

# 无线体域网节能策略综述\*

卢先领<sup>a,b</sup>, 彭能明<sup>a,b</sup>, 陆胜男<sup>a</sup>, 徐保国<sup>a</sup>

(江南大学 a. 物联网工程学院; b. 轻工过程先进控制教育部重点实验室, 江苏 无锡 214122)

**摘要:** 作为无线传感器网络的一个重要分支,无线体域网因其便携、可移动的特点受到各个领域的广泛关注。然而,节点难以得到充电或替换使得能耗问题日益凸显。针对节点能量受限问题,在简要介绍无线体域网结构和特点的基础上,结合已有的研究,分别从物理层、MAC层和网络层等方面分析并总结了已有的节能策略。最后,根据应用需求,提出了几点研究设想。

**关键词:** 无线体域网; 能量受限; 生命周期; 节能策略

**中图分类号:** TP929.5      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1001-3695(2013)02-0325-05

**doi:**10.3969/j.issn.1001-3695.2013.02.002

## Survey of energy-efficient strategy for wireless body area network

LU Xian-ling<sup>a,b</sup>, PENG Neng-ming<sup>a,b</sup>, LU Sheng-nan<sup>a</sup>, XU Bao-guo<sup>a</sup>

(a. School of Internet of Things Engineering, b. Key Laboratory of Advanced Process Control for Light Industry of Ministry of Education, Jiangnan University, Wuxi Jiangsu 214122, China)

**Abstract:** As an important branch of the wireless sensor networks, wireless body area network has aroused extensive attention in various fields for its portable and mobile features. However, that the nodes are difficult to recharge or replace makes the energy issues become increasingly important. To solve this problem, this paper briefly introduced the architecture and features of wireless body area network. Next, combining with the existing researches, it analyzed and summarized some energy-efficient strategies from physical level, media access control level and network level, respectively. Finally, taking account of application requirements, it put forward several future research directions.

**Key words:** wireless body area network (WBAN); energy constrained; lifetime; power-saving strategies

## 0 引言

无线体域网(WBAN)又称体域网(body area sensor networks, BASN)<sup>[1]</sup>,是一种以人体为中心,由和人体相关的网络元素等组成的通信网络,能够通过置于人体周围或人体内部的各种传感器节点对人体的一些重要生理参数(如体温、血压、心率、血氧浓度等)或人体周围的一些环境参数(如温度、湿度、光照强度等)进行感知和采集,继而通过无线的方式发送到人体附近的基站(base station, BS)或移动单元(mobile unit, MU),最后通过Internet上传到终端服务器进行分析和处理,如图1所示。WBAN涉及多学科的高度交叉和多种知识的高度融合,综合了传感器、微机电系统(micro-electro-mechanism system, MEMS)、嵌入式计算、数据融合(data fusion, DF)、现代网络以及无线通信、分布式信息处理等技术,目前已被广泛应用于军事、娱乐、消费电子、智能家居、公共服务,尤其是医疗保健等领域<sup>[2]</sup>。

与传统的以数据为中心无线传感器网络(wireless sensor network, WSN)相比, WBAN有着如下特点:a)网络规模小。研究表明,人体体表或体内大约可以部署10~20个各类传感器节点<sup>[3]</sup>,因此它不可能像WSN那样,向目标区域随机部署大

量的传感器节点,让它们以协作的方式完成对某一参数的采集任务,这样就增加了对单个节点数据处理能力和能耗的要求。b)能量高度受限。对于植入体内的传感器节点很难替换和充电,即便是对可穿戴式的传感节点进行替换也是对人体有侵害性的,而且影响人体的舒适度<sup>[1]</sup>,这就要求每个传感器节点利用有限的能量最大限度地延长自身的生命周期。c)信号传输的衰减快,由于人体组织结构的特异性和阴影效应,信号传输过程中会造成极大的路径损耗<sup>[4,5]</sup>,这就意味着WBAN中通信所需要的能量要比同等规模的其他网络多得多。d)网络的异构性。WBAN中的每个节点因其功用不同而被部署在人体的特定位置,每个节点都以不同的频率和数据速率完成对不同目标参数的采集和发送,因此对单个节点的能耗要求更高。e)无线链路的时变性<sup>[6,7]</sup>。WBAN是以人体为中心的网络,人体姿势的轻微变化(尤其是人体四肢的活动)都会影响整个网络的拓扑结构,由此带来的通信中断而产生的数据重传以及网络拓扑的重构都会消耗大量的额外能量。

WBAN的上述独特要求和制约因素为体域网的应用与研究提出了新的技术问题,如何高效利用体域网中节点的有限能量来延长整个网络的生命周期成为WBAN的首要设计目标。已有的研究综述分别就体域网的数据融合、情景感知、系统技

**收稿日期:** 2012-07-05; **修回日期:** 2012-08-24      **基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(30971689);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(JUSRP21129)

**作者简介:** 卢先领(1972-),男,浙江临海人,副教授,硕导,博士,主要研究方向为无线传感器网络、体域网(jnluxl@gmail.com);彭能明(1987-),男,湖北荆门人,硕士研究生,主要研究方向为无线体域网节能策略;陆胜男(1990-),女,江苏靖江人,硕士研究生,主要研究方向为功率控制;徐保国(1951-),男,江苏淮阴人,教授,博导,主要研究方向为过程控制、智能仪表及现场总线。

术<sup>[2]</sup>和网络结构、医疗保健、安全性以及通信模式等方面<sup>[7-9]</sup>给出了充分讨论。本文主要针对 WBAN 所面临的能量受限问题,结合已有的研究对 WBAN 的节能策略进行了综合分析。

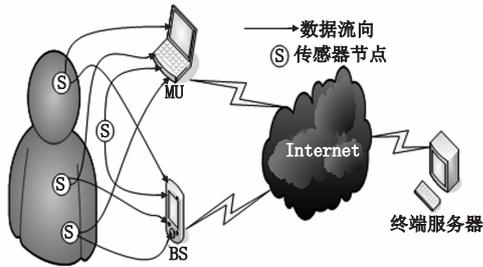


图1 无线体域网的基本框架

## 1 WBAN 节能分析

根据 OSI/RM (open system interconnection/reference model) 的层次结构, WBAN 中节点的能耗主要分布在物理层、MAC 层和网络层,本文接下来将着重从以上三个层面对 WBAN 的节能策略进行探讨,如图 2 所示。

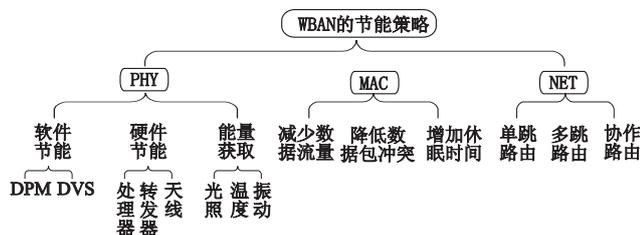


图2 无线体域网的节能策略分析

## 2 物理层节能

### 2.1 研究现状

传感器是 WBAN 感知部分的核心,微型化、低功耗、高精度、智能化、对人体无侵害是传感器应用于 WBAN 的基本前提。早期的研究主要侧重于传感器节点系统功率的管理或调度,如 Sinha 等人<sup>[10]</sup>提出的动态功率管理 (dynamic power management, DPM) 策略,根据处理器、内存、带 A/D 转换的传感器以及无线收发单元的状态组合,将整个节点分为五种工作状态,在嵌入式操作系统的支持下进行切换,既满足了功能的需要,又降低了功耗。Im 等人<sup>[11]</sup>提出了动态电压调节 (dynamic voltage scheduling, DVS) 机制,它是一种基于负载状态来动态调节供电电压以减小系统功耗的节能策略。虽然系统在低电压运行状态会消耗较少的能量,但是一直处于低电压运行状态可能不适用于所有的 WBAN,因为低电压会减缓电路运行速度,无法满足对某些关键信息的实时性要求。WBAN 的负载时延和吞吐量等服务质量 (quality of service, QoS) 在处理实时数据或模式改变的情况下会发生变化。DVS 可以在给定的应用要求下最小化电源电压,但当系统处于高性能模式下时,系统将以高电压运行而产生较高的能耗。

随着嵌入式技术和 MEMS 的发展,对于传感器节点的节能设计开始偏向于超低功耗硬件 (如高性能的处理器、转发器和天线等) 的设计。Zhang 等人<sup>[12]</sup>针对 WBAN 应用中的特定要求,对定制硬件和商业现成 (commercial off the shelf, COTS) 的设计在计算与通信、灵活性与有效性以及数据保真度与能耗之间进行了权衡比较。结果表明,在要求生命周期超过 1~2 周

的特定应用中,定制的集成电路总是能够比 COTS 提供更高的能量效率;而对于那些寿命短 (如几天或更少) 但可充电的系统, COTS 能为大部分 WBAN 的应用场合提供合理的尺寸、性能及寿命。此外,Gu 等人<sup>[13]</sup>提出并设计了一种基于 ISM (industrial scientific medical) 频段的低功率、低电压、高集成度、高性能的转发器,在满负荷工作条件下,电流消耗仅为 5 mA。而对于天线的设计,主要应考虑以下三个要素:反向辐射小、结构紧凑、与人体之间的相互影响小。如 Verbiest 等人<sup>[14]</sup>设计了一种微型化、低成本的印制单极天线,在人体体表显现了较好的节能效果,但天线的工作频率、带宽及发射效率容易受到人体的干扰。为此, Kang 等人<sup>[15]</sup>提出了一种折叠式的超带宽 (ultra wideband, UWB) 天线,它利用斜边结构来实现从 3.1 GHz 到 12 GHz 的超宽频带,仅对人体的邻近效应有略微的影响,而且其特定吸收率 (specific absorption rate, SAR) 要比单级全向天线小很多,节能效果更好。

### 2.2 发展趋势

上述的节能研究工作都是建立在传感器节点在既定能量基础之上的。研究表明,除了从节点的电子电气特性以及功能最优化设计等方面来考虑 WBAN 的节能问题外,还可以考虑增加电池寿命来应对传感器节点 (如植入式节点) 长期工作 (一般为 10~15 年) 所面临的能耗问题<sup>[16]</sup>。如可以设计高容量的微型电池或让电池具备从周围环境 (如光照、热梯度、振动、电磁信号等) 获取能量的功能。然而, WBAN 以人体为中心的特点,使得网络中节点的尺寸必须尽可能地小,以满足人体舒适度的要求,而节点的尺寸直接决定了供电电池的体积和容量<sup>[12]</sup>,这也为电池设计带来了巨大的挑战。所以,利用人体所处的环境或自身条件来为节点电池供给能量将成为未来的一种发展趋势。有研究显示,一个太阳能电池板在室外阳光照耀下可提供高达 15 mW/cm<sup>2</sup> 的能量,在室内灯光照耀下可提供 10 μW/cm<sup>2</sup> 的能量<sup>[17]</sup>。Latre 等人<sup>[7]</sup>指出,还可以将人体的体温或振动转换为电能,比如可以用热电发生器 (thermoelectric generator, TEG) 将人体和周围环境之间的温差转换为电能来为节点供电。创业公司 Perpetuum 成功研制了一种微发电机 PMG7,可以从 100 mg 振动中产生 5 mW/3.3 V 的输出功率。但由于 WBAN 中部分节点的位置是动态变化的,而且用户接触到的能源环境也是不确定的,这给研究带来了极大的困难。所以,另一种很有前景的技术就是研究一种新型能量单元——生物催化剂燃料<sup>[18]</sup>,通过分解人体的葡萄糖来为体内的传感器节点供电。

## 3 MAC 层节能

### 3.1 研究现状

如图 3 所示,体域网中节点的能耗主要来源于射频模块的发送与接收,而 MAC (media access control) 协议直接控制射频模块,对节点功耗有着重要影响。所以,目前对于 WBAN 节能策略的研究主要偏向于高效 MAC 协议的设计。而对于 MAC 协议的设计应根据能量有效性和网络的其他性能进行综合考虑,在实现能量高效的同时,能否满足应用要求是衡量一个好的 MAC 协议的关键因素。WBAN 中的 MAC 协议必须具备下列特征:a) 传输无冲突;b) 稳定的通信误差;c) 能量高效;d) 低时延;e) 能及时对突发情况作出反应。

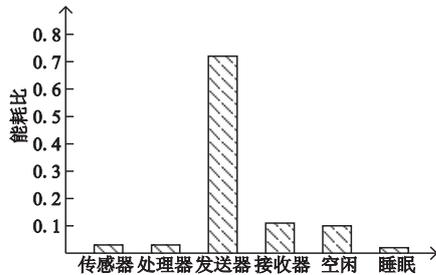


图3 节点各单元的能耗比较

研究表明,造成能量浪费的主要因素有空闲侦听、消息碰撞、窃听、控制报文开销、负载波动和发送失效等<sup>[19]</sup>。目前在 WBAN 的 MAC 协议设计中,主要采用减少数据流量、冲突避免以及增加射频模块休眠时间等方法来减少上述因素带来的能耗。在减少数据流量方面,相继提出了 BSN-MAC<sup>[20]</sup>、CA-MAC<sup>[21]</sup>、BATMAC<sup>[22]</sup> 等协议。BSN-MAC 是一种自适应、基于反馈的、与 IEEE 802.15.4 相兼容的 MAC 协议,它通过调整 IEEE 802.15.4 超帧的参数来减少数据流量;CA-MAC 把帧分为帧头、竞争访问部分以及数据发送部分,通过动态分配竞争访问子帧和数据发送子帧的大小来降低数据流量;BATMAC 是针对人体阴影效应而提出的,通过自动调整帧参数来减少阴影效应带来的流量浪费。BodyMAC<sup>[23]</sup>、MedMAC<sup>[24]</sup>、DQBAN-MAC<sup>[25]</sup>、DCAA-MAC<sup>[26]</sup>、PG-MAC<sup>[27]</sup> 等协议主要用于应对数据冲突。BodyMAC 采用下行和上行机制,利用灵活的带宽分配策略,通过降低可能的包冲突来提高节点的能效;MedMAC 是专门针对无线医疗体域网中吞吐量的差异性而提出的一种能量高效且自适应信道访问的 MAC 协议,通过改变 TDMA 的信道来避免信道访问中的竞争冲突;DQBAN-MAC 采用无冲突队列 (collision resolution queue, CRQ) 来控制传感节点对媒介的访问,通过跨层模糊规则调度算法和能量感知策略来为节点分配无冲突的数据发送时隙,进而由数据发送队列 (data transmission queue, DTQ) 来对传感节点的数据包进行无冲突调度;DCAA-MAC 主要针对无线医疗体域网中信道易受干扰而提出,利用认知无线电 (cognitive radio, CR) 技术对受干扰的信道及时切换,有效避免了传输冲突;PG-MAC 通过将数据传输信道与消息控制信道分离来提高数据发送效率,降低了随机访问竞争中带来的消息碰撞。On-Demand MAC<sup>[28]</sup> 和 VLPM<sup>[29]</sup> 主要通过增加射频模块休眠时间来节省节点能量。On-Demand MAC 引入了一种仅用于信道侦听的辅助信道,这样节点在信道侦听过程中就不会有任何能量开销,极大地延长了节点的寿命;VLPM 是在已有唤醒无线电方法的基础上提出的,主要用于增加射频模块的休眠时间,通过把负载分为上行和下行两种来解决已有唤醒无线电方法在降低能耗时无法兼顾低时延的问题。表 1 对上述 MAC 协议的节能策略进行了汇总。

表 1 相关 MAC 协议的节能策略对比

比较项	减少数据流量	冲突避免	增加休眠时间
BSN-MAC <sup>[20]</sup>	√	×	×
CA-MAC <sup>[21]</sup>	√	×	×
BATMAC <sup>[22]</sup>	√	×	×
BodyMAC <sup>[23]</sup>	×	√	×
MedMAC <sup>[24]</sup>	×	√	×
DQBAN-MAC <sup>[25]</sup>	×	√	×
DCAA-MAC <sup>[26]</sup>	×	√	×
PG-MAC <sup>[27]</sup>	×	√	×
On-DemandMAC <sup>[28]</sup>	×	×	√
VLPM <sup>[29]</sup>	×	×	√

### 3.2 发展趋势

WBAN 是一种与应用高度相关的新兴技术,已有的节能 MAC 协议也都是针对不同的应用场景或应用需求而设计的。所以,没有一种 MAC 协议是适用于所有应用场合的,今后关于 MAC 协议的研究依然会偏向于特定的应用对象,在节能的基础上权衡考虑网络的其他性能(如低时延、高可靠性、高吞吐量等)。比如,在 WBAN 的医疗监护应用中,上述 MAC 协议均未考虑到人体的大部分生理信息(如体温)在一天中的波动幅度并不是很大,且大都处于正常范围内,对这些正常的生理信息没必要进行实时处理。有鉴于此,可以设计一种算法(如模糊逻辑算法)对节点采集到的一些生理信息进行判别和筛选,过滤掉发送队列中的正常信息。然而,已有的模糊逻辑 MAC 协议(如 DQBAN-MAC 等)都是以增加网络负载来改善网络的整体能耗及其服务质量,很难满足 WBAN 负载异构性的要求;此外,对于节点所采集的生理信息进行无筛选的处理,极大地增加了单个节点的能量浪费和整个网络的通信负荷;而且对于人体可能出现的一些突发状况也没有给出合理的应对措施。为此,可以在 TDMA (time division multiple access) 的基础上引入了模糊逻辑控制理论,通过隶属度函数模型对所采集到的生理信息进行模糊化处理,以此得出各生理参数的模糊概率,再由模糊逻辑算法对模糊概率进行逻辑判断,决定是否打开发送器发送数据以及发送的优先级。TDMA 机制的引入,有效避免了数据冲突;模糊逻辑算法的提出,不仅大量减少了数据流量,而且极大地增加了节点射频模块的休眠时间。

## 4 网络层节能

### 4.1 相关研究

根据路由机制的不同,目前对于 WBAN 在网络层的节能策略主要分为单跳路由、多跳路由和协作路由三类。早期对 WBAN 的研究主要倾向于构建端到端的网络结构,能耗不是首要考虑的问题,所以多采用星型拓扑和单跳的通信模式来传输数据。这种直接传输方式对距 sink 节点较近的节点来说可以达到很好的节能效果,但对于远离 sink 节点的节点而言却会因数据传输距离太远而很快耗尽能量,而且伴有很大的路径损耗<sup>[4]</sup>。为此,多跳路由协议被提出并按类别分为基于树的路由<sup>[30-32]</sup>和基于簇的路由<sup>[33]</sup>两种。Braem 等人相继提出了 WASP (wireless autonomous spanning tree protocol)<sup>[30]</sup>和 CICADA (controlling access with distributed slot assignment)<sup>[31]</sup>等基于树的路由协议,通过节点分配的地址信息,以分散的方式来为网络创建路由树,有效避免了数据在路由传输中的冲突,提高了节点的能效。RTT (restricted tree topology) 协议<sup>[32]</sup>通过 RSSI (received signal strength indicator) 将终端节点与协调器之间的路由跳数限制为两跳,子节点根据接收到的信号强度大小来选取自己的转发节点(父节点),这样就使得需要转发的节点数大为减少,极大地减轻了转发节点的通信负载,延长了网络的生命周期。与树状路由相比,基于簇的路由具有更好的节能效果<sup>[4]</sup>。Anybody<sup>[33]</sup>是一种基于 LEACH 的数据采集协议,其簇头的选择不像 LEACH 那样具有随机性,并创建了以簇头为中心的骨干网络,在很大程度上减少了与基站

直接通信的节点数,有效降低了节点的能耗。然而,多跳路由在提高能效的同时也带来了一些新的问题:首先,距 sink 节点较近的节点会以较大几率被周围节点选为下一跳节点而成为网络热点(hotspot),这些节点会很快死亡并很可能影响整个网络的连通性;其次,人体对射频信号(无论近端还是远端)有特定吸收率,而且与其附带的能量密度成正比,人体会将吸收的射频能量转换为热量,如果转换的热量过多而血液循环系统没能有效地将其散发出去,则人体组织将会因过热而被烧坏,因此那些网络热点往往具有很高的能量密度而可能对人体造成伤害。在权衡单跳路由与多跳路由的利弊后,协作路由<sup>[4,34,35]</sup>因其能分散整个网络的传输负载而被广泛应用。文献<sup>[4,34]</sup>根据源节点与 sink 节点之间的距离大小将其分为高低不同的级别,当节点位于高级别时采用多跳路由,而当节点处于低级别时选用单跳路由,这样极大地改善了整个网络的生命周期。DF(decode-and-forward)协议<sup>[35]</sup>采用半双工的模式在源节点与 sink 节点建立了两条通信信道(S-D和S-R-D),数据包经过解码后转发,有效降低了丢包重传造成的能量浪费。表2将上述路由协议的路由机制、优点以及缺点进行了对比分析。

表2 不同路由机制的对比分析

比较项	路由机制	优点	缺点
星型拓扑	单跳路由	网络时延小	能耗高
文献[30]	基于树路由	网络的整体能耗相对较小,网络通信负荷较轻,受人体阴影效应的干扰较小	路由算法较复杂,网络时延较大,容易产生网络拥塞
文献[31]	基于树路由		
文献[32]	基于树路由		
文献[33]	基于簇路由		
文献[4]	协作路由	网络的整体能耗很小,数据丢包率较低,网络时延较小	无法适用于网络拓扑频繁改变的应用场景
文献[34]	协作路由		
文献[35]	协作路由		

## 4.2 发展趋势

尽管上述路由协议在体域网节能方面起到了一定的效果,但目前大部分研究工作仅仅停留在理论层面上,没有考虑到在实际应用中可能出现的一些问题。首先,WBAN异构性的特点使得网络的通信链路呈非对称形态,而已有的研究都是在通信链路为对称的假定下展开的;其次,WBAN的通信链路具有时变性,人体姿势的轻微变化都会改变节点的位置(尤其是部署在人体四肢上的节点),从而导致通信链路频繁中断,而现有的大部分研究仅仅考虑了静态人体网络(即节点位置或通信链路固定)的高能效路由,在实际应用中存在很大的局限性。随着移动通信技术的不断提升,便携、可移动的体域网系统将会得到更为广泛的应用。所以,能效高、健壮性好的路由机制势必成为今后研究的主流。本文认为,可以从以下三个方向着手:

a)可以在网络中引入仅仅用于数据转发的转发节点<sup>[1,4]</sup>来优化WBAN的拓扑结构。如前所述,WBAN中的节点数极其有限,而且都部署在人体的特定位置。所以,可以根据节点的部署位置和人体的结构特征适当地引入一些转发节点来应对人体四肢运动时造成的链路中断。如在膝盖处引入转发节点就可以保持脚踝处的终端节点与腰部的 sink 节点之间通信链路的健壮性,因为膝盖与脚踝之间以及膝盖与腰部之间的相对位置是固定的。即便如此,在现实中引入的转发节点也并不是越多越好:一方面,过多的节点会极大地影响人体的舒适度;另一方面,数据经由过多的中继节点进行转发会降低节点的数

据传输效率;此外,过多地引入一些不必要的节点是很不经济的。所以,如何部署转发节点以及可引入的最少转发节点数为该方向首要解决的问题。

b)可以采用自适应功率调节的路由机制。研究表明,人体姿势的状态信息与节点的发射功率有着紧密的联系<sup>[36]</sup>。为此,可以根据节点间的状态信息将链路质量分为好和坏两种状态。当链路质量较差(坏)时就增加节点的发射功率,反之亦然。这种方法无须知道节点的部署位置,通过节点发射功率的自适应调节来保持网络的连通性,可以在很大程度上减小丢包带来的重传能耗。然而,如何计算和评估节点间的链路质量是采用这种路由机制的关键。

c)可以设计带预测估计的、具有学习能力的自适应路由算法。人体的状态信息反映了网络的链路状态,人体的一系列姿势变化也可以看做一个 Markov 过程<sup>[37]</sup>,所以可以建立一个状态估计模型对网络的通信链路进行预测,当通信链路即将或已经出现中断时,自动选择最优的路由路径。此外,人体的一系列日常活动并不是杂乱无章的,可以在状态估计模型中引入一种学习算法对模型中的各种状态加以训练,使其能快速适应链路的频繁改变,从而达到节省传输能耗的效果。

## 5 结束语

本文在已有研究的基础上,从节点的软件控制、硬件设计、MAC协议以及路由协议等方面总结了相关的节能策略,并分析了它们在WBAN应用中的贡献与不足,以此提出了一些可能的节能优化机制。

当然,对于WBAN的节能研究远非本文所提及的内容,随着移动通信技术及其他相关技术的不断成熟和发展,便携、可移动的WBAN应用系统必将为更多应用领域所接受。与此同时,情景感知、嵌入式计算、数据融合、通信协议以及跨层设计等技术都将为WBAN的能量优化研究提供必要的支持。可以期待,WBAN中的单个节点乃至整个网络的生命周期无限延长是可以实现的。

### 参考文献:

- [1] EHYAIE A, HASHEMI M, KHADIVI P. Using relay network to increase life time in wireless body area sensor networks[C]//Proc of International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks & Workshops. 2009: 1-6.
- [2] 宫继兵,王睿,崔莉. 体域网 BSN 的研究进展及面临的挑战[J]. 计算机研究与发展,2010,47(52): 737-753.
- [3] NATARAIAN A, De SILVA B, KOK-KIONG Y, et al. To hop or not to hop: network architecture for body sensor networks[C]//Proc of the 6th Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor, Mesh and Ad hoc Communications and Networks. 2009: 1-9.
- [4] BRAEM B, LATRE B, MOERMAN I, et al. The need for cooperation and relaying in short-range high path loss sensor networks[C]//Proc of International Conference on Sensor Technologies and Applications. 2007: 566-571.
- [5] YOO H J, CHO N, YOO J. Low energy wearable body-sensor-network[C]//Proc of the 31st Annual International Conference of the IEEE EMBS. 2009: 3209-3212.
- [6] NABI M, BASTEN T, GEILEN M, et al. A robust protocol stack for multi-hop wireless body area networks with transmit power adaptation

- [C]//Proc of the 5th Annual International ICST Conference on Body Area Networks BodyNets. 2010; 1-7.
- [7] LATRE B, BRAEM B, MOERMAN I, *et al.* A survey on wireless body area networks[J]. *Wireless Networks*,2011,17(1): 1-18.
- [8] CHEN Min, GONZALEZ S, VASILAKOS A, *et al.* Body area networks; a survey[J]. *Mobile Networks and Applications*,2011,16(2): 171-193.
- [9] ULLAH S, HIGGINS H, BRAEM B, *et al.* A comprehensive survey of wireless body area networks on PHY, MAC, and network layers solutions[J]. *Journal of Medical Systems*,2012,36(3): 1065-1094.
- [10] SINHA A, CHANDRAKASAN A. Dynamic power management in wireless sensor network[J]. *IEEE Design & Test of Computer*, 2001,18(2): 62-74.
- [11] IM C, KIM H, HA S. Dynamic voltage scheduling technique for low-power multimedia application using buffers[C]//Proc of International Symposium on Low Power Electronics and Design. 2001: 34-39.
- [12] ZHANG Yan-qing, SHAKHSHEER Y, BARTH A T, *et al.* Energy efficient design for body sensor nodes[J]. *Low Power Electron*, 2011, 1(1): 109-130.
- [13] GU Jiang-min, LIM W M, YEO K S, *et al.* Low power transmitter design for BAN[C]//Proc of IEEE Biomedical Circuits and Systems Conference. 2007: 175-178.
- [14] VERBIEST J R, GUY A E. A novel small-size printed tapered monopole antenna for UWB WBAN[J]. *Antennas and Wireless Propagation Letters*,2006,5(1): 377-379.
- [15] KANG C H, WU S J, TARNG J H. A novel folded UWB antenna for wireless body area network [J]. *IEEE Trans on Antennas and Propagation*,2012,60(2): 1139-1142.
- [16] TIMMONS N F, SCANLON W G. Analysis of the performance of IEEE 802.15.4 for medical sensor body area networking[C]//Proc of the 1st Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor and Ad hoc Communications and Networks. 2004: 16-24.
- [17] JAIN P C. Wireless body area network for medical healthcare[J]. *IETE Journals*,2011,28(4): 362-371.
- [18] SASAKI S, KARUBE I. The development of micro fabricated biocatalytic fuel cells[J]. *Trends in Biotechnology*,1999,17(2):50-52.
- [19] GOPALAN S A, KIM D H, NAH J W, *et al.* A survey on power-efficient MAC protocols for wireless body area networks[C]//Proc of the 3rd IEEE International Conference on Broadband Network and Multimedia Technology. 2010: 1230-1234.
- [20] LI Hua-ming, TAN Jin-dong. An ultra-low-power medium access control protocol for body sensor network[C]//Proc of the 27th Annual International Conference of the Engineering in Medicine and Biology Society. 2005: 2451-2454.
- [21] LIU Bin, YAN Zhong-sheng, CHEN Chang-wen. CA-MAC: a hybrid context-aware MAC protocol for wireless body area networks[C]//Proc of the 13th International Conference on e-Health Networking Applications and Services. 2011: 213-216.
- [22] MAMAN M, OUVRY L. BATMAC: an adaptive TDMA MAC for body area networks performed with a space-time dependent channel model[C]//Proc of the 5th International Symposium on Medical Information and Communication. 2011: 1-5.
- [23] FANG Geng-fa, DUTKIEWICZ E. BodyMAC: energy efficient TDMA-based MAC protocol for wireless body area networks[C]//Proc of the 9th International Symposium on Communications and Information Technology. 2009: 1455-1459.
- [24] TIMMONS N F, SCANLON W G. An adaptive energy efficient MAC protocol for the medical body area network[C]//Proc of the 1st International Conference on Wireless Communication, Vehicular Technology, Information Theory and Aerospace & Electronic Systems Technology. 2009: 587-593.
- [25] OTAL B, ALONSO L, VERIKOUKIS C. Highly reliable energy-saving MAC for wireless body sensor networks in healthcare systems [J]. *Journal on Selected Areas in Communications*,2009,27(4): 553-565.
- [26] LEE B, YUN J, HAN K. Dynamic channel adjustable asynchronous cognitive radio MAC protocol for wireless medical body area sensor networks [J]. *Communications in Computer and Information Science*,2011,266(1): 338-345.
- [27] ZHANG Yan, DOLMANS G. Priority-guaranteed MAC protocol for emerging wireless body area networks[J]. *Annals of Telecommunications*,2011,66(3): 229-241.
- [28] ZHANG Xiao-yu, JIANG Han-jun, CHEN Xin-kai, *et al.* An energy efficient implementation of on-demand MAC protocol in medical wireless body sensor networks [C]//Proc of IEEE International Symposium on Circuits and Systems. 2009: 24-27.
- [29] ULLAH N, KHAN P, KWAK K S. A very low power MAC (VLPM) protocol for wireless body area networks[J]. *Sensors*,2011,11(4): 3717-3737.
- [30] BRAEM B, LATRE B, MOERMAN I, *et al.* The wireless autonomous spanning tree protocol for multihop wireless body area networks [C]//Proc of the 4th Annual International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems-Workshops. 2006: 1-8.
- [31] LATRE B, BRAEM B, MOERMAN I, *et al.* A low-delay protocol for multihop wireless body area networks[C]//Proc of the 4th Annual International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems: Networking and Services. 2007: 1-8.
- [32] CHEBBO H, ABEDI S, LAMAHEWA T A, *et al.* Reliable body area networks using relays: restricted tree topology [C]//Proc of International Conference on Computing, Networking and Communications. 2012: 82-88.
- [33] WATTEYNE T, ISABELLE A B, DOHLER M, *et al.* Anybody: a self-organization protocol for body area networks[C]//Proc of the 2nd International Conference on Body Area Networks. 2007: 61-67.
- [34] JOSEPH W, BRAEM B, REUSENS E, *et al.* Design of energy efficient topologies for wireless on-body channel[C]//Proc of the 17th European Wireless Conference. 2011: 82-88.
- [35] FERRAND P, MAMAN M, GOURSAUD C, *et al.* Performance evaluation of direct and cooperative transmissions in body area networks[J]. *Annals of Telecommunications*,2011,66(3): 213-228.
- [36] KAILAS A. Power allocation strategies to minimize energy consumption in wireless body area networks[C]//Proc of Annual International Conference of IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. 2011: 2204-2207.
- [37] WEI Hong-xing, HE Jin, TAN Jin-dong. Layered hidden Markov models for real-time daily activity monitoring using body sensor networks[J]. *Knowledge and Information Systems*,2011,29(2): 479-494.