

无线传感器网络能量优化与建模技术综述

谢和平 周海鹰 左德承 徐杰 周鹏

(哈尔滨工业大学计算机科学与技术学院 哈尔滨 150001)

摘要 由于无线传感器网络的能量受限,如何优化网络能量消耗和评估网络生存周期是当前无线传感器网络研究的首要挑战。在分析无线传感器网络能量消耗特征的基础上,调研传感器网络节点和网络系统的能量优化策略;并针对能量优化存在的不足,分析近几年兴起的无线传感器网络能耗建模工作;从基于无线通信、状态转换、协议栈等方面归纳总结无线传感器网络能耗模型的建模方法;指出跨层能量优化以及软硬件综合的能耗建模技术是无线传感器网络能量研究的重点。

关键词 无线传感器网络,能耗特征,能量优化,能耗模型,生存周期

中图分类号 TP393.01

文献标识码 A

Energy Optimization and Modeling in Wireless Sensor Networks: A Survey

XIE He-ping ZHOU Hai-ying ZUO De-cheng XU Jie ZHOU Peng

(School of Computer Science and Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract Due to the energy supply limitation in wireless sensor nodes, it's the primary challenge to optimize the networks' energy consumption and estimate network lifetime in wireless sensor networks (WSN). By analyzing the energy consumption features of WSN, this paper reviewed energy optimization strategies from the views of sensor nodes and networks, and then surveyed and concluded the WSN's energy modeling studies from different research perspectives: wireless communication based, state transition based, protocol stack based and others. Finally, this paper pointed out the future research should focus on the cross-layer energy optimization and the hardware and software integrated energy modeling techniques.

Keywords WSN, Energy consumption feature, Energy optimization, Energy model, Network lifetime

1 引言

无线传感器网络是由部署在监测区域内的大量微型传感器节点通过无线电通信形成的一个自组织网络系统,其目的是协作地感知、采集和处理网络覆盖区域里被监测对象的信息,并发送给用户^[1,2]。因此无线传感器网络在军事、工业、环境等领域有着巨大的应用价值^[3]。传感器节点体积微小,通常携带电池能量十分有限,且部署区域环境复杂,有些区域甚至人无法到达,重新充电或更换电池在大多数部署环境中几乎是不可能的^[4]。因此,如何高效使用能量来最大化网络生存周期是传感器网络的核心问题^[5]。大多数研究者致力于网络的能量优化,以获得最大的网络生存时间,如网络拓扑协议、路由算法的能量优化,这方面的工作已显有成效;也有部分研究者聚焦于能耗模型的研究,通过建立能耗模型分析生存时间,改进网络拓扑结构等,同时通过模型分析对比各个协议,选取最适合特定应用的协议算法,以获得尽可能长的网络

生存时间。

本文分4节介绍无线传感器网络能量优化与建模技术:第1节从节点和网络层面分析能量的消耗特征;第2节从节点和网络的角度介绍传感器网络的能量优化策略;第3节介绍能量建模技术,综述现今主流的能量建模方法与理论;最后总结能量优化与能量建模工作的现有成果,指出研究上存在的一些问题和不足,提出今后能量优化与建模工作可能的研究方向。

2 能量消耗特征

2.1 节点能量消耗特征

一个典型的无线传感器节点通常由4部分组成^[6]:传感器模块、微处理器模块、无线收发模块和能量供应模块,其中耗能模块为前3个模块。在上述的耗能模块中,各个模块的能量消耗各不相同^[7],它们的能量消耗在节点中所占的比例如图1所示。

到稿日期:2011-12-01 返修日期:2012-03-12 本文受部委预研重点基金(9140A16020309HT01),教育部博士点基金项目(200802131024),哈尔滨市科技创新人才研究专项基金(2009RFLXG009),国家科技支撑计划(2011BAH04B03),科技部国际科技合作计划(2010DFA14400)以及部委“十二五”重点预研项目(513150901)资助。

谢和平(1989-),男,硕士生,主要研究方向为无线传感器网络、移动计算;周海鹰(1975-),男,博士,副教授,主要研究方向为移动计算、服务计算等,E-mail: haiyingzhou@hit.edu.cn;左德承(1972-),男,博士,教授,主要研究方向为移动计算、容错计算等;徐杰(1988-),男,硕士生,主要研究方向为无线传感器网络、移动计算;周鹏(1987-),男,硕士生,主要研究方向为移动计算、服务计算等。

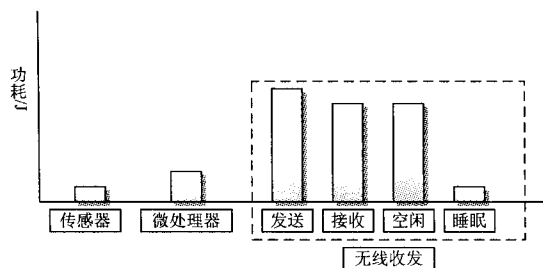


图1 无线感知网节点能耗分布^[6]

从图1可以看出,在上述3个耗能模块中,无线收发模块所消耗的能量占节点总体能耗的比例最大,而在无线收发模块中,一般分为4个状态:发送、接收、空闲和睡眠。在这4个状态中,发送状态所消耗的能量最大,接收和空闲状态所消耗的能量其次,睡眠状态下所消耗的能量最少。微处理器模块所消耗的能量远小于无线收发模块,而传感器模块所消耗的能量是上述3个模块中最少的一个,相对节点的总体能耗基本上可以忽略不计。目前大多数的能耗研究都针对这一特性展开。

2.2 网络能量消耗特征

当前,无线传感器网络节能的主要研究方法是针对网络协议栈各层分别设计相应的能量高效协议。由于体系结构和应用的不同,无线传感器网络的通信协议栈也不尽相同。图2是研究人员早期基于计算机网络提出的一种协议栈,这个协议栈包括物理层、数据链路层、网络层、传输层和应用层。此外还包括能量管理平台、移动管理平台和任务管理平台,设计这些平台可以使传感器节点能高效节能地协同工作^[8]。网络能耗主要在物理层,协议栈的其他层能耗可通过数据传输等与物理层相联系;不合理的网络拓扑结构和路由选择等也会造成不必要的能量浪费。

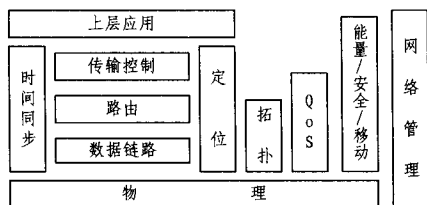


图2 无线传感器网络协议栈^[8]

3 能量优化策略

3.1 节点能量优化技术

3.1.1 基于硬件的能量优化技术

无线传感器节点耗能部分主要是传感器模块、微处理器模块和无线收发模块。下面针对这3个模块分别进行相关能量优化策略分析。

传感器模块的能量优化主要体现在传感器的工艺和器件选择上^[9],同时,在低功耗硬件设备的基础上,使用动态能源管理技术(DPM)^[10]可以进一步减少能耗,延长电池的寿命。关闭无线传感器节点空闲的部件是一种较为通用的能源管理策略,因此,如何合理地使其部件在不同的工作状态下切换是DPM技术的关键。信息过滤和数据融合也使得节点能量高效。

对微处理器而言,一般处理能力越高,能耗越大,所以优先考虑满足应用要求的低功耗微处理器(MCU)。同时,

MCU一般都支持多工作模式,如:活跃、空闲、休眠,同无线收发模块一样,不同模式下能耗也大不相同,适当的工作模式切换有利于节约能量。另一方面,现在流行的动态电压调节(DVS)^[11]也是节约能量的有效策略,即当计算负载较低时,降低MCU的工作电压和频率,继而降低处理能力,从而减小能耗,同时也可尽量使用中断让MCU进入更深的睡眠以节约能耗。

无线收发模块是能量优化的研究重点,近年来涌现了不少能量优化策略,主要策略有:选用待机电流小、收发电流稳定的射频芯片;减小无线收发模块的启动时间;采用多工作模式,如发送、接收、空闲和休眠。由图1可知,空闲模式下的能量消耗几乎接近接收状态,而休眠模式下能耗却很低,所以尽可能使空闲模式下的能量优化切换到休眠模式。不过,文献[12]中提出在一定时间阈值内进行状态切换同样需要消耗很大的能量,如何确定时间阈值便是状态切换技术的关键问题。

3.1.2 基于软件的能量优化策略

在节点软件部分,能量优化策略主要体现在操作系统的设计和调度协议与算法的研究上。在操作系统的设计中,实现电源管理和动态电压调整是一种很有效的手段。调度协议和算法方面的研究更是硕果累累,根据节点网络特点,目前的工作可分为以下几类:

1)基于网络连通的节点调度算法,研究目标只限于提供连通的网络,为数据的传输提供保障,典型算法有:GAF、SPAN和ASCENT。文献[13]提出了一个Sentry-Based的能源管理方法,即所有节点分成哨兵和非哨兵节点,所有的哨兵节点必须能保证形成一个连通的网络,非哨兵节点通常情况下power-off,在醒来时询问是否需要power-on。文中提出以剩余能源最多的节点作为哨兵,但并没有给出选择算法,以及power-off的量化。

2)基于网络覆盖的节点调度算法,研究目标不仅考虑网络的连通,同时考虑网络的覆盖情况,提供一个全覆盖网络。文献[14]着重考虑无线传感器网络在随机部署节点情况下的多重覆盖问题,提出一种应用鲁洛三角形的k度覆盖算法RTCA。文献[15]提出了一个贪心算法,该算法重复地选择传感器节点,该节点若能覆盖最大未覆盖的查询区域就加入工作节点集。文献[16]将该结果一般化,从而能够获得查询区域的k覆盖。

3)基于网络连通和网络覆盖的混合节点调度算法,研究目标是考虑了网络的覆盖,但是其目标并不是提供一个全覆盖的网络,而是在各种因素(如代价、应用)之间作折衷。考虑到不同的应用可能要求的覆盖程度不同,Wang等人^[17]提出了一种旨在为网络中不同区域实现不同覆盖等级的覆盖配置协议CCP(Coverage Configuration Protocol)。文献[18]研究了节点随机睡眠如何能够保证网络近似于k覆盖和3种节点分布模式下的情况,这3种模式分别是网格网络、随机分布网络和泊松分布网络。

3.2 网络能量优化技术

无线传感器网络整体的能量优化,除了在节点级进行能量优化外,更应该在网络层面实施能量优化。网络层面的能量优化策略主要从以下3大块考虑。

3.2.1 基于网络拓扑的能量优化技术

对自组织的无线传感器网络而言,拓扑控制是其核心技

术之一,良好的拓扑控制能够提高路由协议及其协议的效率,为数据融合、时间同步和目标定位等多方面奠定基础,有利于延长整个网络的生存周期。拓扑控制分为功率控制和分层或分簇(睡眠调度)两类^[19,20]。文献[21]针对同构和异构 WSN 分别提出了基于能量平衡的拓扑构建算法,尤其对于动态拓扑维护,引入节点能量偏差度的概念来衡量节点能量的不平衡性,基于能量偏差度提出了动态维护算法。经仿真验证,使用动态拓扑维护与 EBDTCA 算法相结合的拓扑控制,能更有效地平衡网络节点的能量消耗,延长网络的生命期。需要注意的是,睡眠调度机制在节约能量的同时会对网络或者协议的性能(如时延、吞吐量等)产生很大的影响。比较典型的节点功率控制类拓扑控制算法有:COMPOW^[22]、LMA^[23]和 RNG^[24]。

分层或分簇亦即网络聚类,无线传感器网络一般包含大量的节点,而且部署密集。如果采取常规的平面网络结构,过大的通信开销、网络延迟和复杂的网络管理必将造成能量过快消耗;而缓慢的网络反应速度也是无线传感器网络应用无法忍受的问题。这就需要通过网络聚类的方式优化网络结构,融合冗余数据,减少通信开销,达到能量优化的目的。目前较常见的网络聚类方式主要有两类:

1)网内分簇。无线传感器网络节点众多,系统庞大而复杂,分层可以有效地协调任务调度、定位和时间同步、信道接入、数据控制指令的传送,以有效地融合数据。网内分簇则是建立在分层基础上的网内区域划分,选取小区域内的一个节点作为簇头节点,簇头充当小区域内的基站,以分散热点节点,平衡网络内节点的能耗。文献[25]运用基于能量指标和距离指标的簇首选举方法,建立了一种基于节点剩余能量和传输距离的跨层自适应周期簇间路由性能模型。该模型均衡网络节点能耗与负载,有效地提高了网络生存时间。Younis 等人^[26]提出了一种混合式分簇协议 HEED。文献[27]则提出了一种适合部署大规模节点的网络能效随机分簇算法。

2)节点非均匀分布。由于传感器节点传输距离的限制,自组织的传感器网络中节点数据的传输一般采用多跳方式,这势必造成基站附近的节点由于过多地接收转发数据使能量消耗过快而迅速死亡,形成“数据黑洞”,直接的后果使得基站与外界失去联系,从而使整个网络死亡,所以为延长网络的生存周期,可以采取节点非均匀分布的策略:节点密度的非均匀分布、节点能量的非均匀分布和节点发射功率的非均匀分布。

3.2.2 基于路由选择的能量优化技术

无线传感器网络路由协议不仅要选择能量消耗较小的消息传输路径,还要从整个网络的角度考虑,选择使整个网络能量均衡消耗的路由。无线传感器网络的路由协议按网络结构可分为平面型和层次型两类,典型的平面路由协议有:泛洪法(Flooding)、闲聊法(Gossiping)、基于协商的路由 SPIN、基于查询的定向扩散(Directed diffusion)。典型的层次路由协议有:低功耗自适应聚类路由算法 LEACH、基于阈值的能量有效路由协议 TEEN、基于链的传感器信息系统功率的有效聚集 PEGASIS。近年来也提出了一些有代表性的研究,如文献[28]中综合考虑跳数和剩余能量两个因素,提出了均衡网络能耗的能量跳变路由算法,该算法适用于定期监测数据的传感器网络,且不受网络分布的影响,不过也以增加网络延时为

代价,同时增加了节点维护邻居信息表的开销。文献[29]提出一种基于能量感知的多径路由机制,该协议在最优路线因能量受限等原因导致传输失败前,可选择另外的次优路线传输数据,实现负载均衡。此外,文献[30,31]利用网络层、数据链路层信息对网络能耗及传输数据之间进行权衡,给出了最佳的分配方案。文献[32]提出了基于通道传输质量、节点剩余能量的网络能耗平衡算法。该算法的优势在于算法简单,易于程序实现,缺点在于该算法的调节能力非常有限。

3.2.3 基于数据融合的能量优化技术

数据融合是将若干节点上的多份数据或信息进行处理,组合出更有效、更符合用户需求的数据的过程,具体主要是对冗余数据进行网内处理,即中间节点在转发数据之前,首先对数据进行综合,去掉冗余信息,在满足应用需求的前提下将需要传输的数据量最小化。数据融合对节省节点能量,延长网络寿命具有很重要的意义。无线传感器网络中,通常将数据聚合与网络拓扑、多跳路由联合考虑,以求获得最好的性能。特别是为了更大幅度地减少网络的能量消耗,在实际的网络中,将数据融合技术与路由协议相结合,提出了大量的相关网内数据融合技术。根据网内数据融合技术所依赖的网络拓扑结构,可将现有网内数据融合技术大致分为:简单树型网内融合技术、簇型网内融合技术和簇-树型网内融合技术。

4 能量建模技术

上述能耗优化策略通过尽量减少系统的能量消耗,来获得最大的网络生存周期,但并未得出网络具体的生存周期,而这一数据是传感器网络应用的重要参考指标;也未能直观地比较各个协议的优劣。而能量建模能很好地解决这些问题。能量建模的目标是建立一个普遍适用的能耗模型尤其是基于全网络的能耗模型来评估和预测网络能量消耗,以此估计网络生存周期,优化网络结构,对比各个协议优劣等。

4.1 基于无线通信的能耗建模

无线传感器网络传统的能耗建模方法是根据传感器节点各功能模块的理论能耗数据、公式或理论模型来推演节点的能耗状况,由节点能耗模型再推导整个网络的能耗模型。节点各功能模块理论能耗的推导建立在无线通信的基础上。而传感器节点将 1bit 信息传输 100m 距离需要的能量大约相当于执行 3000 条计算指令消耗的能量^[33],并且,和通信所需能量相比,传感器采集信息所需能量很低,且与工作时间 T 成正比,这样在绝大多数能量建模中都将处理器模块和传感器模块划分为常量性能耗,因此大多数节点能耗模型都只考虑无线收发模块的能量消耗。Wang A 等^[34]提出传感器节点工作能耗模型,文中提到的将 n -bit 信息传输距离 d 时射频电路(无线收发模块)的发送和接收能耗公式被许多研究者应用在节点能耗建模中,其表达式如下:

$$E_{Tx}(n, d) = E_{Tx_elec}(n) + E_{Tx_amp}(n, d) = E_{dec}n + \epsilon_{amp}nd^k \quad (1)$$

$$E_{Rx}(n) = E_{Rx_elec}(n) = E_{dec}n \quad (2)$$

式中, E_{dec} 表示发射装置(transmit electronics, TE)和接收电路(receive electronics, RE)每发送或接收单位 bit 的耗能; ϵ_{amp} 表示发射放大器每 bit 传送单位平方米所耗的能量; k 为传播衰减指数, $2 \leq k \leq 5$,取值由周围环境决定。

文献[35]采用电磁场能量扩散理论、电路能量消耗理论

和技术,推导出传感器网络中普通感知的节点、数据汇聚节点和簇头节点的能耗模型,进而研究单跳传输方式下网络的理论能耗模型及其分析计算。

文献[36]在节点能耗建模方面将处理器模块和传感器模块划分为常量性能耗,仅考虑无线收发模块的能量消耗,对无线收发模块的能量建模采用文献[34]提出的发送接收能耗公式。该文献对单跳和多跳分别建立不同的网络模型,从两种传输方式研究网络能耗,在多跳模式下,采用最小转发能量策略的逐级楔形多跳转发模型,有利于延长网络生存周期,多跳方式也适用于大区域的监测。文献[37]的一个独到之处是单独为多层次传感器网络结构中的簇头节点建立了其能量消耗模型,以细化和精化能量消耗,并在多跳模式下采用文献[36]中提到的逐级楔形多跳转发模型分别求得能量最优下的簇头数,为网络拓扑设计和路由机制等提供理论性指导。

文献[38]提出了一种基于网格的数据传播方式的能量模型,利用自由空间模型($k=2$)和多径衰落模型($k=4$)进行能量估计,该文还通过对模拟得出,动态网格体系结构中的汇合节点比静态网格体系结构中的更能节约能量。

文献[39]也仅把节点的发送和接收数据作为主要能耗考虑,引用文献[36]的简化模型,引入最小跳数技术,采用加权平均算法,建立了坐标系下正方形网络的能耗模型,推导出更为准确的正方形网络的能耗表达式,解决了能耗表达式模糊的问题。

然而,基于比特的能量建模存在问题。文献[40]指出 RF 的工作时间应包含通信电路预热时间,而且在通信电路预热时不能进行任何通信,但仍会消耗大量的电能;如果通信时间足够短,决定单位能耗的主要因素可能就是通信电路预热的能耗,而不是帧长。因此,当帧长出现微小变化时,会使测得的比特能耗值发生较大波动。此外,硬件相同而协议不同时、硬件/协议相同而应用环境不同时的比特能耗值会表现出很强的不稳定性。因此,以比特能耗作为能耗计量单位是不完善的,基于此所构建的能量模型便存在很大的弊端。为此,研究人员在完善此类能耗模型的同时积极探索其他可行的能耗模型。

4.2 基于状态转换的能耗建模

根据节点能量优化策略可知,从节能角度考虑,节点中至少应包含工作和睡眠两种状态,无线收发模块一般有接收、发送、空闲和休眠等工作模式,其他模块一般也有多工作模式的转换,同时各功能模块之间也存在状态转换,这便为基于节点或模块的状态转换的能耗模型提供了依据。

基于状态转换的能量建模最常用的建模理论是马尔科夫(Markov)链^[41],以 Markov 链为理论依据的模型是一种简化的、高效的随机模型,且模型假定在传感器节点现在所处的状态下,节点状态将来的演变与过去无关。文献[29]提出以状态转换为基础建立节点能量消耗仿真模型,采用马尔科夫链进行节点能量消耗的预测,该模型不受网络布置和拓扑结构等因素的影响,是一种普遍适用的节点能耗模型。文献[42]也是基于马尔科夫理论建立能耗模型,与文献[29]不同之处在于,文献[42]将节点分为工作(R(发送、接收)和N(只发送)阶段)和睡眠两个状态,在理想情况下建立节点能耗模型和网络能耗模型,特别就节点通信干涉情况建立了影响理想的节点和网络能耗模型的干涉模型,其主要是为求得前面模

型中的一些具体参数,如节点发送数据概率,仿真测试验证了该模型的正确性和有效性。但这几类建模都仅仅从无线收发模块和网络层面考虑系统的能量消耗,忽略了其他模块,有一定的局限性。与文献[42]中节点状态设计类似,文献[43]也是以 Markov 理论为基础,提出了一种基于 GSPN(Generalized Stochastic Petri Net)和休眠调度机制的能耗模型,其通过构建 Energy Map^[44]得到网络内小区域甚至某个节点的能量剩余情况,并仿真验证了该模型的真实性和有效性。

基于 Markov 理论的建模是现在非常流行的一种能量建模方法^[45-47],但并不是唯一的方法。文献[12]建立了 MCU 处理器、模数转换器和无线收发模块之间的状态转换关系模型,详细给出了状态转换关系和条件,并给出了多种休眠模式间的转换时间阈值的估计方法,对传感器节点进行了比较系统整体的能量建模,但文献未提出针对传感器网络整体方面的能耗模型,无法指导全局网络能耗的优化。

文献[48]在 Ivan 等^[49]的研究和点对点的网络能耗模型的基础上,对原有基于 ACK 的可靠传输能耗模型进行了评估改进,采用基于传输失败概率的新模型参数对原有可靠传输模型进行了重新设计,同时增加了非可靠传输的能耗模型,并结合了 MC13213 通信状态机的机理。仿真结果显示该模型能很好地反映系统传输能耗特性,为研究相关网络的能效分析提供参考。

此外,文献[50]分析了微处理器模块、传感器模块和无线收发模块在各状态下运行及状态变迁时的能耗,并根据事件触发机制建立节点整体能耗模型。文献[51]提出一种基于状态转换的动态矩阵建模方法,包括状态转换矩阵、状态转换时间矩阵、状态转换功率矩阵和状态转换次数矩阵,并根据不同型号节点实际配置,有针对性地建立节点能耗模型。在 NS2 上的仿真对比验证了该模型的有效性 with 实用性。

4.3 基于协议栈的能耗建模

无线传感器网络的协议栈包括物理层、数据链路层、网络层、传输层和应用层。数据传输等必须经过网络的协议栈,无线传感器网络的能量消耗贯穿于协议栈的各层,一些研究者从而考虑基于传感器网络的协议栈建立能量模型。而能量的主要消耗在物理层,其他层的能量消耗可通过物理层的能耗与相应的数据传输特点结合起来建模,因此,基于协议栈的能量建模主要集中在物理层的能量消耗上。

文献[52]提出了 WSN 数据链路层的一种综合能耗模型,分析了网络层、物理层和信道及数据链路层各功能模块对 WSN 网络能耗的影响。最后通过仿真说明了该综合能量模型中参数的合理选择(如功率控制方式及最佳发射功率的选择)可大大改善 WSN 能量消耗及数据传输等性能,并根据分析得出计算能耗的经验公式,该能耗经验公式及其参数需进一步研究与精确化。

文献[53]建立了无线传感器网络在物理层的能量消耗分析模型;而文献[54]基于瑞利衰落信道及无线链路,建立了一种跨越物理层与媒质接入层的能耗模型,并针对 IEEE802.11 DCF 和时隙 ALOHA 协议进行了具体的能耗分析。模型综合考虑了无线信道的干扰多变性、用户对信道质量的要求、信道饱和度大小、接入信道的方式等多个因素对能耗的影响,研究了发送功率和传输速率对能耗的影响,指出发送功率与传输速率过大过小都不利于节约能耗;联合控制更易于降低能

耗。但是其只给出了定性的关系,没有从定量的关系给出最优发送功率与传输速率。

此外,文献[55]分析了能耗模型对 MAC 层协议及路由算法能效的影响,提出了一种考虑 MAC 层协议和路由算法能效的网络能量估计策略。文献[56]建立的物理层能耗模型则给出了硬件对总功耗的影响。

4.4 其他能耗建模技术

上述 3 类能耗模型覆盖了目前大部分的能量建模工作,但是每种能耗模型都有其难以避免的缺陷,研究者致力于提出最切合实际的能耗模型,从数据流、综合软硬件等多方面考虑能耗模型的建立。

文献[57]提出了一种基于数据流跟踪的能耗模型,它通过跟踪数据流在网络中的整个过程来计算全网的能量消耗。该模型从数据流角度出发计算能耗,是一种不受动态变化的节点状态和网络通信时序影响以及网络结构限制的普遍适用的能量模型。在此模型的基础上,还建立了基于能耗的网络优化模型,针对链式和簇式结构进行了拓扑、功率和路由的优化设计。

文献[58]创造性地提出一种基于嵌套层次的能量消耗系统(EHS)模型,其中的关键元素都定义和分配在该层次结构中,每层都完成 ESH 中一个特定的功能,该模型目前已成功应用在 RiverMote 节点中。

文献[59]首先结合 WSN 应用实际,综合分析了通信活动、计算活动及物理特性因素对节点能耗的影响,指出以比特能耗作为能耗辅助计量单位是不可行的,从而选用按帧计算能耗,进而提出了一种基于无线通信和计算特征分析的节点能耗模型。最后对该能耗模型等进行了物理实现,并通过现场实验验证了该模型的有效性。

文献[60]基于博弈理论,以 Shapley 值作为联盟所得收益的分配方案,基于各节点分配所得的 Shapley 值,提出一种 WSN 的节能联盟博弈模型,同时将 Markov 状态转移过程用于联盟形成过程的建模,并基于谈判集的思想给出吸收因子的概念,以控制 Markov 状态的转移。

文献[61]提出一种用于评价基于综合的传感器节点能量模型的各种纠错码(ECC)的框架,该框架支持传感器节点设计中与应用和部署相关的参数的研究,比如距离、位误码率、路径损耗指数以及调制方案和 ECC 参数。研究结果表明,在给定合理参数情况下,与未编码的数据传输相比,该能量优化的 ECC 可节省 15%~60% 的节点能量。

以上的能量建模都是软硬件分离的,而文献[62,63]创造性地通过 AADL^[64]建模方法将无线传感器网络能量建模的软硬件综合考虑,使系统建模更加精确完善。AADL 是嵌入式实时系统领域的体系结构设计与分析标准^[65],非常适用于实时的嵌入式系统,其应用在能量建模方面的研究还非常少,这方面还有待更完善的研究。

结束语 无线传感器网络的能量优化与能量建模是针对节点和网络的能量问题而展开的研究,其目的是最大化网络的生存周期。能量优化策略从各个方面考虑优化节点与网络的能量,使其能耗最小,这方面的研究渐趋成熟,特别是在拓扑控制和路由选择等网络层面上。安全对无线传感器网络而言也是一个至关重要的问题,这方面的能量优化研究较少,安全协议的优化将是一个研究重点。能量建模与仿真目的在于

估算网络的生存时间,考察和比较各个优化策略的性能,从而做出最优选择。能量建模工作也小有成就,在大量节点层面建模工作的基础上,网络层面的建模研究也取得了一定成绩。Markov 理论很好地应用在无线传感器网络的能量建模中,基于无线通信和协议栈的能量建模有不少的研究,很多研究人员提出了一些更好的建模方法与理论,比如基于博弈理论的能量建模、采用 AADL 建模工具等。

当然,目前能量优化与建模也存在一些不足。大多数的研究都是基于网络拓扑或路由协议能耗的优化策略,对于系统能量建模的研究还较少,网络总能耗与拓扑结构、路由选择等设计方案的本质关系也少有研究;能量建模的研究也大多集中在节点的能量建模与优化上,然而单个节点的能量最优未必能保证网络能量最优,而且多只针对无线收发模块,经常忽略侦听重传等带来的开销,这对某些网络影响很大;现在也鲜有通用的能够计算全网能耗的能量模型,很多模型都局限于自身相关的应用中,并且当前研究一般假设中存在许多与实际情况不相符的情况,如周期性假设、稳定性假设、单调性假设等,因此一个普遍适用的可计算全网能耗并能估计网络生存时间的能耗模型亟待研究。

从研究现状来看,针对能量优化与建模研究存在的一些不足,作者认为今后无线传感器网络的研究重点和方向应集中在以下几个方面:1. 基于安全机制方面的能量优化;2. 跨层的能量优化,综合考虑各个协议层,以更好地优化整体能量消耗;3. 完善和改进现有的一些能量优化与模型,开发评估工具;4. 引入和采用一些新的建模理论与工具对系统进行建模,比如 AADL;5. 综合考虑结合软硬件层面的系统能量建模与仿真。

参考文献

- [1] Akyildiz I F, Su W L, Sankarasubramaniam Y, et al. A sensor grids: coverage, connectivity and diameter[C]// Proceedings of IEEE Infocom 2003. San Francisco, CA, 2003: 1073-1083
- [2] Culler D, Estrin D, Srivastava M. Guest Editors' introduction: overview of sensor networks[J]. Computer, 2004, 37(8): 41-49
- [3] 孙雨耕, 张静, 孙永进, 等. 无线自组传感器网络[J]. 传感技术学报, 2004, 17(2): 331-335
- [4] Allen W G, Johnson J, Ruiz M, et al. Monitoring volcanic eruptions with a wireless sensor network[C]// Proceedings of the Second European Workshop on Wireless Sensor Networks. 2005: 108-120
- [5] Jennifer Y, Biswanath M, Dipak G. Wireless sensor network survey[J]. Computer Networks, 2008, 52(12): 2292-2330
- [6] Peng Yu, Luo Qing-hua, Peng Xi-yuan. The design of low-power wireless sensor node[C]// 2010 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC). 2010: 917-922
- [7] 掌明. 基于最大生存周期的无线传感器网络能量模型研究[J]. 现代电子技术, 2007, 21: 38-40
- [8] 于海滨, 曾鹏. 分布式无线传感器网络协议研究[J]. 通信学报, 2004, 25(10): 102-110
- [9] Mikhaylov K, Tervonen J. Optimization of microcontroller hardware parameters for wireless sensor network node power consumption and lifetime improvement[C]// 2010 International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT). 2010: 1150-1156

- [10] Benini L, Bogliolo A, De Micheli G. A survey of design techniques for system-level dynamic power management[J]. IEEE Transactions on Very Large Scale Integration(VLSI) Systems, 2000, 8(3):299-316
- [11] Pering T, Burd T, Brodersen R. The simulation and evaluation of dynamic voltage scaling algorithms[C]// Proceedings of the ACM International Symposium on Low Power Electronics and Design. Monterey, New York, 1998:76-81
- [12] 张骏, 向渝, 汪文勇. 无线传感器网络节点能耗状态转换模型研究[J]. 电子科技大学学报, 2009, 38(4):5
- [13] Hui Jonathan, Ren Z Y, Krogh B H. Sentry-based power management in wireless sensor networks[C]// IPSN'03 Proceedings of the 2nd International Conference on Information Processing in Sensor Networks. Berlin: Springer-Verlag, 2003:458-472
- [14] 邢萧飞, 孙泽宇. 无线传感器网络中应用鲁洛三角形的 k 度覆盖算法[J]. 计算机科学, 2011, 38(1):66-68
- [15] Zhang Hong-hai, Hou J C. Maintaining sensing coverage and connectivity in large sensor networks[R]. Technical Report UIUC. 2003;2003-2351
- [16] Gupta H, Das H R, Gu Q. Connected sensor cover: selforganization of sensor networks for efficient query execution[C]// ACM International Symp, On Mobile AdHoc Networking and Computing(MobiHOC). 2003;189-200
- [17] Wang Xiao-rui, Xing Guo-liang, Zhang Yuan-fang, et al. Integrated coverage and connectivity configuration in wireless sensor network[C]// Proceedings of ACM Conference on Embedded Network Sensor Systems. USA: ACM, 2003:28-39
- [18] Shakkottai S, Srikant R, Shroff N B. Unreliable sensor grids: coverage, connectivity and diameter[C]// Proceedings of IEEE Infocom 2003. San Francisco, CA, 2003:1073-1083
- [19] Liang Qi-lian. Fault-tolerant and energy efficient wireless sensor networks: a cross-layer approach[C]// Proceedings of IEEE Military Communication Conference (MILCOM). 2005:1862-1868
- [20] Lin Xiao-jun. The impact of imperfect scheduling on crosslayer congestion control in wireless networks[J]. IEEE/ACM Transaction on Networking, 2006, 14(2):314-319
- [21] 向毅. 无线传感器网络能量平衡的拓扑控制研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2010
- [22] Narayanaswamy S. Power control in ad-hoc networks: theory, architecture, algorithm and implementation of the COMPOW protocol[C]// Proc of European Wireless Conf. Italy, 2002:156-162
- [23] Kubisch M. Distributed algorithms for transmission power control in wireless sensor networks[C]// Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference(WCNC'03). New Orleans, Louisiana, 2003:558-563
- [24] Cartigny J. Localized LMST and RNG based minimum-energy broadcast protocols in ad hoc networks[J]. Ad Hoc Networks, 2005, 3(1):1-16
- [25] 徐楠, 孙亚民, 黄波, 等. 无线传感器网络跨层自适应周期分簇路由模型[J]. 计算机科学, 2011, 38(5):56-59
- [26] Younis O, Fahmy S. HEED: a hybrid energy-efficient distributed clustering approach for ad hoc sensor networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2004, 3(4):336-379
- [27] Bandyopadhyay S, Coyle E J. An energy efficient hierarchical clustering algorithm for wireless sensor networks[C]// IEEE INFOCOM Communications Societies, 2003:1713-1723
- [28] 胡广昌, 高仲合. WSN 能量跳变路由算法的研究[J]. 通信技术, 2010, 4(43):181-183
- [29] 王林, 段晓阳. 一种基于能量感知无线传感器网络多径路由机制[J]. 电脑知识与技术, 2010, 6(21):5743-5747
- [30] Zhu Jun-hua, Chen Shan, Bensaou B, et al. Tradeoff between lifetime and rate allocation in wireless sensor networks: a cross layer approach[C]// Baldwin RL, ed. Proc. of the INFOCOM 2007. Alaska: IEEE CS Press, 2007:267-275
- [31] Michele R, Nicola B, Michele Z. Cost and collision minimizing forwarding schemes for wireless sensor networks[C]// Baldwin R L, ed. Proc. of the INFOCOM 2007. Alaska: IEEE CS Press, 2007:276-284
- [32] Puccinelli D, Sifakis E, Haenggi M. A cross-layer approach to energy balancing in wireless sensor networks[C]// Tsaklis P J, Tabuada P, eds. Proc. of the Workshop on Networked Embedded Sensing and Control (NESC 2005). Notre Dame: Springer-Verlag, 2005:309-324
- [33] Iyer R, Klein L. QoS control for sensor network[C]// Los Angeles: Proceedings of the IEEE International Conference on Communications. 2003
- [34] Wang A, Heinzelman W, Sinha. Energy-scalable protocols for battery-operated micro-sensor networks[J]. Journal of VLSI Signal Processing, 2001, 29(3):223-237
- [35] 杨余旺, 于继明, 赵伟, 等. 单跳无线传感器网络能量分析计算[J]. 南京理工大学学报, 2007, 31(1):81-84
- [36] 张志东, 孙雨耕, 刘洋, 等. 无线传感器网络能量模型[J]. 天津大学学报, 2007, 40(9):1029-1034
- [37] 魏永红, 李科杰. 层次拓扑结构的无线传感器网络能量模型[J]. 计算机应用, 2010, 30(7):1731-1735
- [38] Khan Z A, Belleudy C, Auguin M. Analytical model for energy consumption analysis in grid based wireless sensor networks[C]// 2009 3rd International Conference on New Technologies, Mobility and Security (NTMS). 2009:1-5
- [39] 王淑华, 陈国定, 赵国炳. 一种无线传感器网络能耗模型及有效性分析[J]. 计算机应用与软件, 2011, 28(2):215-217
- [40] Edgar H, Callaway J. Wireless sensor networks architectures and protocols[M]. Part of Taylor & Francis Group LLC, London, UK: Auerbach Press, 2003
- [41] Stewart W. Introduction to the numerical solution of markov chains[D]. Princeton University, 1994
- [42] 刘娅. 无线传感器网络能量模型及仿真研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2008
- [43] Shi Zhang-song, Wang Cheng-fei, Zheng Peng, et al. An energy consumption prediction model based on GSPN for wireless sensor networks[C]// 2010 International Conference on Computational and Information Sciences. 2010:1001-1004
- [44] Mini A F, Nath B, Loureiro A F. A probabilistic approach to predict the energy consumption in wireless sensor networks[C]// 4th Workshop de Comunicacao sem Fio e Computao Mvel. So Paulo, Brazil, Oct. 2002
- [45] Mao Sha, Tang Hao, Zhou Lei, et al. An energy conservation optimization strategy for wireless sensor network node based on Q-learning[C]// 2011 8th Asian Control Conference (ASCC). 2011:938-943

- work for Wireless Sensor and Actor Networks[C]// Proceedings of the International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobiHoc). 2005;99-110
- [14] Melodia T, Pompili D, et al. Communication and Coordination in Wireless Sensor and Actor Networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2007, 6(10): 1116-1129
- [15] 李洪峻, 李迅, 马宏绪. 无线传感执行网络的协调机制研究[J]. 计算机应用研究, 2009, 26(1): 250-253
- [16] 张丽, 刘有源, 邓莹, 等. 无线传感执行网络中协作机制的研究[J]. 交通与计算机, 2007, 25(134): 48-51
- [17] Maadani M, Motamedi S A. EDCA Delay Analysis of Spatial Diversity in IEEE 802. 11-Based Real-Time Wireless Sensor and Actuator Networks[C]// 2011 8th International Symposium on Wireless Communication Systems. 2011; 675-679
- [18] Maadani M, Motamedi S A, Safdarkhani H. An Adaptive Rate and Coding Scheme for MIMO-Enabled IEEE 802. 11-Based Soft-Real-Time Wireless Sensor and Actuator Networks[C]// ICCRD2011-2011 3rd International Conference on Computer Research and Development. 2011; 439-443
- [19] Garcia M, Coll H, Bri D, et al. Using MANET protocols in Wireless Sensor and Actor Networks[C]// Proceedings of the 2008 Second International Conference on Sensor Technologies and Applications. 2008; 154-159
- [20] 徐宏勤, 洪承镐, 王智. 家庭自动化无线传感器/执行器网络路由协议的设计[J]. 信息与控制, 2009, 38(5): 624-632
- [21] Shah G A, Bozyigit M, Aksoy D. RAT: Routing by Adaptive Targeting in Wireless Sensor/Actor Networks[C]// Proceedings of the 2007 2nd International Conference on Communication System Software and Middleware and Workshops. COMSWARE 2007. Jan. 2007; 1-9
- [22] 李方敏, 徐文君, 刘新华, 等. 无线传感器/执行器网络中能量有效的实时分簇路由协议[J]. 计算机研究与发展, 2008, 45(1): 26-33.
- [23] Gungor V C, Akan O B, Akyildiz I F. A Real-Time and Reliable Transport (RT)² Protocol for Wireless Sensor and Actor Networks[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2008, 16(2): 359-370
- [24] Wada T, Kitamoto H, Fukuhara T, et al. A Transport Protocol with Energy Consumption Reduction by Reducing Redundant Transmissions in Wireless Sensor and Actor Networks[C]// IEEE Pacific RIM Conference on Communications, Computers, and Signal Processing. 2009; 302-307
- [25] Ngai C-H, Zhou Yang-fan, et al. LOFT: A Latency-Oriented Fault Tolerant Transport Protocol for Wireless Sensor-Actuator Networks[C]// Global Telecommunications Conference. 2007; 1318-1323

(上接第 20 页)

- [46] Arthi R, Murugan K. Localization in wireless sensor networks by hidden Markov model[C]// 2010 Second International Conference on Advanced Computing (ICoAC). 2011; 14-18
- [47] Wang Y B, Vuran C M, Goddard S. Stochastic analysis of energy consumption in wireless sensor networks[C]// IEEE Communications Society, IEEE Second 2010 proceedings. 2010; 1-9
- [48] Wang Xian-feng, Xiang Jun, Hu Bin-jie. Evaluation and improvement of an energy model for wireless sensor networks[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2009, 22(9): 1318-1323
- [49] Howitt I, Neto R, Wang J. Extended energy model for the low rate WPAN[C]// 2005 IEEE International Conference on Mobile Adhoc And Sensor Systems. 2005; 315-322
- [50] 高研. 无线传感器网络节点能耗建模与仿真[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010
- [51] 李彩云. 无线感知网络节点能耗建模及系统能耗评测的研究与设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011
- [52] 杨凤, 史浩山, 侯蓉晖, 等. 一种基于无线传感器网络数据链路层的能量模型[J]. 传感技术学报, 2007, 20(9): 2070-2074
- [53] Kan B Q, Cai L, Zhu H S. Accurate energy model for WSN node and its optimal design[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2008, 19(3): 427-433
- [54] 崔海霞, 韦岗, 余永聪. 无线传感器网络的能耗分析[J]. 华南理工大学学报, 2010, 38(5): 15-21
- [55] Staehle B, Staehle D. Impact of energy models on energy efficient sensor network routing[C]// 2007 IEEE International Conference. 2007; 1-9
- [56] Wang Q, Hempstead M, Yang W. A realistic power consumption model for wireless sensor network devices[C]// Sensor and Ad hoc Communications and Networks. 2006; 286-295
- [57] Mansour H, Yu Jin-long, Ma Shu-hui. An energy model and network optimization schemes for wireless sensor networks based on the traced data flow[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2009, 22(4): 505-510
- [58] Hormann L B, Glatz P M, Steger C, et al. Designing of efficient energy harvesting systems for autonomous WSNs using a tier model[C]// 2011 18th International Conference on Telecommunications (ICT). 2011; 174-179
- [59] Cheng X L, Deng Z D, Dong Z R. A model of energy consumption based on characteristic analysis of wireless communication and computation[J]. Journal of Computer Research and Development, 2009, 46(12): 1985-1993
- [60] Wu Tian-ying, Yue Kun, Liu Wei-yi. An energy-efficient coalition game model for wireless sensor networks[C]// Proceedings of the 30th Chinese Control Conference. 2011; 4940-4945
- [61] Chouhan S, Balakrishnan M, Bose R. A framework for energy consumption-based design space exploration for wireless sensor nodes[J]. IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, 2009, 28(7): 1017-1024
- [62] Senn E, Laurent J, Juin E, et al. Refining power consumption estimations in the component based AADL design flow[C]// Forum on Specification and Design Languages. 2008; 173-178
- [63] Dhoub S, Senn E, Diguët J, et al. Model driven high-level power estimation of embedded operating systems communication services[C]// 2009 International Conferences on Embedded Software and Systems. 2009; 475-481
- [64] Feiler H P, Gluch P D, Hudak J J. The architecture analysis & design language (AADL): an introduction[S]. USA: International Society of Automotive Engineers, 2006
- [65] Yang Zhi-bin, Pi Lei, Hu Kai, et al. AADL: an architecture design and analysis language for complex embedded real-time systems[J]. Journal of Software, 2010, 21(5): 899-915