低、存储容量有限、能源通常不可替换且通信带宽有限等特点, 这就要求在网络设计过程中应从全局的角度对系统的资源进行整合, 从而提高网络的整体性能.

在分层的网络体系结构中, 对网络整体性能优化的传统方法主要是通过在各层独立进行优化来完成, 这种局部优化的方法在一定程度上可以改善网络的性能, 但是由于各层之间的独立性, 往往很难达到最优. 跨层优化设计方法是近几年提出来的主要用于无线网络的设计方法, 其主要目的是针对网络

的具体应用, 从整体上对网络的性能进行优化, 以满足用户的应用要求, 因此, 跨层优化设计方法已成为许多研究者用来改善无线传感器网络性能的重要手段^[11-13].

跨层优化设计打破了层与层之间的独立性, 使得层间的界限变得模糊, 在保证各层相对独立的情况下, 在具体应用时, 一些特定的消息或状态传递可以在层间通过管道或共享库来完成. 本文所采用的 WSN 协议栈如图 1 所示. 由于功率控制机制是增强链路稳定性和网络连通性及提高能量有效性的重要保证, 因此, 在研究链路稳定成簇时将 MAC 层的功率控制机制考虑进来, 是提高网络能量有效性的有效途径. 基于此, 本文的跨层优化主要在 MAC 层和网络层间进行.

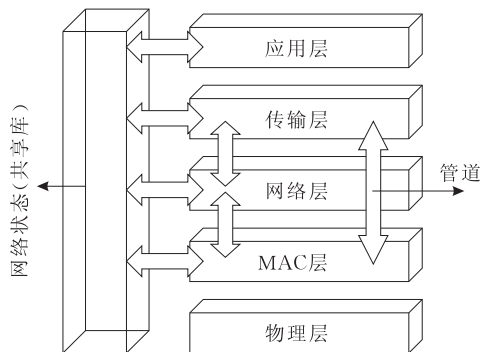


图 1 WSN 跨层协议栈示意图

3 无线传感器网络链路稳定成簇算法 LSC 描述

如在 2.1 节中所述, LEACH 算法不仅存在着理论上的不足, 而且很难适用于真实的网络应用中. 文献[4]提出了一种无前提假设条件, 并可在实践环境中适用的成簇策略, 但该策略在成簇完成后仍存在未入网节点现象. 本文基于文献[4]机制的优点, 在其基础上提出了一种易于实现、能量有效性的、能动态处理网络变化并避免未成簇节点现象的无线传感器网络链路稳定成簇算法 LSC.

3.1 算法描述

LSC 链路稳定成簇算法具体描述如下.

3.1.1 节点成簇

网络中的节点启动后, 在第一轮成簇过程中, 各节点设定一个随机退避时间 T_w , 在 T_w 这段时间内, 节点侦听信道内是否有来自其它节点的控制信号 Beacon(BEAC). 若节点在 T_w 内未侦听到来自于其它节点的 BEAC, 则在 T_w 结束后将自身设为簇首节

点,并广播发送 BEAC.反之,则将自身设定为发送该 BEAC 的簇首节点的从节点,并向簇首节点回复一个控制信号 Beacon_Replay(BEAC_R).簇首节点收到从节点回复的 BEAC_R 后,将该从节点的相关信息记录在自己的从节点列表中(Slave Table, ST).当簇形成后,簇内的所有从节点均以单跳方式与簇首节点进行通信.若一簇首节点接收到来自于另一个簇首节点的 BEAC,则该簇首节点将自身设定为发送 BEAC 的簇首节点的从节点,向其发送 BEAC_R,同时通知原自身的从节点重新成簇.成簇阶段内节点的通信方式均基于 CSMA/CA.成簇工作完成后,簇首间通信路由可采用平面协议.

3.1.2 簇的更新

在节点成簇过程中,从节点若接收到一个新的控制帧(BEAC),则对接收到的簇首节点的信息进行比较,选择距离最近的簇首节点为自身的簇首节点。根据式(1)从节点可以计算出成功发送信息到簇首节点所需的最小发射功率 P_m :

$$P_m = \frac{P_t R_t}{P_r} \quad (1)$$

其中, P_t 为发送端发射功率, P_r 为接收端接收功率, 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射功率.

由于 P_m 与距离 d 成正比, 因此从节点根据 P_m 就可比较出距离最近的簇首节点. 当从节点选择了新的簇首节点, 从节点首先向新簇首节点回复一个 BEAC_R, 新簇首将该从节点信息记录在自己的 ST 中. 接着, 从节点向旧簇首节点发送一个控制帧 Beacon_Cancel(BEAC_C), 旧簇首节点收到 BEAC_C 后则在自身的 ST 中取消这个从节点的信息, 并向该从节点回复一个控制帧 Beacon_Cancel_Replay(BEAC_C_R). 成簇过程中节点状态描述如图 2 所示.

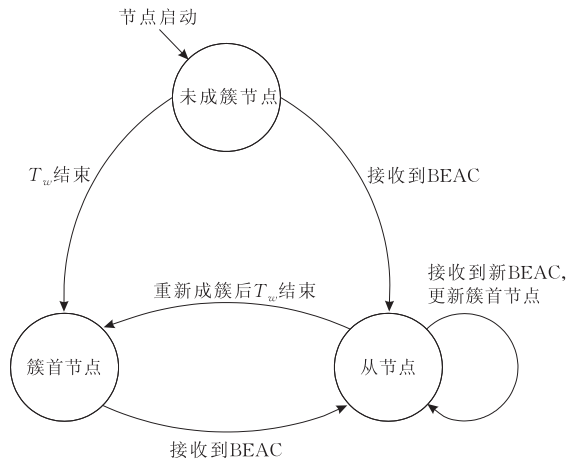


图 2 成簇过程中节点状态描述

3.1.3 簇头节点的轮换

当一轮数据传输结束后,簇内根据所剩能量 E_{new} 将簇首节点轮换,从而使各节点能均匀消耗能量,以达到延长网络生命周期的目的.

$$E_{\text{new}} = E_{\text{old}} - E_{\text{expend}} \quad (2)$$

式中, E_{old} 是当前轮回中节点的能量, E_{new} 是下一轮开始时节点的能量, E_{expend} 是节点在当前轮所消耗的能量.

在第一轮成簇过程中,随机产生传感器簇首节点.簇首节点在第一轮数据传输完成以后,向簇内广播 E_{new} 请求消息,簇内成员节点在收到该广播后,将自己的 E_{new} 值传给簇首节点,簇首节点通过计算和比较,通知 E_{new} 最大的节点成为下一轮的首节点.

进入下一轮的成簇过程. 在一个固定时间 T_1 中, 上轮成簇过程中被选定的簇首节点退避一个随机时间 T_{r1} 后, 发送控制信息 BEAC 并进行成簇工作. 在此期间, 一个簇首节点若在 T_{r1} 内接收到一个来自于其它簇首节点的 BEAC, 则此簇首节点成为发送 BEAC 的节点的从节点. 在 T_1 结束后, 若仍有节点未完成成簇工作, 则在一个固定时间 T_2 中此类节点随机退避一个时间 T_{r2} 后发送 BEAC. 若在 T_{r2} 内接收到来自其它节点的 BEAC, 则此节点成为发送 BEAC 节点的从节点; 若在 T_{r2} 内未接收到来自其它节点的 BEAC, 则此节点成为簇首节点, 完成成簇工作. 此后, 网络中的节点周期性的按此算法进行成簇工作.

应用了 LSC 成簇算法的网络工作过程如图 3 所示.

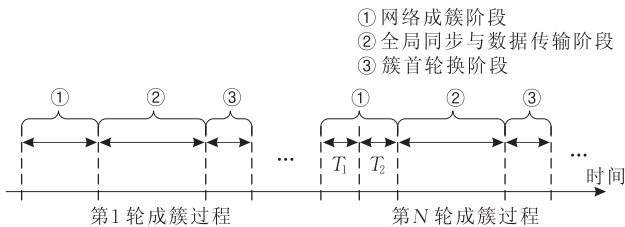


图 3 网络工作过程

3.1.4 LSC 算法的网络连通

网络的连通性是衡量无线自组网络性能的重要指标之一. 在基于 LSC 算法的成簇网络中, 存在着簇内(Intra-cluster)通信和簇间(Inter-cluster)通信这两类形式. 由于较短的发射距离不但可以降低节点的发射能耗, 而且还可以扩大网络的吞吐量. 因此, 在 LSC 算法中节点存在着两类连通功率, 较低的功率 P_{tx_sl} 用来进行簇内连通, 而较高的功率 P_{tx_sb} 则用来进行簇首的簇间连通.

设簇内的通信范围为 R_b , 簇间的通信范围为 R_c , 对于处于任意位置的节点 x , 要满足网络的连通性要求, 则各类节点的通信范围需满足^[4]:

$$R_c \geq 2 \cos 15^\circ R_b \approx 2R_b \quad (3)$$

节点完成成簇工作后, 整个网络的连通性由各簇簇首节点的连通性决定。

3.2 LSC 算法中的功率控制机制

随着集成工艺电路的进步, 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, 因此, 在成簇网络中, 若所有节点采用同一发射功率将会使网络的执行效率十分低下, 应采用可变发射功率策略^[10]. 本节将分析和讨论功率控制机制及其对网络性能的影响, 从跨层优化的角度研究适合于 LSC 算法的功率控制策略, 从而在有效降低网络冲突概率的同时减少网络的通信能耗, 扩大网路吞吐量。

3.2.1 功率控制机制对网络性能影响的分析

在系统模型中, 所有节点随机分布在一个目标区域, 若将理论功率控制机制应用于无线自组网络, 各节点间采用最小发射功率进行通信, 则网络中所有节点间通信的发射功率是一个随机量. 而未应用功率控制机制的网络中, 节点间通信的发射功率是一个定量。

文献[14]分析了上述两种情况下无线自组网节点通信的成功率. 在无线自组网络中, 节点 i 向 j 发送消息, 文献[14]设定当节点 j 接收消息信噪比(SIR)大于接收阈值 r^* 时(式(4)), 节点 j 可正确接收来自 i 的消息. 其中, P_i 为 i 点发射功率, P_k 为其余点发射功率, G 为链路增益, v 为接收节点的热噪声。

$$r_j = \frac{P_i G_{ij}}{\sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^M P_k G_{kj} + v} \geq r^* \quad (4)$$

忽略接收节点处的热噪声 v , 由式(4)得, 在变发射功率量的网络中 $P_i \neq P_k$, 则 r_j 为式(5); 而在定发射功率量的网络中 $P_i = P_k$, 则 r_j 为式(6)。

$$r_j \approx \frac{P_i G_{ij}}{\sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^M P_k G_{kj} + v} = \frac{P_i}{\sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^M P_k G_{kj} / G_{ij}} \quad (5)$$

$$r_j \approx \frac{1}{\sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^M G_{kj} / G_{ij}} \quad (6)$$

由式(5)、(6)分别求出 $Pr(r_i > r^*)$ 的数学期望, 得到随机发射功率量和定发射功率量网络中节点通信的成功概率, 如图 4 所示. 从图 4 中可以看出在大

规模网络中随机发射功率量较定发射功率量具有更高的节点通信成功率。

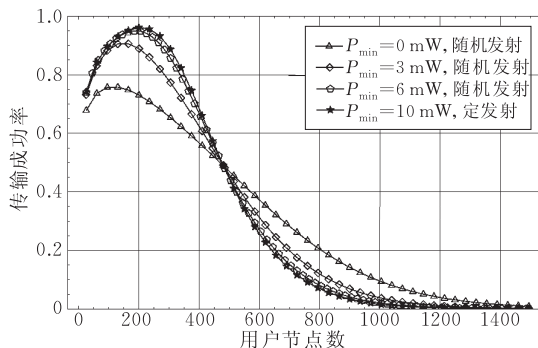


图 4 网络通信成功率对比^[14]

然而, 这种发射功率的随机性造成网络中节点间发射的不对称性, 在网络规模变大的情况下, 隐蔽站的问题将变得更加严重. 文献[15]给出了节点通信的冲突期望:

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

其中, ρ 为节点的分布密度, R 为节点的最大发射半径, r 为最小发射半径, T_x 为节点发送数据的长度。

式(7)表明节点通信的冲突期望与 R^4 , T_x 和 ρ 成正比, 因此, 在功率控制机制中, 节点采用最小功率发射(即采用最小发射半径)时, R^4 , T_x 和 ρ 是影响网络性能的主要因素。

3.2.2 LSC 算法中的功率控制策略

在分簇网络中, 采用可变发射功率是改善网络性能的有效途径. 但是, 不对称的节点发射功率会增加网络的冲突率. 在 LEACH 算法中, 为了避免附近簇的信号干扰, 簇内节点可以采用由簇首决定的 CDMA 编码来发送数据. 这虽然降低了网络因为竞争冲突而导致消息重传的概率, 但节点需要复杂的 CDMA 编解码, 对于传感器的计算能力要求较高。

本文通过对现有基于功率控制的 MAC 协议分析和研究, 并综合考虑到整个分簇网络的能量效率、吞吐量及节点间通信的公平性, 将文献[15]中所采用的一种双信道具有反作用能力的功率控制机制引入 LSC 算法, 对 LSC 算法作进一步改进, 提出 LSC-RPC 协议. 相对于文献[7]中 BASIC 和 PCM 协议所采用的功率控制机制, 该机制能有效解决隐蔽站问题, 并改善因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. 其优越性主要表现在两个方面: (1) 该机制使用控制信道和数据信道

分别传输控制信息和数据包,这在一定程度上可以避免冲突的发生;(2)节点在通信受到干扰时采用反作用功率控制机制对干扰节点进行反制,以保证节点在“中断恢复”后通信不再受到该节点的干扰,这在一定程度上改善了发射功率低的节点的通信公平性。

LSC-RPC 算法在 LSC 算法的基础上作了如下改进:

1. 算法采用两条信道,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。

2. 在网络的成簇阶段,通过节点间的信息交换,根据式(1),簇首节点计算得出成功通信所需的最小发射功率,同时维护一个簇首节点调度表,保存所有相邻簇首节点的调度信息,其中包括最小成功发射功率;从节点计算得到与簇首节点成功通信所需的最小发射功率,以保证与簇首节点的通信。

3. 在数据传输阶段,节点在最初的 RTS/CTS/DATA/ACK 过程中均使用最小发射功率进行通信,仅当节点在通信时受到干扰,需要反作用干扰节点时,才通过计算扩大 RTS 或 CTS 的发射功率去反作用于干扰节点.网络中的消息传递采用多个短消息突发传送方式. LSC-RPC 算法的通信机制如图 5 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_{min} 为节点的最小发射功率, $P_{\text{min}} \leq P_{\text{reac}} \leq P_{\text{max}}$ 。

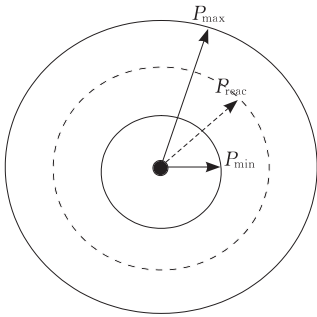


图 5 LSC-RPC 协议通信机制

4. 网络中每个节点均维护有两个等级的连通功率 P_{tx_sl} 与 P_{tx_sh} . 在成簇活动结束后,网络选举出来的簇首节点以较高的功率 P_{tx_sh} 维护一个簇间通信的邻居列表.在消息传输阶段,簇首间的通信也使用最小的发射功率。

5. 由于簇间通信的发射功率往往大于簇内通信的发射功率,故簇内通信往往会受到簇间通信的干扰.基于此,簇内的从节点仍具有两个连通功率,当从节点的通信受到簇首节点通信的干扰后,从节点的控制帧可采用较高连通功率级的最小发射功率反作用于干扰的簇首节点.从而保证整个网络通信的公平性。

4 仿真结果与分析

我们采用 NS2 和 Matlab 作为平台,从网络的连通性与稳定性、网络吞吐量、能量有效性等三方面

对提出的算法进行评估与分析.在仿真实验中,所有节点随机部署在一块 $800 \times 800 \text{m}^2$ 的矩形目标区域中,具体实验参数设置如表 1 所示。

表 1 仿真实验中的参数设置

参数名称	参数设置值
目标区域	$800 \times 800 \text{m}^2$
节点数量	150~450 个
节点最大发射距离	传感器从节点对应 100m 传感器簇首节点对应 210m
数据流	cbr traffic flow
发射数据消耗能量	100m 对应 260mW; 210m 对应 1100mW
接收数据消耗能量	600mW

4.1 网络连通性与稳定性

网络的连通性与稳定性是衡量无线自组网性能的重要指标之一.在仿真实验中,300 个传感器节点被随机部署在一个 $800 \times 800 \text{m}^2$ 的区域内.各类节点中,传感器从节点的连通发射范围 R_b 为 100m,根据式(3)则传感器簇首节点的最小连通发射范围 R_c 为 200m.通过实验仿真,图 6 示出了经过 LSC 算法成簇后的网络结构,图 7 示出了不同 R_c 值下的网络连通率。

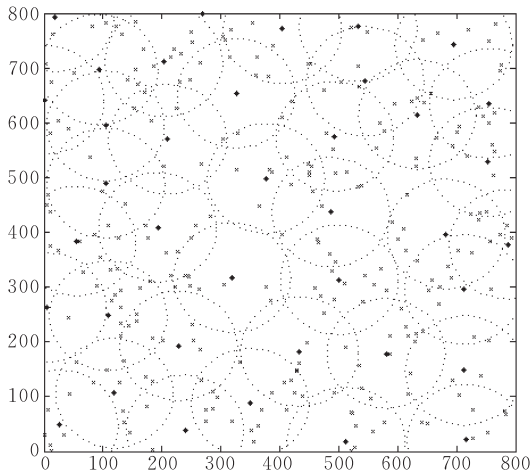


图 6 LSC 算法成簇后的节点分布

从图 6 中可以看出,簇首节点被 LSC 算法推选出来,并均匀地分布在目标区域中,其余所有节点均归属于一个簇首节点.整个网络的连通性由簇首节点的连通性决定,图 7 示出了在 $R_b = 100 \text{m}$ 时,不同 R_c 值下的网络连通率.可以看到当 R_c 小于 150m 时网络的连通率较差,只有 80% 左右的节点连通.当 R_c 值大于 150m 后,网络的连通率发生显著改善,节点连通接近 100%.当 R_c 值大于 180m 后,网络稳定在 100% 连通.图 6、图 7 表明 LSC 算法可使无线传感器网络有效成簇,簇首分布均匀,并且整个网络具有较好的稳定连通性。

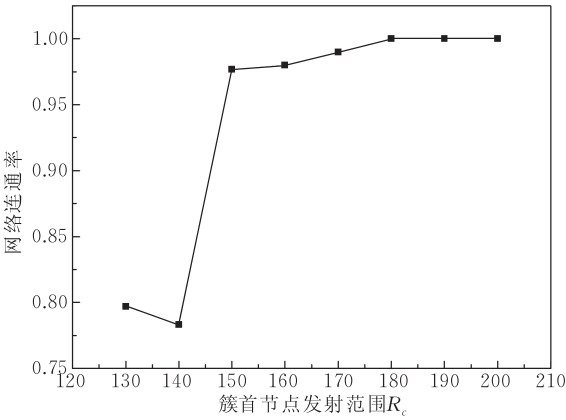


图 7 不同 R_c 值下的网络连通率

图 8、图 9 分别示出了当 $R_c=180\text{m}$ 和 $R_c=210\text{m}$ 时簇首节点的通信连通拓扑。可以看到当 $R_c=180\text{m}$ 时,簇首节点间虽然可以 100% 连通,但路由路径却受到很大局限,效率不高,并且容易生成“瓶颈节点”。当 $R_c=210\text{m}$ 时,簇首节点的连通有了显著改进,簇首节点可有效地选择最优路由进行消息的传递。因此在 LSC 算法中可设定 $R_b=100\text{m}$, $R_c=210\text{m}$ 。

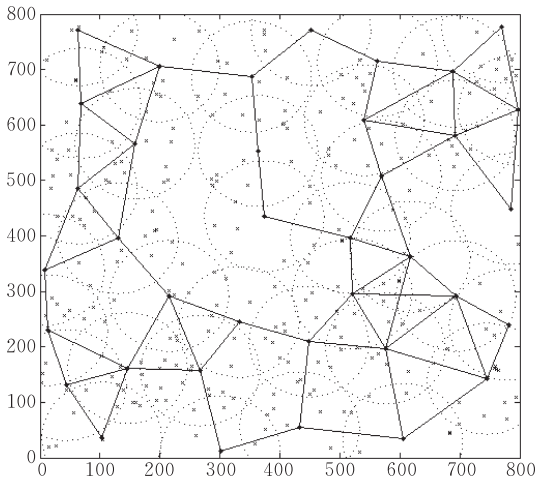


图 8 $R_c=180\text{m}$ 时簇首连通拓扑

图 10 示出了当 $R_b=100\text{m}$ 、 $R_c=210\text{m}$ 时,在 15 次成簇过程中簇首节点与从节点的数量变化,图 11 示出了不同 R_b 值下簇首的平均数量。从图 10 中可以看出历经 15 次成簇过程后,簇首节点和从节点的数量变化始终趋于平稳。这表明在每次成簇过程中,簇首节点产生的数量维持稳定,无异常变动。并且在不同的 R_b 值下,随着网络规模的增大,簇首节点产生的数量趋于收敛,如图 11 所示,当网络中节点数量达到一定规模后簇首节点维持在一个稳定数量,不再随网络规模的增大而增长。因此应用了 LSC 算法的无线传感器网络具有良好的网络稳定性。

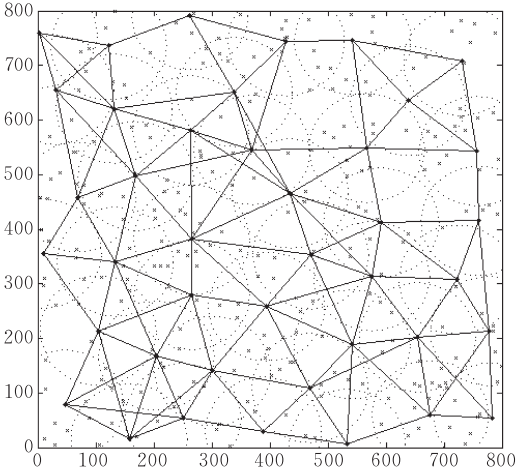


图 9 $R_c=210\text{m}$ 时簇首连通拓扑

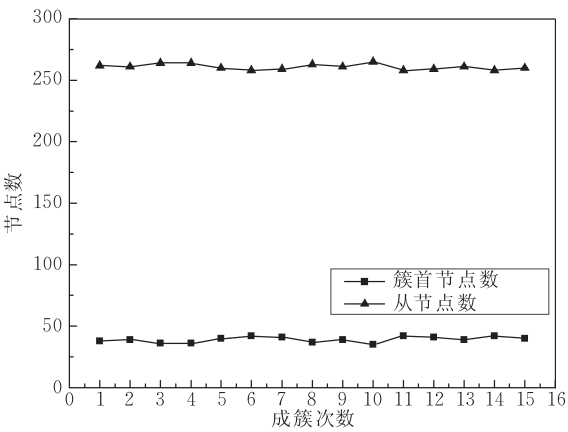


图 10 15 次成簇过程中簇首和从节点数量变化

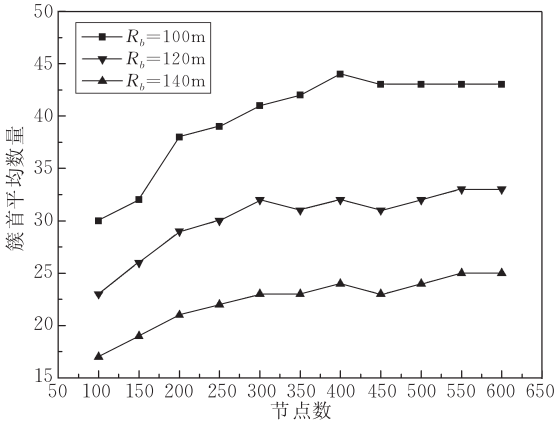


图 11 不同 R_b 值下簇首的平均数量

4.2 网络吞吐量

由于 LSC-RPC 协议是在网络层与 MAC 层进行跨层优化,因此为了评估 LSC-RPC 协议的性能,我们将现有典型的功率控制算法 PCM 协议机制应用于 LSC 算法中.以表 2 所示的协议组合作为对象进行比较分析。

表 2 仿真实验中的对比协议

名称	路由协议	MAC 协议	发射距离
AODV-802.11	AODV	IEEE 802.11	固定发射距离 100m
AODV-802.11	AODV	IEEE 802.11	固定发射距离 210m
LSC-802.11	LSC	IEEE 802.11	固定发射距离, 簇内: 100m; 簇间: 210m
LSC-PCM	LSC	PCM	可变发射距离, 簇内: 100m; 簇间: 210m
LSC-RPC	LSC-RPC		可变发射距离, 簇内: 100m; 簇间: 210m

在相同的仿真环境中,三个源节点向 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三个源节点的有效数据进行分析,得出上述协议的网络有效流量吞吐(单位:Kbits/s)的测试比较,结果如图 12 所示.

从图 12 中可以看出随着网络节点规模增大,节点间的通信竞争更加激烈,上述各种协议的网络有效吞吐量也受到影响,Sink 节点接收到的有效数据随之降低.在同样使用 AODV-802.11 协议的网络中,使用较短的节点发射距离与使用较长的节点发射距离相比,可获得更大的网络有效吞吐量.而采用了基于 LSC 成簇算法的路由协议的网络可获得较 AODV 协议更优的网络有效吞吐,并且随着网络规模的增大,LSC 算法的有效吞吐量较 AODV 协议下降平缓,由此可得出 LSC 算法在适应网络规模的变化上有更好的性能. LSC-PCM 与 LSC-802.11 协议在网络有效吞吐量上具有相似的性能,这说明了 PCM 协议对于网络吞吐量性能并无改进.而本文中提出的 LSC-RPC 协议,由于优化了网络的拓扑连接,采用最小发射功率,并具有反作用于干扰节点

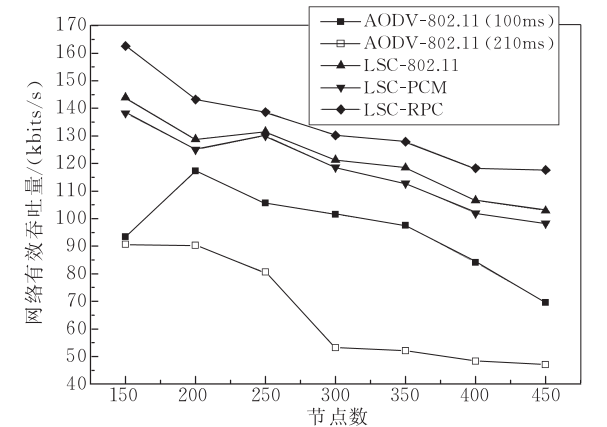


图 12 网络有效吞吐量

的能力来保证节点通信,因而具有较其它对比协议更好的网络有效吞吐性能.

4.3 网络能量有效性

在无线传感器网络中,能量是最关心的问题之一,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延长网络的生命周期.图 13、图 14 示出了未应用功率控制机制的 LSC 算法与 LSC-RPC 协议的网络通信竞争强度.从图中可以看出两种情况相比,未应用功率控制机制的 LSC 成簇网络在保证网络连通的条件下,固定的发射功率使得节点通信竞争激烈,网络竞争密度大;而在应用了 LSC-RPC 协议的成簇网络中,网络的通信竞争强度明显降低.这表明 LSC-RPC 协议对于成簇网络的通信拓扑结构起到了一定的改善作用.

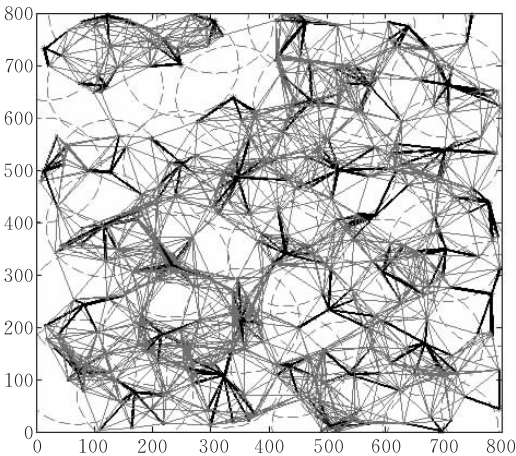


图 13 LSC 算法下的网络通信竞争强度

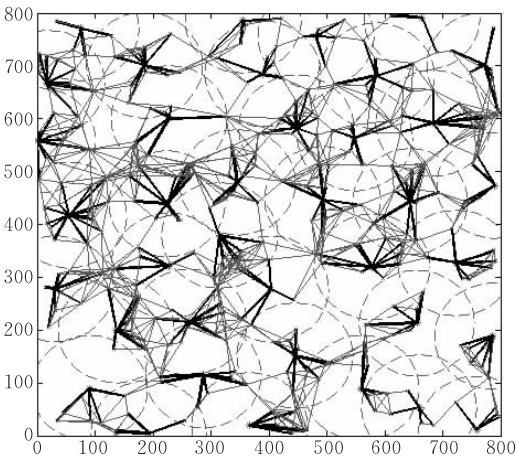


图 14 LSC-RPC 协议下的网络通信竞争强度

我们在网络的平均消耗能量方面对表 2 的五种协议组合进行评估.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 节点所接收到来自于三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:

mj/byte). 五种协议的网络平均消耗能量对比如图 15 所示.

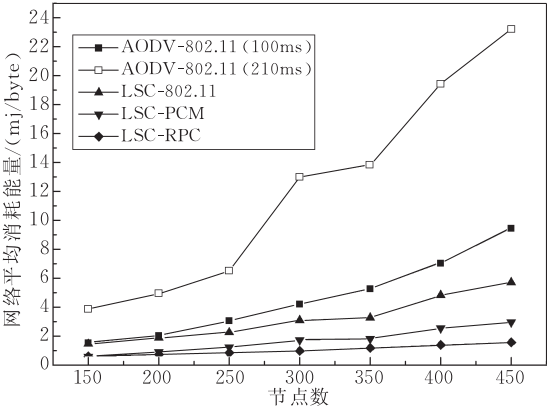


图 15 网络平均能量消耗

从图中可以看出随着节点数量的增加,五种协议的网络平均消耗能量均随之增加. 使用平面路由 AODV 的网络的能量有效性较差,尤其是采用较大发射功率的网络随着节点规模的增大,网络能量消耗急剧增加. 应用了 LSC 成簇算法的网络在能量有效性方面有了明显改善,并且网络能耗随节点规模变化的影响较小,随着网络规模的增大,基于 LSC 成簇算法的网络能耗相对于平面协议增长平缓. 应用了 PCM 功率控制机制的 LSC-PCM 协议对于网络的能量有效性性能起到了一定的改善作用,从图 15 中可以看到,LSC-PCM 协议的网络平均能耗要低于 LSC-802. 11 协议. 然而,本文提出的 LSC-RPC 协议与 LSC-PCM 协议相比,具有更加优越的能量有效性能. 网络能耗不仅受网络规模的变化影响较小,并且平均能耗低于上述所有四种协议. 实验结果表明,优化了网络拓扑结构,使用最小发射功率传递消息,并具有反作用干扰节点能力的 LSC-RPC 协议在提高网络能量有效性性能方面效果显著.

5 实际链路中 LSC-RPC 协议的测试

从上述仿真结果可以看出,功率控制技术对于提升成簇算法的性能有着非常重要的意义,但在实际应用环境中,链路的质量还要受到各种环境因素的影响,这种链路质量的不稳定性将导致功率控制的不确定性. 因此,这种基于静态仿真链路的功率控制技术在实际应用中还将面临许多问题,本文在这一节中就这些问题做初步的探讨.

我们在室内环境布置了 10 个节点作为实验平台,这 10 个节点分布在 5 个房间及过道上,每个节

点从 1 到 10 进行了编号,其中节点 1 作为 Sink 节点(该节点与计算机直接相连,用以对实验数据分析). 如图 16 所示.

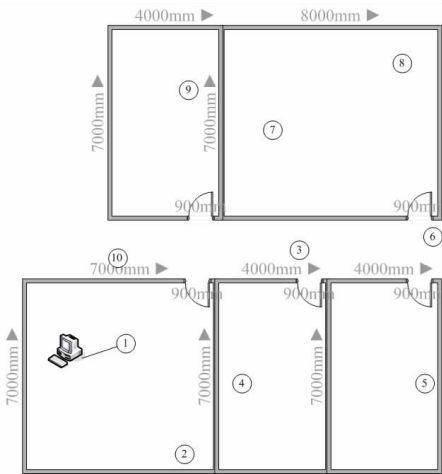


图 16 节点室内分布图

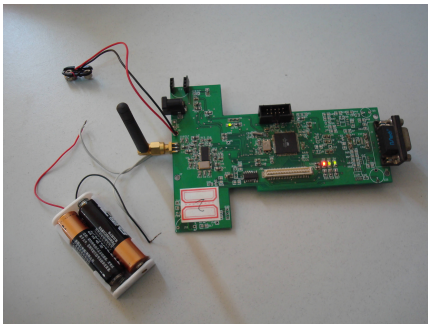


图 17 传感器实验节点

在实验中,我们采用自行设计的传感器实验节点,如图 17 所示. 并通过调节节点的发射功率,来设定每个节点的最大发射功率和最小发射功率,以保证部分节点不能与 Sink 节点直接通信和每个节点至少有两个邻居节点. 在数据传输阶段,簇内节点采集的感测数据我们用模拟数据代替,每个数据包大小为 512 字节,簇头节点在收到簇内节点的感测数据后,仅作简单处理,通过 AODV 路由(在簇头节点采用)传送到 Sink 节点. 实验初步结果表明,在实验过程中,节点电源电压的下降会影响节点的发射功率,由此导致链路不稳定甚至失效;同时,在受到外部干扰(室内的一些无线通信设备,如 WLAN 等)的情况下,数据包的传输延时、丢包率及传输开销明显增加,而且网络吞吐量下降,链路也开始变得不稳定,这表明仿真环境与实际环境有着较大的差别,特别是在条件更恶劣的环境下,因此研究分析不同实测环境下的影响链路质量和功率控制的因素及其相互关系,是 LSC-RPC 算法在实际工程环境中应用

的关键,也是我们下一步重点研究的主要目标。

6 结 论

本文基于无线传感器网络跨层优化策略,针对现有典型成簇算法理论前提条件多、无法适应动态网络、不易在实际环境中实现的不足,提出了一种易于实现、能动态适应网络变化、能量有效性的链路稳定成簇算法。同时将一种具有反作用干扰节点能力、采用最小发射功率传送数据的功率控制机制应用在提出的成簇算法内。在本算法中,传感器节点根据MAC层信息判断是否成为从节点或簇首节点。簇内节点采用较小的发射距离进行连通,而簇间节点则采用较大的发射距离连通。节点间消息的传递采用最小发射功率,引入反作用冲突节点的功率控制机制,从而在降低能耗的同时扩大网络吞吐量。在每轮数据传递完成后,根据能量有效性参数选择出下一轮通信中的簇首节点,以此延长网络寿命。仿真结果表明,本文中提出的算法在保证网络的稳定性的同时,与现有的一些典型协议相比在网络的能量有效性和吞吐量方面具有更好的性能。由于实际链路质量受环境因素的影响较大,从而会给功率控制带来不确定性,因此,基于仿真实验的研究基础上,开展实际环境中链路稳定成簇与功率控制技术的研究,是我们下一步重点展开的工作。

参 考 文 献

- [1] Akyildiz I, Su W, Sankarasubramaniam Y, Cayirci E. A survey on sensor networks. *IEEE Communications Magazine*, 2002, 40(8): 102-114
- [2] Ephremides A. Energy concerns in wireless networks. *IEEE Wireless Communications*, 2002, 9(4): 48-59
- [3] Seema Bandyopadhyay, Coyle E J. An energy-efficient hierarchical clustering algorithm for wireless sensor networks// *Proceedings of the IEEE INFOCOM'03*. New York: IEEE Press, 2003: 1713-1723
- [4] Chao Gao, Jantti R. Link-state clustering based on IEEE 802.15.4 MAC for wireless ad-hoc/sensor networks// *Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference*. Las Vegas, USA, 2006: 499-504
- [5] Heinzelman W, Chandrakasan A. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks. *IEEE Transactions on Wireless Communication*, 2002, 1(4): 660-670
- [6] Shen Bo, Zhang Shi-Yong, Zhong Yi-Ping. Cluster-based routing protocols for wireless sensor networks. *Journal of Software*, 2006, 17(7): 1588-1600(in Chinese)
(沈波, 张世永, 钟亦平. 无线传感器网络分簇路由协议. *软件学报*, 2006, 17(7): 1588-1600)
- [7] Jung Eun-Sun, Vaidya Nitin H. A power control protocol for Ad Hoc networks// *Proceedings of the MobiCom'02*. Atlanta, Georgia, USA, 2002: 36-47
- [8] Narayanaswamy S, Kawadia V, Sreenivas R S. Power control in Ad-Hoc networks: Theory, architecture, algorithm and implementation of the COMPOW protocol// *Proceedings of the European Wireless Conference*. Florence, 2002: 156-162
- [9] Muqattash A, Krunz M. Power controlled dual channel (PC-DC) medium access protocol for wireless ad hoc networks// *Proceedings of the IEEE INFOCOM'03*. San Francisco: IEEE Press, 2003: 470-480
- [10] Kawadia Vikas, Kumar P R. Power control and clustering in Ad Hoc networks// *Proceedings of the IEEE INFOCOM'03*. San Francisco: IEEE Press, 2003: 459-469
- [11] Safwati A, Hassanein H, Mouftah H. Optimal Cross-layer designs for energy-efficient wireless Ad Hoc and sensor networks// *Proceedings of the 2003 IEEE International Performance, Computing, and Communications Conference*. Phoenix: IEEE CS Press, 2003: 123-128
- [12] Sichitiu M L. Cross-layer scheduling for power efficiency in wireless sensor networks// *Proceedings of the IEEE INFOCOM'2004*. Hong Kong, China, 2004, 3: 1740-1750
- [13] Ren Zhi, Guo Wei, Su Jing, Liu Jun. A cross-layer improved efficient AODV routing algorithm. *Chinese Journal of Computers*, 2007, 30(5): 838-844(in Chinese)
(任智, 郭伟, 苏静, 刘军. 基于跨层协同设计的高效 AODV 改进路由算法. *计算机学报*, 2007, 30(5): 838-844)
- [14] Kim Tae-Suk, Kim Seong-Lyun. Random power control in wireless Ad Hoc networks. *IEEE Transactions on Wireless Communication Letters*, 2005, 9(12): 1046-1048
- [15] Li Fang-Min, Xu Wen-Jun, Gao Chao. A power control MAC protocol for wireless sensor networks. *Journal of Software*, 2007, 18(5): 1080-1091(in Chinese)
(李方敏, 徐文君, 高超. 一种适用于无线传感器网络的功率控制 MAC 协议. *软件学报*, 2007, 18(5): 1080-1091)



LI Fang-Min, born in 1968, professor. His research interests include QoS, new network architecture and embedded system.

LIU Xin-Hua, born in 1974, Ph.D. candidate. His research interests include wireless sensor networks and embedded system.

XU Wen-Jun, born in 1983, Ph.D. candidate. His research interests include QoS, wireless sensor networks and embedded system.

HAN Ping, born in 1980, Ph. D. candidate. His research interests include wireless sensor networks and embed-

ded system.

Background

In WSNs, communication is the main factor of energy consumption. Transmission power adjustment during communication can extend the network lifetime. Some researches show that the variable transmission range scheme can improve the overall network performance. Cross-layer design is another way to improve the performance of WSNs. Since the collected sensed data must be reliably transmitted to sink, providing stable links and routings is very important for WSNs. As a very efficient routing strategy, the research of clustering algorithm is popular in WSNs.

The main contribution of this paper is proposing a link-stable clustering algorithm based on cross-layer improving strategy and power control technology. The algorithm can expand the network throughput and reduce the power consumption. The experimental results demonstrate that the novel cross-layer improving protocol which uses clustering and power control scheme provides longer lifetime and higher throughput than the current important protocols while keeping the network stably.