

无线传感器网络功率控制技术*

李方敏⁺, 徐文君, 刘新华

(武汉理工大学 信息工程学院, 湖北 武汉 430070)

Power Control for Wireless Sensor Networks

LI Fang-Min⁺, XU Wen-Jun, LIU Xin-Hua

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

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

Li FM, Xu WJ, Liu XH. Power control for wireless sensor networks. *Journal of Software*, 2008,19(3):716-732.
<http://www.jos.org.cn/1000-9825/19/716.htm>

Abstract: After analyzing the power control mechanisms in wireless sensor networks, the design principles and the classification standards are presented in this paper. Then the fundamental mechanism of the existing representative power control protocols are analyzed in detail, and their classifications, characteristics and performance are compared adequately. Finally, by including the status of current development, the restrictions to the practical applications of wireless sensor networks are summarized, and the importance of establishing an adaptive power control model based on the empirical studies and data analysis method are proposed.

Key words: wireless sensor network; ad hoc network; power control; protocol design; practicality

摘要: 分析了无线传感器网络功率控制机制,归纳总结了设计原则和分类方法,详细介绍了当前典型功率控制算法的核心机制,并比较分析了这些算法的类别、特点和性能差异.最后结合领域内的研究现状,指出了限制无线传感器网络实用化的问题所在,提出了基于实验研究和统计分析方法建立自适应功率控制模型与实现策略的重要性.

关键词: 无线传感器网络;自组织网络;功率控制;协议设计;实用化

中图法分类号: TP393 文献标识码: A

综合了无线通信技术、传感器技术、嵌入式计算技术和分布式信息处理技术的无线传感器网络(wireless sensor network,简称 WSN)已经成为当前国际上备受关注的、涉及多学科高度交叉、知识高度集成的前沿热点研究领域^[1-4].近年来,随着研究的深入,传感器网络技术获得了快速的发展,应用领域越来越广泛,应用针对性也越来越强,并衍生出了无线传感器/执行器网络(wireless sensor and actor network,简称 WSAN)^[5]、多媒体传感器网络(multimedia sensor network,简称 MSN)^[6]等多种新型传感器网络体系.新型传感器网络对于应用相关的要

* Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant No.60773212 (国家自然科学基金); the National Research Foundation for the Doctoral Program of the Ministry of Education of China under Grant No.20050497006 (国家教育部博士点基金); 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 2007-03-25; Accepted 2007-06-29

求更加严格,使得传感器网络应用领域出现了新的特点和方向,并为现阶段及未来的研究工作提出了新的挑战。

随着集成工艺电路的进步,无线传感器网络中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通信模块上^[4]。功率控制技术能够有效减少通信中的能量消耗,是延长传感器网络生命周期的有效手段。此外,它对于网络的拓扑控制与连通性、吞吐量、消息传递的实时性等系统性能具有显著的影响,并可通过网络层、MAC(media access control)层或跨层协议的设计优化网络性能,为系统服务质量(quality of service,简称 QoS)的提升提供有效途径。因此可以说,功率控制技术是无线传感器网络能否成功应用的核心支撑技术。

本文分析总结了近年来这一领域所取得的研究进展和成果。第 1 节阐述并解析传感器网络中的功率控制技术。第 2 节详细介绍和讨论一些典型的功率控制算法。第 3 节总结功率控制技术对传感器网络拓扑控制、网络层和 MAC 层的影响。第 4 节介绍实际环境中的功率控制技术和应用成果。第 5 节对现有的典型功率控制协议算法进行比较分析。第 6 节对全文进行总结并指出未来研究的发展方向及面临的挑战。

1 传感器网络功率控制技术解析

无线自组织网络中的功率控制问题是指分布式系统中的节点在无线通信过程中选择最恰当的功率级发送分组,以此达到优化网络应用相关性能的目的。由于节点发射功率级的选择对网络多方面的性能均会产生影响,因此,网络中的节点采用多大的功率级发送分组是一个非常复杂并具有挑战性的课题^[7-9]。

功率控制对无线自组织网络的性能影响显著,主要表现在以下 5 个方面^[4,7,10,11]:

(1) 功率控制对网络能量有效性的影响

功率控制对网络能量有效性的影响包括降低节点发射功耗和减少网络整体能量消耗。在节点分组传递过程中,功率控制可以通过信道估计或反馈控制信息,在保证信道连通的前提下策略性地降低发射功率的富余量,从而减少发射端节点的能量消耗。随着发送端节点发射功率的降低,其所能影响到的邻居节点数量也随之减少,节省了网络中与此次通信不相关节点的接收能量消耗,达到了减少网络整体能量消耗的目的。

(2) 功率控制对网络连通性和拓扑结构的影响

网络的连通性和拓扑结构均与发射功率的大小有关。节点的发射功率过低,会使部分节点无法建立通信连接,造成网络的割裂;而发送功率过大,虽然保证了网络的连通,但会导致网络的竞争强度增大,从而使得网络不仅在节点发射功率上消耗过多的能量,还会因为高竞争强度导致的数据丢包或重传造成网络整体能耗的增加及性能的降低。网络中的节点可通过功率控制和骨干网络节点选择,剔除节点之间不必要的通信链路,形成一个数据转发的优化网络结构,或者在满足网络连通度的前提下,选择节点最优的单跳可达邻居数目。通过功率控制技术来调控网络的拓扑特性,主要就是通过寻求最优的传送功率及相应的控制策略,在保证网络通信连通的同时优化拓扑结构,从而达到满足网络应用相关性能的要求。

(3) 功率控制对网络平均竞争强度的影响

节点发射功率大小影响着网络的平均竞争强度。设网络中节点密度为 ρ ,发射半径为 r ,则发射节点范围内的邻居节点数量为 ρr^2 ,由于任意一个节点通过的流量与 $1/r$ 成正比,因此可得网络的平均竞争强度与节点的发射半径 r 成正比。功率控制则可通过降低网络中节点的发射功率减小网络中的冲突域,降低网络的平均竞争强度。

(4) 功率控制对网络容量的影响

功率控制对网络容量的影响一方面表现在可以有效减少数据传输节点所能影响的邻居节点的数量,允许网络内进行更多的并发数据传输;另一方面,节点通信的传输范围越大,网络中的冲突就越多,节点通信也就更容易发生数据丢包或重传现象,通过功率控制技术可以有效减小网络中的冲突域,从而降低通信冲突的概率。功率控制在这两方面的作用均有助于网络容量的提升。

(5) 功率控制对网络实时性的影响

无线自组织网络采用多跳路由的方式对消息进行传递,分组的每一跳都会经历处理延时、传播延迟和队列延迟这 3 个阶段。处理延时 T_{proc} 包括接收机接收分组、解码以及重传分组所需要的时间,传播延时 T_{prop} 是分组在介质中传播所消耗的时间,队列延时 T_{queue} 则是分组由于在队列中排队等待所造成的延时。设网络中分组传递

所需的路由跳数为 N , 则端到端(end-to-end)的分组延时见式(1)^[7]:

$$T_{end} = (T_{proc} + T_{prop} + T_{queue}) \times N \quad (1)$$

在网络中较低的发射功率需要较多的路由跳数才能到达目的节点;而较高的发射功率则可以有效减少源节点与目的节点之间分组传递所需的跳数.分组的处理延时正比于路由的跳数,队列延时反比于网络的竞争强度,而传播延时受网络状态的影响较小.由此可见,高发射功率会导致较长的队列延时,而低发射功率则会增加分组的处理延时.文献[7]对不同功率级下的网络实时性表现作了实验分析,实验结果显示,在高负载网络中,分组的处理延时占主导地位,低发射功率网络具有较好的实时性;而在低负载网络中,队列延时将占主导地位,应用高发射功率的网络则会取得较好的实时性.基于上述分析,功率控制可根据网络状态,策略性地改变节点的发射距离,从而使网络具有较好的实时性能.

功率控制技术可运用于多种通信网络中(如蜂窝移动通信网络、WLAN(wireless local area network)、MANET(mobile ad-hoc network)、传感器网络等),但由于系统的应用目的不同,功率控制所起的作用也不尽相同.Ad Hoc 网络的研究工作起步相对较早,研究者们对于功率控制在 Ad Hoc 网络中的应用已经开展了大量的研究工作,并取得了阶段性的研究成果.Ad Hoc 网络是一种面向服务的网络,因此,功率控制在 Ad Hoc 网络中的应用主要以提高系统容量、为用户提供数据分组传输的服务质量保证为目的和设计原则.

传感器网络在某种程度上可以被视为一种特殊的 Ad Hoc 网络,功率控制同样可以被引入到传感器网络中以改善网络的性能.然而,两者之间虽然存在着一些相似之处,但同时也有着很大的差别^[4].传感器网络是集成了监测、控制以及无线通信的资源受限型网络系统,传感器节点具有的能量、处理能力、存储能力和通信能力等都十分有限,能源的高效使用是系统设计的首要目标.资源受限、大规模使用、网络动态性强等传感器网络所具有的系统特性和现实约束使得一些为 Ad Hoc 网络设计的功率控制协议和算法并不能直接适用.但是,由于功率控制对无线自组织网络多方面的性能均有显著影响,因此,国内外不少研究已将功率控制引入到传感器网络的协议设计中.表 1 列举了近年来 Ad Hoc 网络和传感器网络中较为典型的部分功率控制协议.

Table 1 Power control protocols for wireless ad hoc/sensor networks

表 1 无线 ad hoc/传感器网络功率控制协议

MAC-Layer protocols			Network-Layer protocols				Cross-Layer protocols		
PARO (2001)	PCMA (2001)	DCA-PC (2001)	LEACH (2001)		PCR (2001)				
PCM (2002)		Adaptive-PC (2002)		COMPOW (2002)		CPC/IPC (2002)			
PCDC (2003)	APC (2003)	DPCS (2003)	SmartNode (2003)	LMA/LMN (2003)	CLUSTERPOW (2003)	SBPMP (2003)	APC-Clustering (2003)	PBOA/PRUA (2003)	
POWMAC (2004)		DPC (2004)	van Howitt <i>et al.</i> (2004)	PCBL (2004)	PSP (2004)	DRC (2004)	DCe ² S (2004)	TICER (2004)	
DEMAC (2005)	ALCA (2005)	SHUSH (2005)	PCF (2005)	LAPC (2005)	Mark Perillo, <i>et al.</i> (2005)	ESDSR (2005)	MPCP (2005)	MCPR (2005)	CRPC (2005)
Maciej Zawodniok, <i>et al.</i> (2005)	Jae-in Jeong, <i>et al.</i> (2005)		PCSMAC (2005)					MPDA (2005)	
ATPC (2006)		OPCM (2006)		RDPC (2006)	DEER (2006)	RPAR (2006)	CLUSTERPOW-SDV (2006)	Masaki Bandai, <i>et al.</i> (2006)	

□ For ad hoc networks ■ For sensor networks

传感器网络研究领域中出现的新特点和新方向,使得以往主要针对网络能量有效性的研究方法存在着较大的局限性,如果仅满足网络的能耗需求,而不能保证系统运行的其他性能,整个网络则不具有任何实用价值.在现阶段的研究过程中,应从系统的实用性要求出发,对传感器网络按应用进行分类,并针对不同应用类别的特点设计和优化网络实现机制^[2].基于上述分析可以得出传感器网络功率控制技术的设计目的和原则,即针对具体应用分类,通过策略性地改变节点的发射功率,在保证系统性能要求的前提下,尽可能地降低网络的通信能耗,提高能量效率,延长系统的生存时间.

2 典型的功率控制协议与算法

由于单一的协议无法满足系统各种应用的需求,人们研究了众多的功率控制协议.功率控制算法是一个典型的网络控制论问题,可以按照以下方法进行分类^[11,12]:

(1) 开环控制、闭环控制和开环闭环混合控制.开环功率控制是指网络中的节点以反比于接收到的平均功率水平的参数量调整发射功率值;闭环功率控制是指发送节点根据接收节点的反馈控制信息动态地改变发射功率;开环闭环混合功率控制则是将两种控制机制结合应用于网络中.

(2) 集中控制和分布式控制.在集中功率控制机制中,存在一个管理中心集中调整网络中节点的发射功率水平;而在分布式功率控制中则不存在具有集中控制能力的管理中心,每个节点根据局部信息调整自身的发射功率值.

(3) 基于 RSSI(received signal strength indicator)指标、基于 SIR(signal to interference ratio)指标和基于 BER(bit error rate)指标.功率控制可分别以接收信号强度 RSSI、信扰比 SIR 或误码率 BER 为指标,控制调整网络中节点的发射功率值.

(4) 定步长控制和自适应步长控制.定步长功率控制是指节点策略性地以确定的调整步长量控制发射功率值;而自适应步长功率控制则是指节点根据信道变化的估计量自适应地调整节点的发射功率.

(5) 连续控制和离散控制.功率控制过程可以是连续量,也可以是离散量,因此,可分为连续功率控制和离散功率控制.

(6) 单信道控制和多信道控制.单信道功率控制是指网络使用单一共享信道,多信道功率控制则是指采用多个信道完成网络控制和消息传递.

(7) 统一控制和独立控制.统一功率控制是指网络中节点的发射功率可调整,但所有节点均采用同一发射功率值;独立功率控制是指每一个节点均可独立调整自身的发射功率值,网络中节点之间的发射功率水平不尽相同.

(8) 网络级控制、邻居节点级控制和独立节点级控制.此分类方法是对上述方法(7)的进一步细化,它基于分组级分析方法,从网络自身角度出发对功率控制算法进行分类.网络级功率控制是指网络所有节点均使用统一的功率控制值发送分组;邻居节点级功率控制是指每个发送节点均使用可覆盖所有邻居节点的功率值发送分组,节点之间的发射功率值并不相同;独立节点级功率控制则是指发送节点可以针对每个单一的目的节点自适应地调整发射功率水平.

传感器网络的研究大致经过了两个阶段:第 1 阶段主要偏重利用 MEMS(micro electromechanical systems) 技术设计小型化的节点设备;对于网络本身问题的关注和研究则被认为是传感器网络研究的第 2 个阶段,目前已成为无线网络研究领域的热点^[3].基于此,本文从网络问题层面的角度出发,根据方法(8)对功率控制问题各种协议和算法进行分类和总结,详细介绍一些典型的功率控制协议算法研究成果,并对各种协议算法的优缺点进行深入分析.

2.1 网络级功率控制

(1) CPC (common power control)^[13]

在 CPC 协议中,每个节点通过本地信息确定与邻居节点的最优发射功率,并通过洪泛机制将所有节点最大的最优发射功率值确定为全网统一发送功率.CPC 协议的核心思想是取保证网络连通的最小发射功率值作为全网的发射功率,以此达到降低网络能耗、扩大网络容量的目的.但是,文献[14]通过理论分析得出,保证全网连通的最小传输功率虽然在高密度网络中能够取得较好的性能表现,但并不具有典型性.网络最优传输功率往往与移动节点密度、网络规模和流量负载密切相关.

(2) COMPOW (COMmon POWer)^[15]

文献[15]提出的 COMPOW 协议在网络中使用统一的发射功率,旨在保证整个网络在有效连通的状态下,以最低的发射功率完成消息的传递.每个节点上以多个使用不同发射功率级的路由代理(Agent)对网络进行探

测,每个路由代理维护一个路由列表.完成全网探测后,比较各个路由代理最后得到的路由表项数,取其中发射功率最小且所形成的网络路由表项数和以最大发射功率所得的路由表项数一致的那个发射功率作为全网统一的发射功率.COMPOW 可以降低网络能耗,扩大吞吐量,并且不存在不对称发射功率导致的隐蔽站问题严重的现象.然而,COMPOW 在全网内仍然使用统一的发射功率,而不是针对不同目的节点自适应地调整到最优发射功率,因此还是不可避免地引入了不必要的能量消耗和信道噪声,多个路由代理在探测网络路由时也会带来大量的额外开销.

2.2 邻居节点级功率控制

(1) CLUSTERPOW(CLUSTER POWER)^[16]和 CLUSTERPOW-DSDV(destination sequenced distance vector-based CLUSTERPOW)^[17]

当网络中节点分布不均时,为了与其他稀疏区域的节点通信,集中区域中的发送节点往往会提高自身的发射功率.这种情况将导致节点发射功耗过高,网络容量也会受到影响.CLUSTERPOW 是一个针对非均匀分布网络的功率控制路由协议.协议将网络根据不同的传输功率级进行一种隐式分簇,各簇内并不存在簇首或网关节点.每条路由则是由形成网络内各种簇结构的不同功率级所组成,节点以不同的功率级别发送 HELLO 消息对网络进行探测,并为每个功率级维护一个路由列表.在转发数据时,节点查找这些路由列表,以能够到达目的节点的最小功率级别的下一跳节点作为转发节点.CLUSTERPOW 协议能够针对目的节点自适应地调整到最优发射功率,而不是全网使用统一的发射功率,如图 1 所示.它在非均匀分布网络中具有更好的能量效率.然而,每个节点需要为多个功率等级维护一个路由列表,这无疑会增加节点的存储负担.针对 CLUSTERPOW 中多个路由代理在探测网络时给网络带来大量额外开销从而增加网络能耗的问题,文献[17]将 DSDV(destination sequenced distance vector)路由与 CLUSTERPOW 相结合,提出适用于传感器网络的 CLUSTERPOW-DSDV 路由协议,从而通过减少路由开销降低网络的能量消耗.

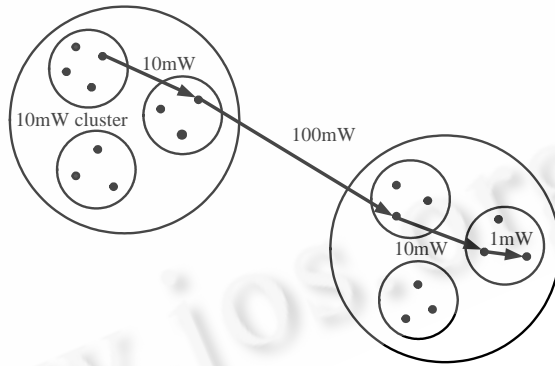


Fig.1 Routing by CLUSTERPOW in a typical network

图 1 CLUSTERPOW 在一个典型网络中的路由路径

(2) LAPC(load-aware power control)^[10]和 RPAR(real-time power-aware routing)^[18]

一些应用对于网络的实时性能要求较高,文献[10]针对这类应用的性能要求,提出了以降低网络端到端延时的为目的的功率控制协议——LAPC.在协议中,每个节点具有固定数目的传输功率级,并对于每个功率级维护一个路由列表.LAPC 引入了“安全比率”概念.“安全比率”值 β 与邻居节点的状态有关,参与竞争通信的邻居节点越多, β 值越大,反之则越小.节点可根据网络的负载状态估计出 β 值,并根据 β 值大小通过动态地调整发射功率大小来降低通信端到端的延时.如图 2 所示,当节点估计得到的 β 值小于 33.33%时,表明图 2(a)中的 3 个发射功率均不满足 LAPC 的条件,节点采用可保证网络连通的最低发射功率传递消息.当 β 值超过 33.33%时,节点调整发射功率级为 P_1 .当 β 值的的增长分别超过 37.5%和 43.75%时,这表明周围网络环境的竞争更加激烈,发送节点增大发射功率,分别以发射功率级 P_2, P_3 进行消息的传递.仿真实验结果显示,通过估计网络竞争状态调整发射功率

大小的 LAPC 协议,与不同级的定发射功率网络相比,在具有较好能量效率的同时,有效地降低了通信的端到端延时.该协议也存在一些不足之处,如未考虑节点的移动和拓扑改变对于协议性能的影响等.

RPAR 是一个针对传感器网络设计的实时相关功率控制路由协议.基于实际平台测试得到的数据,分析出发射功率大小、链路质量和网络负载量对于消息的传递速率具有直接影响.根据得到的分析结果,RPAR 结合动态速率分配、延时估计、转发选择和邻居节点管理等 4 种策略,在保证消息实施传递的同时,尽可能地降低网络能耗.网络启动后,发送节点首先估算出到达目的节点的要求传递速率,同时对于高要求速率的分组优先发送.在分组转发时,针对每个邻居节点,根据节点距离和所需发射功率计算出传递速率,选出高于要求传递速率的邻居节点,此后,根据通信能耗以及延时估计器得到的传递延时选出最优的转发节点.若现有邻居列表中的节点都无法满足性能要求,发送节点则通过增大发射功率选择新的符合条件的邻居节点.在 Prowler^[19]仿真平台中的实验结果显示,传感器网络在实时性和能量有效性方面具有良好的性能表现.但是,RPAR 设定每个节点知道自身位置,并且在布置后不再移动,这使得协议的应用具有较大的局限性.

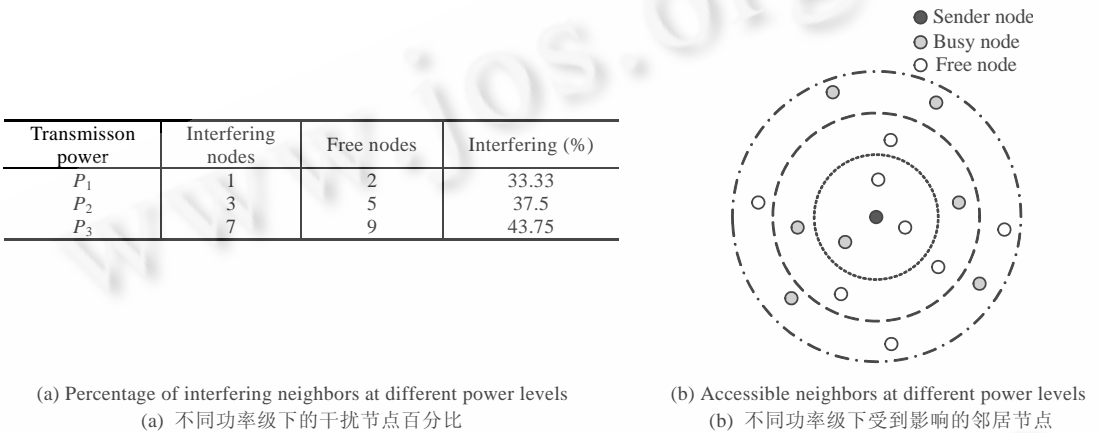


Fig.2 Basic operation of LAPC

图 2 LAPC 的基本机制

(3) 优化邻居节点选取的功率控制协议^[4,20,21]

网络拓扑控制对于无线传感器网络的网络性能影响很大,网络中的每个节点可以通过功率控制机制调节发射功率,以均衡节点的单跳可达邻居数据的方式优化网络拓扑结构,改进系统的相关性能.文献[20]提出了本地平均算法 LMA(local mean algorithm)和本地邻居平均算法 LMN(local mean of neighbors algorithm)这两种基于节点度的功率控制算法.该算法的核心思想就是给定节点度的上限和下限,动态地调整节点发射功率,使节点的度数始终维持在度数的上限和下限之间.这种算法利用局部信息来调整相邻节点的连通性,从而在保证网络连通的同时使得节点间的链路具有一定的冗余性和扩展性.仿真结果显示,这种策略在保证网络连通的同时,通过少量的局部信息使网络性能达到了一定程度的优化.但是,这两种算法缺乏严格的理论推导.文献[21]在一些理论成果上总结出了自组织网络中节点最优邻居数量,提出的 PSP 算法通过基于节点度的功率控制策略,使每个节点维持一个最优的邻居列表,从而达到优化网络拓扑结构的目的.实验结果显示,该算法有效地扩大了信道复用率,使网络容量得到了提升.

(4) RDPC (relay deployment and power control)^[22]

传感器网络中 Multipoint-to-Point 的通信机制使得网络中的传感器节点越靠近 Sink,能量就消耗得越快.文献[22]针对这种现象,将“中继节点”的概念引入传感器网络,提出了联合中继功率控制算法——RDPC.中继节点具备除了感知功能以外传感器节点的一切功能,在网络中加入中继节点来分担网络中的通信负荷.

文献[22]假设网络为一个圆形区域,Sink 节点位于圆心.所有节点以一定的密度分布在网络中,节点的分布服从泊松分布.首先,通过传感器节点与 Sink 节点的距离的关系估算出网络中任意一个节点到圆心的距离与能量负荷的关系,推出最佳分布密度与最佳发送范围的关系,见式(2):

$$\rho_r^*(d) = \frac{S_1(t^*(d))^a + S_2((t^*(d))^a - (t^*(D))^a)}{S_2(t^*(D))^a} \rho_s \quad (2)$$

然后,推导出与圆心距离为 d 的中继节点密度和传感器节点密度 ρ_s 与最大发送范围 t_s 的关系,从而得到中继节点分布密度,见式(3):

$$\rho_r(d) = \begin{cases} \frac{\beta(d)(D^2 - d^2)}{\pi t_s^2} \rho_s, & d > t_s \\ \frac{D^2}{t_s^2} \rho_s, & d \leq t_s \end{cases} \quad (3)$$

但由式(3)可知,即使是在 Sink 节点的一跳范围内,仍有可能需要超过原来整个网络节点数的中继节点,因此,我们引入功率控制机制解决此问题.以圆心为中心将网络平均划分为 M 层,每一层中继节点的分布密度为 ρ_m .第 m 层所有的节点都使用发送功率 t_m ,并计算得出最优的 ρ_m 值和 t_m 值.实验结果表明,在联合中继功率控制机制 RDPC 中,中继节点以相对较低的密度加入到网络中,分担了传感器节点的通信负荷,能量消耗平均分担到网络中所有的节点上,从而解决了瓶颈节点的问题.此外,通过功率控制减小了所有节点的发送范围,延长了网络的寿命.RDPC 并不需要严格地指定中继节点部署位置.然而,它忽略了接收数据和处理数据的能量消耗,并且假设的环境过于理想化.

2.3 独立节点级功率控制

(1) BASIC^[23]和 PARO (power-aware routing optimization)^[24]

文献[23]中发送节点以最大传输功率向目的节点发送 RTS,目的节点接收到 RTS 后,根据接收到的分组能量以及接收门限计算出成功发送分组所需的最小发射功率值,并将该值通过 CTS 以最大功率返回给发送节点.此后,通信节点间的数据包 DATA 使用计算所得的最小值进行传送.该机制以最大功率发送 RTS/CTS,通知邻居节点退避至本次通信结束,以最优功率发送 DATA,从而达到降低节点通信能耗的目的.这是早期的一种典型独立节点级功率控制,人们将这种算法称为 BASIC 协议.

不少研究成果也采用了与之相似的功率控制机制^[24-26].在文献[24]中,Gomez 等人提出了 PARO 协议,该协议以一条路由上每一单跳的发射功率作为标准,在一对通信节点间选择一条所需总能耗最低的路由路径.发送分组时,如图 3 所示,以最大功率发送 RTS/CTS,以计算得到的到达目的节点所需最低功率发送 DATA/ACK.这类功率控制机制,在节点发送数据包时可以有效降低传输能耗.但如图 4 所示,它会导致在载波侦听环带中的节点,在退避了 EIFS(extended InterFrame space)向量后,由于侦听不到 DATA/ACK 的传输,从而与正在发送的 DATA/ACK 发生通信碰撞.这会使网络中隐蔽站问题变得比较严重,由于过多的冲突导致节点数据重传,同样会增加网络的总体能耗.BASIC 类协议主要关注于通过功率控制降低节点通信能耗,其他网络性能并没有得到改进.

(2) PCM (power control MAC)^[27]和 DPC (distributed power control)^[28]

为了解决 BASIC 协议中存在的隐蔽站问题,文献[27]提出了 PCM 协议.PCM 与 BASIC 的方法相似,不同之处在于 PCM 利用了载波侦听环带中节点存在的 EIFS 向量来避免隐蔽站问题.如图 5 所示,通信节点之间的 RTS 和 CTS 仍以最大功率发送.为了使载波侦听环带中的节点在数据传输过程中一直能够侦听到通信的存在,发送节点在发送数据包 DATA 时以小于 EIFS 的时间间隔,周期性地将发射功率增加到最大.这种机制使得载波侦听环带中的节点在退避 EIFS 向量后仍能侦听到 DATA 信号的存在,从而退避至本次通信结束.PCM 在降低通信能耗的同时,有效地改善了隐蔽站的存在所带来的问题.然而,PCM 协议在提高信道利用率、扩大网络吞吐量方面并没有得到改进.

文献[28]针对无线自组织网络中的不确定因素,如路径损耗、shadowing 效应、瑞利衰落等,提出了一种分布式的功率控制 MAC 协议——DPC.该算法通过快速地估算信道的时变特性,根据获得的信息计算出满足目的节点接收信扰比 SIR 要求的最优发射功率.为了避免隐蔽站的问题,DPC 也采用了与 PCM 相似的机制.与 PCM 的不同之处在于,DPC 只是在最初的 RTS/CTS 握手时采用完整的发射功率,之后的控制帧均只在帧头处扩大发

射功率,从而进一步的减少了节点的通信能耗.

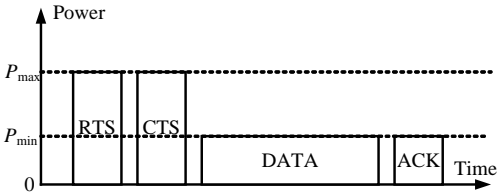


Fig.3 PARO transmit power level

图3 PARO 发射功率水平

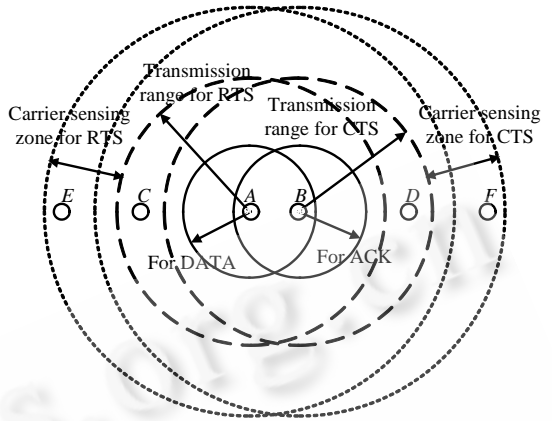


Fig.4 BASIC power control scheme

图4 BASIC 功率控制策略

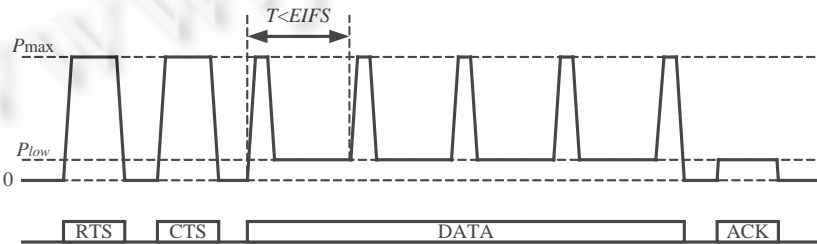


Fig.5 PCM transmit power level

图5 PCM 发射功率水平

(3) PCDC (power controlled dual channel)^[29]

文献[29,30]都是将多信道机制结合到功率控制中,把原始信道划分为控制信道和数据信道这两类信道.文献[29]提出的基于网络层和 MAC 层交互作用的双信道功率控制协议 PCDC 是这类协议的典型代表.它以控制信道得到的信息指导数据信道中消息传递的功率控制,协议通过 RTS-CTS 或 HELLO 分组的交互,可计算出保证网络连通的每个节点的最小邻居节点集,从而确定对于每个邻居节点的最小成功发射功率.在数据信道以计算得到的最小发射功率进行数据包的传递,以此达到降低能耗、增加网络容量的目的.文献[30]则是使用了多个数据信道,在通信时与邻居节点通过协商获得信道的使用.多信道技术可以有效减轻功率调整所带来的碰撞冲突.但是,这些协议仍然以最大功率的 RTS/CTS 来解决隐蔽站问题,因此会带来不必要的能量开销.此外,PCDC 在确定节点连接后,就固定使用此功率等级,从而无法适应动态的网络变化.

(4) PCMA (power-controlled multiple access)^[31]

文献[31]提出了使用忙音信号避免通信冲突的功率控制 MAC 协议——PCMA.该协议采用了双信道机制,一条信道用来发送忙音信号,而另一条信道则以 RPTS-APTS-DATA-ACK 的握手机制完成消息的传递.PCMA 中的节点通过 RPTS(request-power-to-send)和 APTS(acceptable-power-to-send)两种控制帧的交互获得成功传递消息所需的最小发射功率,从而以此最小发射功率进行数据包的传递.为了避免通信冲突碰撞,协议定义每个接收节点接收数据时,在忙音信道上发送忙音信号来声明自身的冲突功率阈值,其他节点则通过监听到的忙音信号强度界定发射功率值,在发送信号时不超过该功率,以此避免与正在发送数据的邻居节点产生冲突,从而提升网络吞吐量.文献[32]则采用双忙音信号策略,发送节点和接收节点都能够在忙音信道内发射忙音信号,从而在实现功率控制的同时避免不对称发射功率所造成的冲突恶化问题.这类协议的缺点在于,忙音信号自身会造成

新的竞争,并且它会使网络的公平性降低,协议更有利于较小功率的短距离通信,而较大功率的长距离通信由于更容易受到忙音信号的限制,往往难以成功开展.

(5) DEMAC (distributed energy-aware MAC)^[33]

由于节点的移动、加入和失效等原因,使得网络的拓扑结构会动态地发生变化.文献[33]针对网络的动态性特点,提出了一种能够自适应网络拓扑变化的功率控制 MAC 协议——DEMAC.协议基于 Honey Grid 模型得出了网络能耗和吞吐量的最优发射功率计算值,通过 RTS 获取网络状态信息,CTS,DATA,ACK 则通过计算得出最优发送值. DEMAC 中的每个节点都维持有记录列表(recording table,简称 RT)和查找列表(checking table,简称 CT).记录列表是一个信息列表,它包含了当前最新的邻居节点状态信息;而查找列表则是一个功率列表,它维持了 6 个等级的发射功率水平.当通信开始时,发送节点首先在记录列表中查找接收节点.若查找到接收节点,发送节点则以当前功率级发送 RTS;若未查找到接收节点,发送节点则根据查找列表,通过扩大 RTS 发送功率级的方式继续查找,直至到达最高发射功率值为止. DEMAC 在节点移动的网络中仍能有较好的性能表现,但是两个列表的动态维护会增加节点计算和存储的负担.

(6) SHUSH^[34]

功率控制中不对称的发射距离会使网络中隐蔽站引起的问题更加严重,而一些协议中的最大功率发射控制帧或突发数据帧也会给网络带来过多的能量消耗.为了使这些问题得到改善,文献[34]提出了一种反应式功率控制 MAC 协议——SHUSH.节点在最初的通信过程中,所有的控制分组和数据分组均采用最优发射功率进行传送,以此最大化地降低通信能耗.当节点通信受到干扰时,SHUSH 采用一种“中断恢复”机制中断本次通信,并从干扰节点的 DATA 或 ACK 处获得干扰节点的相关信息.当干扰节点完成通信后,被干扰节点立即接入信道.如图 6 所示,协议也采用扩大发射功率的方式,以到达干扰节点的最小功率通知干扰节点不再干扰本次通信,并完成余下的消息传递.仿真实验结果显示,SHUSH 在降低网络能耗、改善网络吞吐量、公平性等性能上比一些典型功率控制协议有更好的表现.然而,随着网络规模的增大,协议对于网络吞吐量、能量效率等性能较之其他典型协议已无明显优势,这是由于该协议中不对称发射功率造成的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.

(7) POWMAC (POWER MAC)^[35,36]

文献[35,36]提出的 POWMAC 是一种针对单收发机、单信道系统架构设计的,利用接入窗口机制(access window,简称 AW)扩大信道复用率、提高网络吞吐量的功率控制 MAC 协议. POWMAC 在传统的 RTS/CTS 交谈机制中加入了一个特殊的控制帧 DTS(decide-to-send).协议控制帧中的冲突避免信息 CAI(collison avoidance information)可以被其他潜在的干扰节点用来判断自身的通信是否会干扰到正在进行传输以及使用多大的发射功率才不会影响正在进行的数据传输.如图 7 所示,如果节点 A 准备向目的节点 B 传递消息,在节点 A 发送的 RTS 帧中除了包含源节点 ID 号、目的节点 ID 号、本次通信所需时间以外,还会注明接入窗口大小和使用的最大发射功率等信息.节点 B 在接收到节点 A 发送的 RTS 后,通过接收到的信息计算出两点间成功通信所需的最优发射功率值,并将该值和冲突避免信息包含在 CTS 中回复给节点 A.节点 A 在接收到 CTS 后,发送 DTS 控制帧通告邻近节点数据传输所使用的发射功率及时间,避免产生通信碰撞.控制帧 CTS 和 DTS 均以能够到达所有潜在干扰节点的发射功率传送.此后,节点 A 将退避接入窗口大小的时间,等待其他需要传递消息的节点(例如节点 E,F)完成控制帧 RTS/CTS/DTS 的交换后,以最优的发射功率传递数据包及 ACK 帧. POWMAC 通过动态调整数据包的发送功率,使得附近满足干扰限制的节点能够并发传递消息,以此提升信道复用率,扩大网络吞吐量.

(8) PCSMAC (power controlled sensor-MAC)^[11]

文献[11]将功率控制与传感器网络的典型 MAC 协议 SMAC 相结合,提出了 PCSMAC 协议.在 SMAC 中,每个节点用 SYNC 消息通告自身的调度信息,同时维护一个调度列表. PCSMAC 利用 SMAC 的这个机制,每个节点根据收到的 SYNC 消息计算出节点自身到各相邻节点所需的最小发射功率,并将所有相邻节点的调度信息(包括自身节点到相邻节点的最优发射功率调度)保存在调度列表中.数据传输仍采用 RTS/CTS/DATA/ACK 的通信形式(广播包除外).在传输的每个分组中都有一个时间域值,表示剩余通信过程所需要的持续时间长度.邻

居节点侦听到分组时,记录这个时间域值,同时进入睡眠状态至本次通信结束.节点的发射功率控制依据自身的发射功率表调度,RTS/CTS/ACK 以到达最远相邻节点的最小发射功率传送,从而以最小的功耗确保所有相邻节点在通过程中进入睡眠状态,如图 8 所示.PCSMAC 改进了数据包 DATA 的帧结构,如图 9 所示.节点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,载波侦听环带中或新近苏醒、加入的节点不会对通信产生冲突.PCSMAC 协议将功率控制运用到了 SMAC 协议中,降低了网络的能耗,但由于其使用的功率控制技术与 PCM 协议较为相似,因而在网络吞吐量方面并没有得到改进.

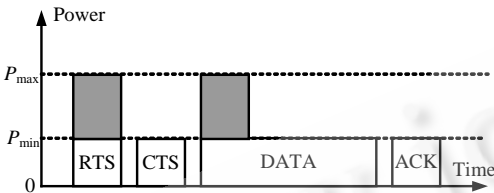


Fig.6 SHUSH transmit power level
图 6 SHUSH 发射功率水平

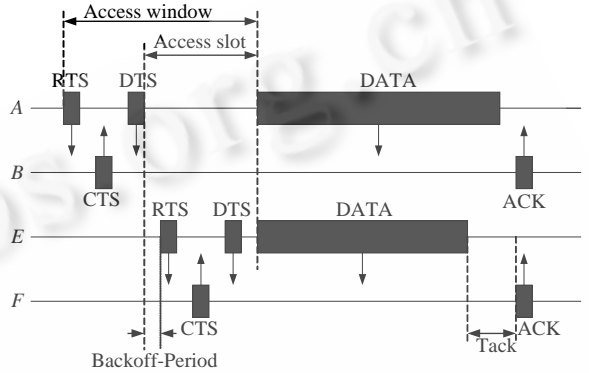


Fig.7 Basic operation of POWMAC
图 7 POWMAC 的基本机制

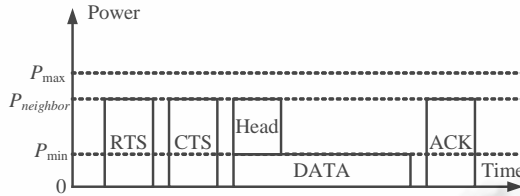


Fig.8 PCSMAC transmit power level
图 8 PCSMAC 发射功率水平

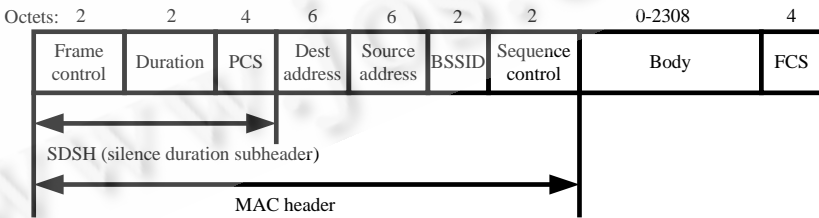


Fig.9 MAC data frame for DATA in PCSMAC
图 9 PCSMAC 中数据包 DATA 的 MAC 帧结构

3 功率控制对传感器网络拓扑控制、网络层和 MAC 层的影响分析

功率控制和无线自组织网络的许多协议层都紧密相关,它影响物理层的链路质量、MAC 层的带宽和空间重用度、网络层的可选路由和转接跳数、传输层的拥塞事件等^[8].无线传感器网络往往规模庞大、节点分布密集、网络拓扑易变,并且对能量效率的要求也十分严格.基于此,功率控制对传感器网络性能的优化主要集中在网络拓扑控制、网络层和 MAC 层这 3 个方面.

在传感器网络中,网络的拓扑控制和优化有着十分重要的意义,主要体现在以下几个方面^[4]:影响整个网络的生存时间;减小节点间通信干扰,提高网络通信效率;为路由协议提供基础;影响数据融合;弥补节点失效的影响.功率控制可在满足网络覆盖度和连通度的前提下,通过改变节点发射功率的大小,选择最优的邻居节点,并删除不必要的通信链路,从而针对应用要求优化网络的拓扑结构.文献[37]从理论上得出了保持整个网络连通的最小功率.文献[20,21]是基于节点度数的控制算法,通过调整发射功率的大小,每个节点维持一个合理度数的邻居节点数量,从而优化网络的拓扑结构,提升信道复用率,降低竞争强度.文献[21]还从理论上总结出最优的邻居节点个数.对于节点分布不均匀的网络环境,CLUSTERPOW 则采用三级功率控制策略维护邻居列表,根据区域节点密度自适应地调整发射功率.在一些层次型的拓扑控制算法中也应用了功率控制策略.在最典型的成簇算法 LEACH(low energy adaptive clustering hierarchy)^[38]中,推选出的簇首节点通过扩大发射功率直接与 Sink 节点通信.而文献[39]提出的成簇算法则采用大、小两级发射功率进行簇间和簇内的通信连接.

网络层中的功率控制与拓扑控制联系得非常紧密,并且对于消息的多跳传输影响显著.它通过动态地改变发射功率大小,在保证网络连通的前提下优化网络拓扑结构,选择最优的路由传播路径,从而在满足性能要求的同时,尽可能地提高网络的能量效率.COMPOW 在保证最大功率拓扑结构的同时,将传输功率降到最低,从而减少整个网络的通信开销.LAPC 和 RPAR 则是侧重于改善网络的实时性能.功率控制对于路由协议的设计影响显著,许多研究也是通过网络层中的功率控制技术改善传感器网络的应用相关性能.

网络层功率控制是一种全局性的优化策略,而 MAC 层中的功率控制则是根据局部信息优化网络性能^[7].MAC 层功率控制在 TDMA 网络、CDMA 网络中的目的主要是根据控制信息,尽可能地减少节点间的传输能耗;而在基于竞争的 CSMA 网络中,其主要目的则是降低网络竞争强度,扩大信道复用率,满足优化网络的性能要求.PCM,DPC 等算法通过周期性地扩大发射功率来避免不对称发射功率的碰撞问题;PCDC 等算法则引入了多信道技术;SHUSH 为最优功率传输的性能保证提供了解决方案;PCSMAC 则将功率控制与 SMAC 相结合,应用到传感器网络中.基于 MAC 层的功率控制研究相对较多,围绕克服功率控制中理论上存在的局限性也取得了一些阶段性的成果.传感器网络由于资源和应用要求的限制,因此更关注于提升网络的能量效率.

功率控制还是一个典型的跨层优化问题^[7,40].基于功率控制的跨层优化可以通过各层之间全局性能信息的交互和协作,根据系统的应用目标、约束条件和网络特征策略地调整发射功率大小,提升网络相关性能,从而满足用户对于不同服务目的和网络质量的要求.传感器网络中的功率控制跨层优化研究也已取得了一些初步性的成果^[41,42].

4 基于实际应用环境的传感器网络功率控制技术

随着研究领域工作的开展和深入,纯粹的理论研究已很难满足传感器网络发展的需要,国内外的研究热点也正逐步向基于实际环境的应用研究转变.现有的大部分功率控制算法均是基于仿真实验平台进行的理论研究.虽然仿真实验具有周期短、成本低等优点,但由于现有的无线网络仿真平台基本上并未考虑现实环境中时空域因素对于节点无线通信质量的影响,因此,节点的链路环境是一个静态量,这显然与实际应用中的链路状况不相符合,使得基于理论环境设计出的协议算法是否还能在实践环境中取得期望的性能效果成为研究领域中必须面对的问题.

不少研究者已经注意到传感器网络中仿真环境与实际应用环境链路存在的差异,围绕这一课题展开了大量的工作.文献[43-46]基于实测平台分析、研究了不同实际环境中定发射功率下节点的链路状态.测试结果表明,在节点发射功率恒定、通信距离不变的条件下,接收节点处所收到的信号强度和链路质量是一个动态的变化量,并且随着时间的推移和环境的改变,往往还会发生较大的变动.这与仿真平台中的链路环境存在着很大的差异,从而使得现有的一些理论上的协议算法在实践应用环境中并不能取得期望的性能表现.然而,这些成果都是在节点定发射功率状态下进行的,对于节点发射功率在动态变化,即真实环境中应用了功率控制技术的传感器网络所受到时空域的影响则并未探讨分析.

文献[47]较早地开展了传感器网络功率控制在真实环境中的应用研究.Son 等人基于包含了 Mica2 传

感器节点的 PC104 测试平台,首先分析了链路状态对于传感器网络系统性能的影响,发现真实环境中不稳定的通信链路较无链路连接对于网络性能所造成的损害更大.然后,在多种测试条件下,分析了节点发射功率变动对于网络链路质量的影响.基于所得到的实验结论,提出了将功率控制与“黑名单”机制相结合,以提高链路可靠性和降低通信能耗为目的的 PCBL(transmission power control with BlackListing scheme)算法.该算法通过策略性地改变发射功率大小来维护有效链路的可靠性,并将余下不可靠的链路信息列入“黑名单”,从而在网络通信中去掉不可靠通信链路.实验结果表明,该算法有效地保证了传感器网络节点通信链路的健壮性.然而,该研究成果所采用的测试平台并不存在能量供给上的限制,因此,与工程应用中的传感器网络还是存在着差异.基于此,文献[48]采用由 78 个能源有限的 Mica2 节点所组成的传感器网络作为测试平台,并针对多种网络流量模式提出了以改进网络吞吐量、公平性和能耗等性能的邻居节点优化功率控制算法.该算法基于 RSSI 指标通过功率控制机制优化选择邻居节点,保证网络链路质量.文献[47,48]基于实际网络平台研究分析了真实环境应用中的传感器网络功率控制机制,并提出了改进方法.然而,这些研究成果仅关注于确保通信连通,维护网络链路质量,对于功率控制通过网络策略调度改进系统性能的作用则并未深入探讨.

文献[12]深入探讨了时空域因素对传感器网络功率控制的影响.Lin 等人分别在草地、停车场、室内等不同场景(如图 10 所示)使用 MICAz 节点进行了大量的实验测试,发现时空域因素对传感器网络功率控制的应用性能影响显著.根据实验所得的结果,总结和分析了发射功率变化时传感器网络链路的特性和变化规律,并建立了更加接近实际状态的传输链路模型.在模型基础上,提出了一种基于反馈控制,能够自适应链路环境变化的轻量级传输功率控制算法——ATPC(adaptive transmission power control).在由 43 个 MICAz 节点组成的网络平台上,经过 72 小时的测试显示,在时空域变化的真实环境中,该算法较之静态传输功率具有更好的通信链路质量和能量效率.然而,ATPC 也是将工作重点放在了维护网络的链路质量上,并且该算法仅仅是针对 TDMA 这种不存在竞争的网络环境设计,无法直接适用于 CSMA 网络,因此,算法仍存在许多有待改进的地方.文献[49]对于传感器网络中存在的并发通信导致的网络竞争问题,基于由 Mica2 节点组成的测试平台进行了系统的实验分析,指出了“捕获效应(capture effect)^[50]”技术可在实践环境中有效改善网络竞争问题,并在此基础上做了改进工作.文献[12]在未来的改进工作中也提及了“捕获效应”技术.



Fig.10 Experimental sites in ATPC

图 10 ATPC 中的实验场景

目前,实用化的传感器网络功率控制技术研究尚处于起步阶段.已有的一些成果仅停留在改善网络链路质量的层面上,对于在网络策略层面改进系统性能,尤其是在实践环境中改善功率控制本身具有的理论缺陷等方面的研究工作开展得仍然较少.一些已有的实用化功率控制算法由于采用的是最基本的功率控制理论,使得算法只能适用于无竞争的 TDMA 网络,无法应用于 CSMA 网络,从而在实践中存较大的应用局限性,与实际需求还有相当大的距离.实用化的性能改善研究将是未来传感器网络功率控制领域的研究热点,因此,需要研究者们进一步的关注、开展和深入.

5 算法比较与分析

综上所述,我们看到了许多围绕网络性能优化而提出的功率控制算法.由于传感器网络具有应用相关的特点,并且功率控制对于网络多个方面的性能均会产生显著影响,因此,基于不同应用环境和设计目标,所采用的

策略以及在系统中的表现也不尽相同,这也使得功率控制协议具有多样性的特点,难以通过简单的比较说明哪个协议更加优越.为了能够进行比较全面的说明,我们采用列表的方式对上述列举的各种典型功率控制算法进行综合比较分析.表 2 对重点讨论的功率控制协议进行了分类比较.表 3 对协议的性能从多个性能评价参数上进行了总结分析.

Table 2 Comparison of classifications of power control protocols

表 2 功率控制协议的分类比较

Protocol	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
CPC	✓			✓			✓			
COMPOW	✓			✓			✓	✓		
CLUSTERPOW		✓		✓		✓	✓	✓		
LAPC		✓		✓						✓
RPAR		✓		✓			✓			✓
LMA/LMN		✓		✓		✓				
PSP		✓		✓		✓		✓		
RDPC		✓		✓			✓	✓		
BASIC			✓		✓		✓	✓		
PARO			✓		✓		✓	✓		
PCM			✓		✓		✓			
PCDC			✓		✓		✓	✓		
PCMA			✓		✓		✓	✓		
DEMAC			✓		✓		✓	✓		
SHUSH			✓		✓		✓	✓		
POWMAC			✓		✓		✓	✓		
PCSMAC			✓		✓		✓	✓		
PCBL			✓		✓	✓	✓			✓
ATPC			✓		✓	✓	✓			✓

A: Network-Level control; B: Neighbor-Node-Level control; C: Single-Node-Level control; D: Network-Layer design; E: MAC-Layer design; F: Based on topology control and connectivity; G: Based on energy-efficient; H: Based on network throughput; I: Based on latency-sensitive; J: Empirical design.

Table 3 Comparison of performance of power control protocols

表 3 功率控制协议的性能比较

Protocol	A	B	C	D	E	F	G
CPC	Low	Low	Not need	✓	Moderate	Good	Moderate
COMPOW	Not need	Rather high	Maintains multi-routing tables	✓	Moderate	Good	Moderate
CLUSTERPOW	Not need	Rather high	Maintains three routing tables	✓	Moderate	Poor	Moderate
LAPC	Not need	High	Transmission power table	×	Moderate	Moderate	Poor
RPAR	High	High	Forward table, neighbor table	×	Moderate	Moderate	Poor
LMA/LMN	Low	High	Neighbor table	✓	Good	Moderate	Good
PSP	Low	High	Neighbor table	✓	Good	Moderate	Good
RDPC	High	Moderate	Forward table	✓	Moderate	Moderate	Poor
BASIC	Low	Low	Not need	✓	Good	Moderate	Good
PARO	Moderate	Low	Routing table	✓	Moderate	Moderate	Moderate
PCM	Low	Low	Not need	✓	Good	Good	Good
PCDC	Low	Moderate	Not need	✓	Good	Moderate	Good
PCMA	Low	Moderate	Not need	✓	Good	Poor	Good
DEMAC	High	Moderate	Recording table, checking table	✓	Good	Moderate	Good
SHUSH	Low	High	Interference node table	✓	Moderate	Good	Good
POWMAC	Low	Moderate	Not need	✓	Good	Moderate	Moderate
PCSMAC	Low	High	Schedule table, neighbor table	✓	Good	Good	Good
PCBL	Moderate	Moderate	Neighbor table	✓	Good	Poor	Good
ATPC	Moderate	Moderate	Not need	✓	Good	Poor	Good

A: Computation overhead; B: Control overhead; C: Storage overhead; D: Node mobility; E: Robustness; F: Fairness; G: Adaptivity to changes.

6 总结与展望

针对功率控制技术及其在传感器网络中的应用,近年来,国内的研究人员也开展了大量的研究工作,提出了许多新的改进算法和协议。纵观国内外所取得的研究成果,可以发现好的传感器网络功率控制协议具有以下特点:针对高应用相关性特点,根据性能目标调整控制策略;针对能量和资源高度受限的特点,尽可能地以最低功率进行消息的传递,并通过状态估计、分组恢复等技术降低不对称发射距离所造成的不良影响;针对网络规模大、分布不均的特点,采用分簇、最优邻居选取或分级发射功率等策略优化网络拓扑结构;针对节点易失效的特点,采用发射功率自适应地调整维持节点的通信连接;针对网络流量特征、通信模式的特点,采用跨层优化技术提升系统性能。

总体而言,尽管近年来研究者们对于传感器网络的功率控制研究开展了大量的工作,取得了相当大的成果,但这些研究成果大都存在着理论上的缺陷与不足,并且在实践应用中存在较大的局限性。目前,实用化的无线传感器网络功率控制策略研究还处于初步的探索阶段,要形成最终成熟的应用技术,还存在许多基础性问题 and 关键技术需要进一步的研究和完善:

(1) 全局统一发射功率控制虽然保证了整个网络的公平性,但是发射功率过小会降低网络的连通性,减少通信链路,并影响消息传递的实时性;高发射功率虽然可以加强网络拓扑的连通,减少路由跳数,但会使网络的通信传输能耗增加,竞争强度上升,网络容量降低。因此,针对具体应用的要求,如何在各项性能间求得平衡,选取最佳的统一发射功率值,在理论与实践应用中都是非常困难的。

(2) 分组级可变发射功率控制在理论上可使网络的传输能耗降至最低,尽可能地减小网络冲突域。然而,不对称的发射功率也会带来一系列的不良影响。例如,网络隐藏站的问题将十分严重,冲突率增加,公平性也随之降低。冲突率的增加还会影响网络的能量有效性、吞吐量、实时性等一系列性能。因此,如何将不对称的发射功率带来的不良影响降至最低,并在网络要求的各项性能间求得平衡,是理论与实践中的挑战。

(3) 功率控制对于传感器网络多项性能均有影响,因而存在着多控制目标问题。通常情况下,不存在一种算法或协议能够兼顾所有应用目标的最优性能要求^[2]。并且,传感器网络中有些应用目标之间本身就是矛盾的^[10]。例如,网络的能量有效性与实时性;有些目标必须首先得到满足,如网络的连通性与稳定性。因此在理论与实践,针对具体的应用类型,采用何种策略在多个控制目标之间加以折衷,使系统达到最好的性能效果,是系统设计的关键。

(4) 无线传感器网络在实践中往往应用于复杂的环境中。无线信号在各类环境中会经历不同的衰减,同时还会受到环境噪声的干扰,这使得传递的信息具有不可靠性和不可信任性^[12]。此外,传感器网络中节点的移动、加入、失效会造成网络拓扑结构的动态变化,从而使网络的控制信息也发生改变。因此,如何在复杂环境实际应用的背景下,从大量繁杂的实验数据中抽取其内在变化规律,建立能够感知环境与网络动态变化的自适应功率控制模型,提出相应的功率控制策略,满足通信中的控制信息要求,改善网络的整体性能,是传感器网络功率控制技术实用化的重要挑战。

(5) 建模对于传感器网络协议的设计和系统性能的分析来说,是一项非常重要的工作。由于实际工作环境往往比较复杂,因此,建立一个针对功率控制策略、面向实用化的模型不是一件不容易的事情。在无线传感器网络中虽然也存在着反馈控制信息,但其反馈信息和模式依赖于具体的工作环境和相应的控制策略,因而建立一个实用化的系统模型具有相当大的挑战性。

(6) 研究复杂应用环境下的实验与数据统计分析方法,揭示不同环境下时空域对功率损耗与链路传输质量的影响机理,建立能够感知环境变化的影响因素与功率损耗以及链路质量的统计分析模型,提出能够感知环境与网络动态变化的自适应功率控制机制,是促使无线传感器网络实用化的关键。

致谢 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老师和同学表示感谢。

References:

- [1] Akyildiz I, Su W, Sankarasubramaniam Y, Cayirci E. A survey on sensor networks. *IEEE Trans. on Communications*, 2002,40(8): 102–114.
- [2] Cui L, Ju HL, Miao Y, Li TP, Liu W, Zhao Z. Overview of wireless sensor networks. *Journal of Computer Research and Development*, 2005,42(1):147–163 (in Chinese with English abstract).
- [3] Ren FY, Huang HN, Lin C. Wireless sensor networks. *Journal of Software*, 2003,14(7):1281–1291 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/14/1281.htm>
- [4] Sun LM, Li JZ, Chen Y, Zhu HS. *Wireless Sensor Networks*. Beijing: Tsinghua University Press, 2005 (in Chinese).
- [5] Akyildiz I, Kasimoglu I. Wireless sensor and actor networks: Research challenges. *Ad Hoc Networks Journal (Elsevier)*, 2004,2(4): 351–367.
- [6] Ma HD, Tao D. Multimedia sensor network and its research progresses. *Journal of Software*, 2006,17(9):2013–2028 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/17/2013.htm>
- [7] Kawadia V, Kumar PR. Principles and protocols for power control in wireless ad hoc networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2005,23(1):76–88.
- [8] Xu L, Zhang JD, Zheng BY, Yang Z. The research development of energy conservation strategy for mobile ad hoc network. *Journal of Communication*, 2004,25(9):93–103 (in Chinese with English abstract).
- [9] Li FM, Xu WJ, Gao C. A power control MAC protocol for wireless sensor networks. *Journal of Software*, 2007,18(5):1080–1091 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/18/1080.htm>
- [10] 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.
- [11] Nar PC, Cayirci E. PCSMAC: A power controlled sensor-MAC protocol for wireless sensor networks. In: Cayirci E, ed. *Proc. of the EWSN 2005*. Piscataway: IEEE Computer Society, 2005. 81–92.
- [12] Lin S, Zhang JB, Zhou G, Gu L, He T, Stankovic A. ATPC: Adaptive transmission power control for wireless sensor networks. In: Campbell A, ed. *Proc. of the Sensys 2006*. Boulder: ACM Press, 2006. 223–236.
- [13] Park S, Sivakumar R. Load-Sensitive transmission power control in wireless ad-hoc networks. In: Park J, ed. *Proc. of the GlobeCom 2002*. Taipei: IEEE Press, 2002. 42–46.
- [14] Park S, Sivakumar R. Quantitative analysis of transmission power control in wireless ad-hoc networks. In: Lilja D, ed. *Proc. of the ICPP 2002*. Vancouver: IEEE Computer Society, 2002. 56–63.
- [15] 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. 2002*. Florence, 2002. 156–162. http://black1.csl.uiuc.edu/~prkumar/ps_files/compow_ewc_2002.pdf
- [16] Kawadia V, Kumar PR. Power control and clustering in ad hoc networks. In: Bauer F, ed. *Proc. of the INFOCOM 2003*. San Francisco: IEEE Press, 2003. 459–469.
- [17] Diamantopoulos F, Economides A. A performance study of DSDV-based CLUSTERPOW and DSDV routing algorithms for sensor network applications. In: Chin WH, ed. *Proc. of the ISWPC 2006*. Phuket: IEEE Communications Society, 2006. 1–6.
- [18] Chipara O, He ZM, Xing GL, Chen Q, Wang XR, Lu CY, Stankovic J, Abdelzaher T. Real-Time power-aware routing in sensor networks. In: Yang RY, ed. *Proc. of the IWQoS 2006*. New Haven: IEEE Press, 2006. 83–92.
- [19] Simon G, Volgyesi P, Maroti M, Ledeczi A. Simulation-Based optimization of communication protocols for large-scale wireless sensor networks. In: Profet RA, ed. *Proc. of the Aerospace Conf. 2003*. Big Sky: IEEE Press, 2003. 1339–1346.
- [20] 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 WCNC 2003*. New Orleans: IEEE Communications Society, 2003. 558–563.
- [21] 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.
- [22] Xin YF, Guven T, Shayman M. Relay deployment and power control for lifetime elongation in sensor networks. In: Yenel L, ed. *Proc. of the ICC 2006*. Istanbul: IEEE Communications Society, 2006. 3461–3466.

- [23] Pursley MB, Russell HB, Wysocarski JS. Energy-Efficient transmission and routing protocols for wireless multiple-hop networks and spread-spectrum radios. In: Proc. of the EUROCOMM 2000. Munich: IEEE Press, 2000. 1–5. <http://ieeexplore.ieee.org/iel5/7031/18937/00874759.pdf>
- [24] 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.
- [25] Agarwal S, Krishnamurthy S, Katz RH, Dao SK. Distributed power control in ad-hoc wireless networks. In: Proc. of the PIMRC 2001. San Diego: IEEE Press, 2001. 59–66. <http://www.cs.ucr.edu/~krish/SharadPIMRC01.pdf>
- [26] Toh CK. Maximum battery life routing to support ubiquitous mobile computing in wireless ad hoc networks. IEEE Communications Magazine, 2001,39(6):138–147.
- [27] Jung ES, Vaidya NH. A power control protocol for ad hoc networks. In: Akyildiz IF, ed. Proc. of the MobiCom 2002. Atlanta: ACM Press, 2002. 36–47.
- [28] 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 WCNC 2004. Atlanta: IEEE Communications Society, 2004. 1915–1920.
- [29] 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.
- [30] Wu SL, Teseng YC, Lin CY, Sheu JP. A multi-channel MAC protocol with power control for multi-hop mobile ad hoc networks. The Computer Journal, 2002,45(1):101–110.
- [31] Monks J, Bharghavan V, Hwu W. A power controlled multiple access protocol for wireless packet networks. In: Sengupta B, ed. Proc. of the INFOCOM 2001. Anchorage: IEEE Press, 2001. 219–228.
- [32] Wu SL, Tseng YC, Sheu JP. Intelligent medium access for mobile ad hoc networks with busy tones and power control. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2000,18(9):1647–1657.
- [33] Ding P, Holliday J, Celik A. DEMAC: An adaptive power control MAC protocol for ad-hoc networks. In: Walke B, ed. Proc. of the PIMRC 2005. Berlin: IEEE Communications Society, 2005. 1389–1395.
- [34] Sheth A, Han R. SHUSH: Reactive transmit power control for wireless MAC protocols. In: Imre S, ed. Proc. of the WICON 2005. Budapest: IEEE Communications Society, 2005. 18–25.
- [35] Muqattash A, Krunz 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.
- [36] Muqattash A, Krunz M. POWMAC: A single-channel power-control protocol for throughput enhancement in wireless ad hoc networks. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2005,23(5):1067–1084.
- [37] Rodopl V, Meng TH. Minimum energy mobile wireless networks. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1999, 17(8):1333–1344.
- [38] Heinzelman W, Chandrakasan A. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks. Wireless Communication, 2002,1(4):660–670.
- [39] Gao C, Jantti R. Link-State clustering based on IEEE 802.15.4 MAC for wireless ad-hoc/sensor networks. In: Hanzo L, ed. Proc. of the WCNC 2006. Las Vegas: IEEE Communications Society, 2006. 499–504.
- [40] El Batt T, Ephremides A. Joint scheduling and power control for wireless ad hoc networks. IEEE Trans. on Wireless Communications, 2004,3(1):74–85.
- [41] Kwon H, Kim TH, Choi S, Lee BG. Cross-Layer lifetime maximization under reliability and stability constraints in wireless sensor networks. In: Lee BG, ed. Proc. of the ICC 2005. Seoul: IEEE Press, 2005. 3285–3289.
- [42] Yuan J, Yu W. Distributed cross-layer optimization of wireless sensor networks: A game theoretic approach. In: Kero T, ed. Proc. of the GlobeCom 2006. San Francisco: IEEE Communications Society, 2006. 1–5.
- [43] Ganesan D, Krishnamachari B, Woo A, Culler D, Estain D, Wicker S. Complex behavior at scale: An experimental study of low-power wireless sensor networks. Technical Report, 02-0013, Los Angeles: UCLA CS, 2002.
- [44] Lal D, Manjeshwar A, Herrmann F, Uysal-Biyikoglu E, Keshavarzian A. Measurement and characterization of link quality metrics in energy constrained wireless sensor networks. In: Kero T, ed. Proc. of the GlobeCom 2003. San Francisco: IEEE Press, 2003. 446–452.

- [45] Zhao J, Govindan R. Understanding packet delivery performance in dense wireless sensor networks. In: Akyildiz I, Estain D, eds. Proc. of the SenSys 2003. Los Angeles: ACM Press, 2003. 1–13.
- [46] Zhou G, He T, Krishnamurthy S, Stankovic JA. Impact of radio irregularity on wireless sensor networks. In: Banavar GS, Zwaenepoel W, eds. Proc. of the MobiSys 2004. Boston: ACM Press, 2004. 125–138.
- [47] Son DJ, Krishnamachari B, Heidemann J. Experimental study of the effects of transmission power control and blacklisting in wireless sensor networks. In: Znati T, ed. Proc. of the SECON 2004. Santa Clara: IEEE Press, 2004. 289–298.
- [48] Jeong J, Culler DE, Oh JH. Empirical analysis of transmission power control algorithms for wireless sensor networks. Technical Report, UCB/EECS-2005-16, Berkeley: UC Berkeley EE and CS, 2005.
- [49] Son DJ, Krishnamachari B, Heidemann J. Experimental study of concurrent transmission in wireless sensor networks. In: Campbell A, ed. Proc. of the Sensys 2006. Boulder: ACM Press, 2006. 237–250.
- [50] Whitehouse K, Woo A, Jiang F, Polastre J, Culler D. Exploiting the capture effect for collision detection and recovery. In: Jha S, ed. Proc. of the EmNETS-II 2005. Sydney: IEEE Press, 2005. 45–52.

附中文参考文献:

- [2] 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):147–163.
- [3] 任丰原,黄海宁,林闯.无线传感器网络.软件学报,2003,14(7):1281–1291. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/14/1281.htm>
- [4] 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.
- [6] 马华东,陶丹.多媒体传感器网络及其研究进展.软件学报,2006,17(9):2013–2028. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/17/2013.htm>
- [8] 许力,张继东,郑宝玉,杨震.移动自组网能量保护策略研究进展.通信学报,2004,25(9):93–103.
- [9] 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. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/18/1080.htm>



李方敏(1968—),男,湖南涟源人,博士,教授,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.



刘新华(1974—),男,博士生,讲师,主要研究领域为无线传感器网络,嵌入式系统.



徐文君(1983—),男,博士生,主要研究领域为网络服务质量,无线传感器网络,嵌入式系统.