

## 基于预测方法的无线体域网跨层优化研究

王力立\* 黄成 吴晓蓓  
(南京理工大学自动化学院 南京 210094)

**摘要:** 为改善无线体域网的能效和传输可靠性,该文针对其具有资源有限、信道质量波动频繁、所传输数据有异构性等特点,提出一种基于链路质量预测的跨层优化方案。通过对物理层、网络层和 MAC 层的松散耦合,自适应地选择传感器节点的传输功率,并且建立高效节能的端到端路由。仿真结果显示,该方案相对于已有的单层协议,整体提高了体域网的能量效率和传输可靠性。

**关键词:** 无线体域网; 功率控制; 路由选择; 动态链路

**中图分类号:** TP393

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-5896(2018)08-2006-07

**DOI:** 10.11999/JEIT171007

## Cross-layer Optimization for Wireless Body Area Networks Based on Prediction Method

WANG Lili HUANG Cheng WU Xiaobei

(School of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** In order to improve the energy efficiency and reliability of Wireless Body Area Networks (WBANs), this paper takes full consideration of characteristics of WBANs, such as limited resources, frequent channel quality fluctuations, heterogeneous data traffic, and proposes a Cross-Layer Optimization scheme based on link quality prediction (CLO algorithm). Through the loose coupling of physical layer, network layer and MAC layer, the transmission power of every sensor node is adaptively chosen, and the energy-efficient end-to-end routing is established. Simulation results show that the proposed scheme can improve the energy efficiency and transmission reliability of WBANs as compared with the existing single layer protocols.

**Key words:** Wireless Body Area Networks (WBANs); Power control; Routing; Dynamic link

### 1 引言

近年来,随着电子设备小型化以及无线技术在短距离、超低功耗和低数据率等方面的进展,无线体域网(Wireless Body Area Networks, WBANs)广泛引起了医疗、体育、娱乐、军事等领域的兴趣<sup>[1]</sup>。这其中,普适的医疗服务无疑具有更为广泛的需求和重大的意义<sup>[2]</sup>。在医疗监护中, WBANs 由一组植入到使用者体表或者体内的医学传感器以及协调器(如个人数字助理(PDA)、智能手机)组成。其目的是远程收集、存储和处理病人的生理参数,并为他提供无处不在的医疗服务。

虽然 WBANs 派生于无线传感器网络(WSNs),但二者间存在巨大差异:(1)动态的、间歇的信道, WBANs 无线信道同时遭受多径快衰落以及时变慢

衰落,后者主要是由于人体的遮蔽和使用者的姿势变化引起的,因而人体阴影效应代替链路距离成为影响信道质量的主要因素<sup>[3]</sup>;(2)严格的发送功率限制,为了限制邻居干扰并且降低电磁辐射对人体器官的损伤, WBANs 传感器一般保持较低的传输功率水平(IEEE 802.15.6 标准规定无线体域网中节点的最大发射功率为 1 mW(0 dBm),医疗专用节点的建议发送功率为 0.1 mW(-10 dBm)),因而通信范围也比较小(通常不超过 3 m<sup>[1]</sup>);(3)与应用密切相关,不同于传统的 WSNs,一个体域网中的每个传感器节点在延迟和数据速率等方面都有自己的要求,收集到的医疗数据也有不同的重要性、紧急性;(4)资源受限,由于用于人体佩戴、植入的传感器节点的尺寸有限,尤其是植入式节点的电池更换及其不便,因此无线体域网对数据传输的能量效率、计算效率提出了较苛刻的要求。这给 WBANs 带来了新的技术挑战,需要特殊协议的设计以满足它们的特定需求。比如,制定合适的物理层和 MAC 层规范。此外,建立在 MAC 层和物理层之上,设计可

收稿日期: 2017-10-26; 改回日期: 2018-03-26; 网络出版:

\*通信作者: 王力立 liliwang@njust.edu.cn

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助(30918011329)

Foundation Item: The Fundamental Research Funds for the Central Universities(30918011329)

靠的路由和网络架构以实现低能耗和低延迟的端到端通信，也是一项重要挑战。

文献[1]和文献[4]通过邻居传感器间周期性交换控制报文(Hello Message)进行链路质量估计，据此对链路可靠性进行分类，并在此基础上提出了OMAR路由协议，从投递率和能耗的角度优化端到端路由。文献[5]则基于信道状态信息，利用马尔可夫决策过程计算最短路径来最大化网络生命周期。文献[6]利用人体动作的规律性，提出了基于链路质量预测的PSR路由机制。文献[7]提出了一个基于数据优先级的跨层介质访问控制协议PCLMAC，并进一步提出了体域网内以及网际间路由协议，可与PCLMAC协作执行。文献[8]在IEEE 802.15.4标准的基础上，针对体域网中低优先级数据设计了一种流量自适应的基于优先级的超帧结构，实现了网络的低能耗、高吞吐量和低延迟。以上研究主要集中在网络层和MAC层的节能和可靠传输方面。另一方面，WBANs的信道状态波动剧烈，传感器节点使用固定不变的发射功率并不合适。所以，需要研究自适应功率控制机制来延长网络的生存期和提高可靠性。为了实现WBANs的自适应功率控制，文献[9]将人体姿态建模为随机线性系统，并提出了基于线性二次型高斯控制预测模型，通过对人体姿态的预测自适应调整传输功率。但是，该预测模型计算复杂，也没有考虑到负载均衡的问题。文献[10]面向资源受限的体域网设备，采用闭环控制与姿态、运动检测相结合的方法，提出了一种新的节点功率控制机制，但是该机制必须借助惯性传感器采集加速度信号，因此增加了额外的网络硬件开销。此外，以上研究均忽略了功率控制和路由机制的内在联系和制约关系。

为此，本文研究了WBANs中跨层优化问题，设计了基于对链路质量的动态预测的跨层优化方案。该优化方案通过对WBANs物理层(功率控制)、网络层(路由机制)和MAC层(退避时间机制)的松散耦合，自适应地选择传感器节点的传输功率，并且建立高效节能的端到端路由。本文中MAC层采用的是IEEE 802.15.6所建议的启用信标的TDMA方案(Beacon-enabled TDMA)，在该MAC层协议中，时间被分成了等长的超帧结构。但是本文方案并不依赖于MAC协议，它同样适用于无信标机制的竞争型MAC协议。

## 2 链路质量预测方法

链路质量估计是无线网络通信栈的基本模块，它是路由协议、定位算法和自组织技术等上层协议的基础。因为人体传感器会呈现有规律的运动，即

周期性。如，游泳、走路、划船等有重复性的动作，使得邻居节点、链路质量也会周期性变化。因而，WBANs的链路质量具有较强的可预测性。考虑到协调器通常比普通的传感器节点计算能力更强，本文针对节点与协调器之间的链路以及节点与节点之间的链路，提出两种计算复杂度不同的预测方法。

### 2.1 节点与协调器之间的链路质量预测

在WBAN网络中，需要传输的都是至关重要的生命体征参数，实验研究表明在通信过程中转发的跳数越多，通信时延越大，因此假定传感器节点和协调器间默认的通信方式是直接通信，而不经由多跳转发。考虑到WBANs信道质量的时空相关性，提出以下基于自回归AR时间序列模型的节点与协调器之间的链路质量预测方法。

假定协调器记录下所有来自节点的数据分组的RSSI，以及该分组的时间戳。RSSI是接收信号强度，可以很方便地由节点通信模块内置的接收强度指示器给出，是一种常见的链路质量衡量指标<sup>[6,10]</sup>。将RSSI视作传感器节点*i*和协调器*s*间的瞬时链路质量，记为 $R_{is}$ 。考虑滑动窗口 $W_T$ ，在时刻 $t-1$ ，协调器*s*针对每个节点*i*都会维护 $W_T$ 时间内的瞬时链路质量历史：

$$Q_{is} \ t-1 = R_{is} \ t-W_T, \dots, R_{is} \ t-2, R_{is} \ t-1 \quad (1)$$

将该瞬时链路质量历史视为一个平稳过程，可以考虑AR  $p$ 模型如式(2)：

$$R_{is} \ t = \phi_1 R_{is} \ t-1 + \dots + \phi_p R_{is} \ t-p + \varepsilon_i \ t \quad (2)$$

其中， $\phi_i$ 是自回归参数， $\varepsilon_i \ t$ 是残差项，当模型合适时，它是一个正态分布的、均值为0的白噪声过程，模型阶 $p$ 取值通常小于 $W_T$ 。本文采用SBC(Schwartz Bayes Criterion)定阶准则进行定阶，将得到的预测值记为 $R_{is} \ t$ ，实际测量值记为 $R_{is} \ t$ ，则有预测误差：

$$e_i \ t = |R_{is} \ t - R_{is} \ t| \quad (3)$$

规定预测误差只有在满足式(4)时才是有效的。

$$\sqrt{\frac{1}{l} \sum_{k=0}^{l-1} e_i \ t-k - \bar{e}}^2 \leq v \quad (4)$$

这里， $l$ 是指定的预测步数， $\bar{e}$ 是这 $l$ 次预测的平均预测误差， $v$ 是预测准确度的门限值。如果预测误差不满足式(4)，我们则采用基于预测误差序列的修正办法<sup>[11]</sup>提高预测准确性， $t$ 时刻的误差修正值ECV计算如式(5)：

$$ECV_t = \frac{\sum_{t-\Delta-1 \leq k < t} \alpha^{t-k} e_i \ k}{\Delta - 1} + \frac{\sum_{t-\Delta-1 < k < t} \alpha^{t-k} e_i \ k - e_i \ k-1}{\Delta - 2} \quad (5)$$

其中, 常数 $\Delta$ 是误差观测窗口的长度, 参数 $\alpha$ 是历史误差影响衰减因子。该修正值由误差观测窗口内的误差加权平均值, 以及相邻误差变化值的加权平均值组成。前者反映了误差的整体情况, 后者反映了误差的变化趋势。最终 $t$ 时刻的链路质量预测值如式(6):

$$R_{is} t = R_{is} t - ECV_t \quad (6)$$

接着, 协调器会在下一个时隙到来前把所预测的链路质量发送给相应的节点。如果把一个超帧的持续时间视为一个预测单元, 那么由于采用的是启用信标的 TDMA 方案, 协调器会在每一个超帧开始时广播信标帧, 因而可以直接将该预测信息加入到信标中。

## 2.2 节点与节点之间的链路质量预测

传感器节点体积小、质量轻, 它的微处理器的计算能力以及存储器的存储空间都有限。在计算两节点之间的链路质量时, 引入指数加权滑动平均(EWMA)方法。在时刻 $t$ 到来之前, 节点 $i$ 预测它自己与其它节点间的链路质量:

$$R_{ij} t = \beta R_{ij} t - 1 + 1 - \beta \sum_{k=t-W_T}^{t-2} R_{ij} k \quad (7)$$

其中,  $\beta$ 是0-1之间的权重因子, 协调历史数据与最新预测值的权重。 $\beta$ 值越大, 历史数据的影响衰减越快。不同的人体运动情况需要不同的权重。比如, 跑步时的链路质量变化比较迅速,  $\beta$ 应该取值大一些; 而慢走时则相反。此外,  $\beta$ 的取值还与滑动窗口 $W_T$ 的大小有关,  $W_T$ 越大历史数据越多,  $\beta$ 值应该越小才能增加预测的准确性。在本文的仿真实验中发现当设置 $W_T = 10$ 时,  $\beta$ 值取在0.1~0.2之间可以获得较为理想的预测结果。不同的应用场合下 $\beta$ 的最佳取值会有所不同。

基于节点间的链路质量预测, 每个节点 $i$ 维护一张邻居节点列表 $Nb_i$ , 该节点与此列表中所有节点的链路质量均满足最低门限要求。即

$$Nb_i = j | R_{i,j} t > R\_H \quad (8)$$

通过这种简单的预测方法, 计算能力有限的传感器节点就可以预测出它和邻居节点之间的链路质量。

## 3 跨层优化方案的设计

### 3.1 设计思路

一旦链路质量被预测, 依据最可靠的链路, 可以建立网络架构或者拓扑, 比如使用基于生成树的方法<sup>[12]</sup>。但是, 随着人体姿态和环境的改变, 信道状况会发生剧烈变化。而传输功率能显著影响网络连通性和路由路径的稳定性, 并决定了要实现和支持的主要网络层功能(体系结构、路由方案等)。所

以, 为了实现数据传输的可靠性以及能量高效性, 需要动态调整节点的传输功率。与此同时, 大量研究表明一跳星型拓扑结构不能满足时变环境下 WBANs 的可靠性要求, 因此多跳拓扑结构得以被采用<sup>[13-17]</sup>。它允许传感器节点互相转发信息以提高通信的鲁棒性。多跳网络中路由机制的性能非常关键。为了能综合优化 WBANs 的传输能效和传输可靠性, 本文提出结合功率控制和路由协议的跨层优化方案。

功率控制的基本思想是, 正常情况下节点可以和协调器直接通信, 但当源节点和协调器间的链路质量预测值 $R_i t$ 高于上限值 $R\_H$ 时, 就需要降低发射功率以节约能量; 反之, 当 $R_i t$ 低于下限值 $R\_L$ 时, 就需要提高发射功率以增强传输可靠性。这种策略在节点能量充足时可以胜任, 但在节点的剩余能量水平较低时, 一味地提高发射功率会导致能量更快地被消耗殆尽。所以, 进一步将之细分为4类情况处理:

第1类, 剩余能量不足, 则降低发射功率, 采用中继转发机制;

第2类, 剩余能量充足, 且链路质量适中, 则无需改变传输模式;

第3类, 剩余能量充足, 且链路质量低于下限值, 则增加发射功率;

第4类, 剩余能量充足, 且链路质量优于上限值, 则降低发射功率。

该优化方案中, 物理层的功率控制与网络层的中继转发机制被同时考虑, 电池电量和信道质量信息也被从物理层馈送到网络层, 以避免路径包括信道进入糟糕的状态或耗尽节点能量。因此, 这是一种跨层的优化行为。

### 3.2 优化算法

为了便于量化衡量以上4类情况, 提出下列3个关键参数:

(1) 可持续工作时间(ST): 该参数反映了单个节点在某种工作模式下可以持续工作的时间长度(用超帧数衡量), 它与电池的剩余能量、数据比特率以及节点的负载情况有关。本文采用 IEEE 802.15.6 TG6 小组报告中给出的信道模型和统计数据<sup>[18]</sup>, 将输出功率 $P_{tx}(\text{dBm})$ 和接收功率 $P_{rx}(\text{dBm})$ 转换为单位时间内的能耗 $P_t(\text{mW})$ 和 $P_r(\text{mW})$ , 则一个超帧内节点发射数据所消耗的能量为

$$E_{tx} = P_t T_{tx} = P_t \frac{D_{tx}}{v_{tx}} \quad (9)$$

其中,  $T_{tx}(\text{s})$ 是发射天线工作时长,  $D_{tx}(\text{bit})$ 是所发射数据分组的大小,  $v_{tx}(\text{bit/s})$ 是数据速率。同样,

一个超帧内节点接收数据所需要的能量为

$$E_{re} = P'_t T_{re} = P'_t \frac{D_{re}}{v_{re}} \quad (10)$$

令  $E_i$  表示节点  $i$  的剩余能量，则节点的可持续工作时间可以表示为

$$ST = E_i / (E_{tx} + E_{re}) \quad (11)$$

(2)长期信道状态(LCS): 该参数评估节点与协调器之间的信道在未来一段时间内的波动情况，反映了信道的稳定性，用链路质量预测值的熵表示。

$$LCS_i = \sum_{k=0}^{l-1} -\frac{R_i(t-k)}{R_{i\_max}} \lg \frac{R_i(t-k)}{R_{i\_max}} \quad (12)$$

其中， $R_{i\_max}$  表示这段时间内节点  $i$  至协调器的链路质量最大值， $l$  是预测步数。因为  $\frac{R_i(t-k)}{R_{i\_max}}$  的值在

0~1 之间，所以  $-\frac{R_i(t-k)}{R_{i\_max}} \lg \frac{R_i(t-k)}{R_{i\_max}} \leq e^{-1}$ ，可知

$LCS_i \leq le^{-1}$ 。熵越大表示越混乱，即信道的动态性强、稳定性差。

(3)数据优先级(DP): 考虑到体域网中的每个传感器节点在延迟和数据率方面有自己的要求，并且收集到的生理数据的重要性也各异，我们把通信数据分成 3 类：紧急数据、延迟敏感数据和一般数据。其中，紧急数据关系到病人的生命安全，通常是警报类的消息，需要以快速、可靠的方式传输给协调器，优先级最高；延迟敏感数据的优先级次之，视频或语音类信息属于此类范畴；而一般数据的优先级最低。因为传输时延与传输跳数密切相关，所以优先级越高的数据越倾向于直接传输给协调器。

基于这 3 个关键参数，本文提出了利用跨层技术的优化方案，采用分布式处理方法。一旦节点预

测出自己下一时刻的链路质量，首先会更新可持续工作时间、长期信道状态、数据优先级以及邻居节点列表等相关信息。然后，算法将优先关注节点的生存问题，判断节点的可持续工作时间  $ST$  是否已经低于最低门限值。若  $ST$  低于最低门限值，则降低节点能耗，采用中继转发的数据传输模式；相反，若  $ST$  高于最低门限值，则在保持原有通信模式的基础上进一步优化发射功率的选择，以实现能效和通信可靠性之间的均衡。具体而言，节点  $i$  上执行的算法伪代码以及相应的流程图如表 1 的算法 1 和图 1 所示。

表 1 跨层优化算法

算法 1 跨层优化算法

- (1)输入下一时刻链路质量预测值;
- (2)更新  $ST_i$ ,  $DP_i$ ,  $LCS_i$ ,  $Nb_i$  ;
- (3)如果  $ST_i \leq ST\_Th$  , 则降低发射功率;
- (4)  $P_{tx} = P_{tx\_m}$  ;
- (5) For  $Nb_i = \emptyset \cap P_{tx} \neq P_{tx\_max}$  ;
- (6)  $P_{tx} = P_{tx} + \Delta P$  ;
- (7) End For;
- (8) 更新  $Nb_i$  , 选择中继节点  $Re\_j$  ;
- (9)  $Re\_j = \arg \max_{j \in j | ST_j > ST\_Th} LCS_j \cap Nb_i$  ;
- (10)如果  $ST_i > ST\_Th \cap R_{is}(t) \leq R\_L$  , 则增大发射功率;
- (11)  $P_{tx} = P_{tx} + \frac{R\_L - R_{is}(t)}{R\_L} (P_{tx\_max} - P_{tx})$  ;
- (12)如果  $ST_i > ST\_Th \cap R_{is}(t) \geq R\_H$  , 则降低发射功率;
- (13)  $P_{tx} = P_{tx} - \frac{R_{is}(t) - R\_H}{R_{is}(t)} (P_{tx} - P_{tx\_m})$  ;
- (14)如果  $ST_i > ST\_Th \cap R\_L \leq R_{is}(t) \leq R\_H$  , 则发射功率不变。

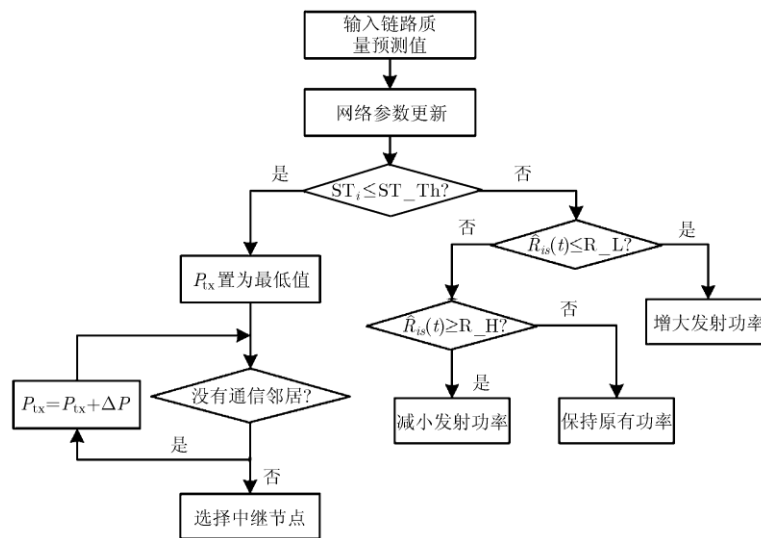


图 1 算法流程图

在算法 1 的第 1 行中, 节点  $i$  与协调器之间, 以及与邻居节点之间的链路质量会被预测。在第 3~9 行中, 如果节点的可持续工作时间  $ST$  降低到门限值  $ST\_Th$  以下, 则不再与协调器直接通信, 而在邻居列表中选择中继节点将数据转发给协调器。且中继节点在能量充足的前提下, 应该具有最高的 LCS, 这样可以避免路由的频繁变换。10 行和 11 行表示如果节点的  $ST$  在门限值以上, 但是  $R_{is}$  却低于下限值, 那么就需要通过增加发射功率来提高与协调器  $s$  之间的通信可靠性。反之, 则要降低发射功率节约能量(见 12 行和 13 行)。如第 11 和第 13 行所示, 功率的调整幅度与链路质量的预测值和门限值之间的相对比值线性相关, 采用这种调节策略主要是考虑到自由空间模型中, 传感器节点收发机距离固定时, RSSI 值与发射功率(单位 dBm)近似呈线性关系。

该优化方案的时间复杂度主要由协调器链路质量预测、节点间链路质量预测以及跨层优化算法组成。不妨将网络节点总数记为  $N$ , 节点邻居列表中的邻居数目记为  $N'$ , 传感器节点共有  $\Omega$  个功率等级, 那么这 3 部分的时间复杂度分别为  $O N$ ,  $O N$ ,  $O \Omega N N'$ , 那么总的时间复杂度为  $T(n) = O N + O N + O \Omega N N' = O N N'$ 。通常情况下 WBANs 中传感器节点数量少于 20 个<sup>[15]</sup>, 继而有

$$T(n) = O N N' \leq O 20^2 \approx 1 \quad (13)$$

表明本文的优化方案具有良好的网络可扩展性。

### 3.3 算法实现

为了保证路由的稳定性, 规定节点选择了中继转发节点后就会一直使用它, 只有遇到以下情况才更换新的中继转发节点:

- (1) 当前中继节点的可持续工作时间降到阈值以下;
- (2) 当前中继节点与协调器之间的信道质量退化;
- (3) 失去与原中继节点的连接;
- (4) 当前中继节点超载。

此外, 因为上述优化算法是分布式的, 因而可能会产生多个节点同时进行局部优化决策, 从而导致不优或者全局决策失败的情况。为此, 引入退避时间(Backoff Time)机制, 不同的节点在进行决策之前, 需要等待不同的退避时间:

$$BT = \tau ST \times T_B + 1 - \tau \text{ PRI} \times T_B \quad (14)$$

其中, 参数  $\tau$  是 0~1 之间的权重因子, PRI 是数据优先级, 反映了节点所采集数据的重要性, 节点所采集的生理数据越重要, 等级就越高, 相应的 PRI 值

就越小。例如, 超出了医学警戒线的脉搏数据要比正常范围内的体温数据具有更高的优先级。通过优先级设置, 应用层的 QoS 要求被传递到 MAC 层, 以便为正在运行的医疗应用程序实现更好的资源分配。从式(14)可见, 可持续工作时间短、数据优先级高的节点可以优先决策, 而调节  $\tau$  值可以达到能量和数据优先级的折中。在保证节点一定生命周期的前提下, 应该使  $\tau$  的取值尽量小, 以满足无线体域网中对高优先级数据成功投递率的保障。在本文的 4.3 节中通过一系列仿真实验给出了具体的参数  $\tau$  取值分析。

## 4 仿真分析

本文使用 OPNET 仿真软件实现跨层优化算法(CLO 算法)。正如第 1 节所介绍的那样, 因为目前同时考虑路由机制和功率控制的 WBANs 协议很少见。所以, 本文在仿真中会和已有的 PSR 算法<sup>[6]</sup>, Xiao 等人<sup>[19]</sup>提出的算法进行比较。PSR 是基于链路质量(RSSI 值)预测的路由算法, PSR 基于最小跳数的贪婪算法, 贪婪转发的逻辑是把数据包转发到比当前节点离协调器更近的节点。文献[19]的算法是一种较经典的自适应的功率控制机制, 可以灵活地平衡网络能效和数据可靠性, 该机制可以取得很好的控制效果, 而且易于实现。

和 PSR 算法一样, 本文采用 IEEE 802.15.6 给出的简化信道模型, 模型参数选择 IEEE 802.15 第 6 工作组建议的 2.4G 频段下室外环境中的最佳参数。节点的部署方式也与 PSR 算法一样, 在身高 1.7 m 的成年人身上部署 12 个节点, 其中协调器位于左腰处。仿真中人体运动模式在 0.5 m/s 的步行、3 m/s 的跑步之间来回切换, 每种模式的持续时间为 50~100 s。MAC 层采用 IEEE 802.15.6 所建议的启用信标的 TDMA 方案(Beacon-enabled TDMA), 以及多点到点的数据传输方式。节点参照使用 CC2420 RF 收发器的能耗模式<sup>[20]</sup>, 节点发送一个数据分组能耗为 0.02 J, 接收单位数据能耗为 0.01 J。RSSI 的上下限分别设置为 -70 dBm 和 -80 dBm。假定 CLO 算法和文献[19]的算法中节点发射功率可以在 -15~10 dBm 之间调节, 而 PSR 算法因为没有功率调节机制, 所以发射功率一直固定为 0 dBm。在没有特别说明的情况下, 退避参数  $\tau = 0.4$ 。下面主要从能耗和通信可靠性两个方面评价算法。

### 4.1 能耗

如前所述, 不像协调器, 传感器节点的能量受限。因此, 计算每个节点每秒产生 20 个数据分组, 仿真时间为 300 s 时, 网络中单个节点的平均能耗。

得到的结果如图 2 所示。图中显示，同样有功率控制机制，但本文提出的跨层优化 CLO 算法中的节点平均能耗要低于文献[19]提出的算法。这主要是因为 CLO 算法不仅根据链路质量自适应地调节功率等级，还会根据节点的可持续工作时间的长短决定是否降低发射功率，用短距离多跳转发的方式代替远距离的直接通信，从而大幅度地降低了能耗。此外，PSR 算法因为没有功率控制环节，因而它的节点能耗情况最不理想。

### 4.2 平均分组投递率 PDR

本文用分组投递率(Packet Delivery Ratio, PDR)随着数据流量增加的变化情况来评估算法的可靠性。仿真中，通过改变每秒每个节点生成数据包的数量来改变数据流量。结果如图 3 所示，随着数据率的增大，3 种算法的分组投递率都会逐步下降，这其中 PSR 算法的分组投递率始终最高，CLO 算法次之，文献[19]提出的算法最低。这主要是因为 PSR 算法的路由选择始终以路径质量最佳为目标，所以分组投递率始终最高，而另外两种算法因为要兼顾能效因素，使得分组投递率有所折损。而且，文献[19]提出的算法虽然也通过设置 RSSI 的阈值来调节发射功率，却因为每次功率调节都是改变一个固定数值，有可能导致过度调节，从而在一定程度上影响了分组投递率。

### 4.3 参数选取

本节主要考察 CLO 算法中节点退避时间参数

$\tau$  对网络生命周期和传输可靠性的影响，将网络从开始运行到第 1 个节点能量耗尽的时间长度视作网络生命周期。仿真中，每个节点每秒产生 20 个数据分组，假设节点的初始能量为 10 J。由图 4 给出的结果可以看出，网络的生命周期随着  $\tau$  的增大而逐渐增大。相反，图 5 则显示随着  $\tau$  的增大，网络中优先级最高的数据分组的投递率却有所下降。这是因为根据式(14)， $\tau$  越大可持续工作时间的长短在退避时间中占的权重越大，而数据优先级权重越小，也就是说能量问题被优先考虑，而具有高优先级的数据分组的优先发送优势被削弱。此外，在图 5 中，PDR 在  $\tau$  的取值从 0 增至 0.4 之间是以较慢速度下降的，而在此后会随着  $\tau$  的变大而以较大的幅度下降，直至  $\tau$  达到 0.7 后曲线又会变得比较平坦。因此，在 0.4~0.7 的区间内，PDR 对  $\tau$  的取值的敏感度比较高，在保证一定生命周期的情况下， $\tau$  的取值应当尽量靠近 0.4。

## 5 结束语

不同于传统无线传感器网络，无线体域网具有拓扑结构高动态、资源有限、信道质量波动频繁等特点。考虑到人体姿态的周期性和重复性，本文针对节点与协调器之间的链路以及节点与节点之间的链路，提出了两种不同复杂度的链路质量预测方法。本文为了提高网络的能效和传输可靠性，基于链路质量预测结果提出了融合了功率控制、路由转发机

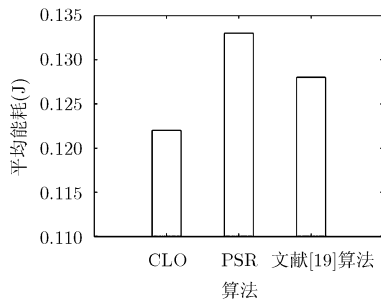


图 2 节点平均能耗比较

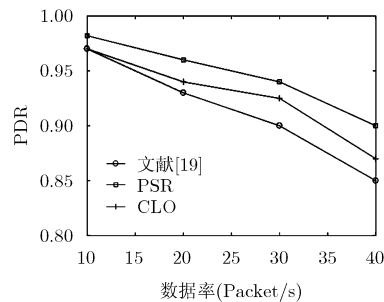


图 3 分组投递率比较

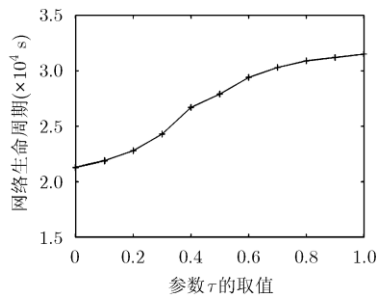


图 4 参数  $\tau$  对网络生命周期的影响

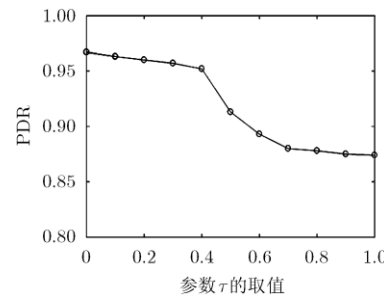


图 5 参数  $\tau$  对高优先级分组投递率的影响

制和退避时间机制的跨层优化方法。仿真表明, 本文提出的方法比现有其它单层协议, 在能耗和分组投递率方面拥有独特的优势。本文方法还考虑到体域网中数据通常具有异构性, 给不同的数据类型分配了优先级, 通过调节退避时间参数  $\tau$  可以灵活地让高优先级的数据在 MAC 层获得不同程度的信道使用优先权。

### 参 考 文 献

- [1] HAMIDA E B, D'ERRICO R, and DENIS B. Topology dynamics and network architecture performance in wireless body sensor networks[C]. IFIP International Conference on New Technologies, Mobility and Security, Paris, France, 2011: 1-6.
- [2] ERIK A, PEIO L, LEYRE A, *et al.* Design and performance analysis of wireless body area networks in complex indoor e-Health hospital environments for patient remote monitoring[J]. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2016, 12(9): 1-25. doi: 10.1177/1550147716668063.
- [3] 苏丹, 李章勇, 章敬雪, 等. 基于转发节点的无线体域网动态信道研究[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2015, 27(2): 235-240. doi: 10.3979/j.issn.1673-825X.2015.02.017.  
SU Dan, LI Zhangyong, ZHANG Jingxue, *et al.* Dynamic body communication channels base-relay nodes for wireless body area networks[J]. *Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition)*, 2015, 27(2): 235-240. doi: 10.3979/j.issn.1673-825X.2015.02.017.
- [4] HAMIDA E B, ALAM M M, MAMAN M, *et al.* Short-term link quality estimation for opportunistic and mobility aware routing in wearable body sensors networks[C]. International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications, Larnaca, Cyprus, 2014: 519-526.
- [5] CHEN Yunxia, ZHAO Qing, VIKRAM K, *et al.* Transmission scheduling for optimizing sensor network lifetime: a stochastic shortest path approach[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2007, 55(5): 2294-2309. doi: 10.1109/TSP.2007.893213.
- [6] LIANG Xiaohui, LI Xu, SHEN Qinghua, *et al.* Exploiting prediction to enable secure and reliable routing in wireless body area networks[C]. IEEE International Conference on Computer Communications, Orlando, USA, 2012: 388-396.
- [7] ELHADJ H B, ELIAS J, CHAARI L, *et al.* A priority based cross layer routing protocol for healthcare applications[J]. *Ad Hoc Networks*, 2016, 42: 1-18.
- [8] HENNA S, SAJEEL M, BASHIR F, *et al.* A fair contention access scheme for low-priority traffic in wireless body area networks[J]. *Sensors*, 2017, 17(9): 1-21. doi: 10.3390/s17091931.
- [9] QUWAIDER M, MUHAMMAD A, CHOI J, *et al.* Posture-predictive power control in body sensor networks using linear-quadratic Gaussian control[C]. International Conference on Networks and Communications, Chennai, India, 2009: 52-59.
- [10] FERNANDES D, FERREIRA A G, ABRISHAMBAF R, *et al.* A low traffic overhead transmission power control for wireless body area networks[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2018, 18(3): 1301-1313. doi: 10.1109/JSEN.2017.2778802.
- [11] 邓志宏, 老松杨, 白亮. 基于预测误差修正的时序链路预测方法[J]. 电子与信息学报, 2014, 36(2): 325-331. doi: 10.3724/SP.J.1146.2013.00657.  
DENG Zhihong, LAO Songyang, and BAI Liang. A temporal link prediction method based on link prediction error correction[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2014, 36(2): 325-331. doi: 10.3724/SP.J.1146.2013.00657.
- [12] ARFI A B, KARKVANDI H R, PECHT E, *et al.* Lifetime-improved collection tree protocol for wireless sensor networks [C]. IEEE Annual Information Technology, Electronics and Mobile Communication Conference, Vancouver, Canada, 2016: 1-6.
- [13] EFFATPARVAR M, DEGHAN M, and RAHMANI A M. A comprehensive survey of energy-aware routing protocols in wireless body area sensor networks[J]. *Journal of Medical Systems*, 2016, 40(9): 1-27. doi: 10.1007/s10916-016-0556-8.
- [14] ANISI M H, ABDUL-SALAAM G, IDRIS M Y I, *et al.* Energy harvesting and battery power based routing in wireless sensor networks[J]. *Wireless Networks*, 2017, 23(1): 249-266. doi: 10.1007/s11276-015-1150-6.
- [15] 卢先领, 彭能明, 徐保国. 无线体域网中能量高效且可靠的自适应路由协议[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(6): 1520-1524. doi: 10.3724/SP.J.1146.2012.01367.  
LU Xianling, PENG Nengming, and XU Baoguo. Energy efficient and reliable adaptive routing protocol in WBANs[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2013, 35(6): 1520-1524. doi: 10.3724/SP.J.1146.2012.01367.
- [16] DONG Jie, GE Yu, and SMITH D B. Two-Hop relay-assisted cooperative communication in wireless body area networks: An empirical study[J]. *ACM Transactions on Sensor Networks*, 2016, 12(4): 1-13. doi: 10.1145/2979679.
- [17] MOOSAVI H and BUI F M. Optimal relay selection and power control with quality-of-service provisioning in wireless body area networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2016, 15(8): 5497-5510. doi: 10.1109/TWC.2016.2560820.
- [18] AOYAGI T, TAKADA J, TAKIZAWA K, *et al.* Channel model for wearable and implantable WBANs[S]. IEEE 802.15-08-0416-04-0006, 2008.
- [19] XIAO Shuo, DHAMDHERE A, SIVARAMAN V, *et al.* Transmission power control in body area sensor networks for healthcare monitoring[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2009, 27(1): 37-48. doi: 10.1109/JSAC.2009.090105.
- [20] Texas Instruments. CC2420 2.4 GHz IEEE 802.15.4/ ZigBee-ready RF Transceiver[OL]. <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/cc2420.pdf>, 2014.

王力立: 女, 1987 年生, 讲师, 研究方向为无线传感器网络。

黄成: 男, 1975 年生, 讲师, 研究方向为自动化检测技术。

吴晓蓓: 女, 1958 年生, 教授, 研究方向为智能控制。