

## 基于无线体域网的传输功率控制和调度算法

王志军<sup>1</sup>, 胡封晔<sup>1</sup>, 尹颖奇<sup>2</sup>, 刘小兰<sup>1</sup>

(1. 吉林大学 通信工程学院, 吉林 长春 130012; 2. 国网内蒙古东部电力有限公司兴安供电公司, 内蒙古自治区 兴安盟 137400)

**摘要:** 无线体域网未来将在医疗、运动、休闲和生活等方面起着越来越重要的作用。解决无线体域网的2个关键问题: 第一是在每个时隙内选择哪一个传感器节点传输来最大化网络的生存期, 确保网络的公平性; 第二是在未降低可靠性的前提下, 选择合适的发射功率等级达到节省能量的目的。针对第一个问题, 提出一种分布式调度算法去均衡无线体域网的生存期和公平性; 针对第二个问题, 提出改进的传输功率控制算法自适应地校正传输功率。仿真结果验证了所提出算法的有效性。

**关键词:** 无线体域网; 生存期; 公平性; 功率控制; 调度算法

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

## Transmission power control and scheduling algorithm in wireless body area networks

WANG Zhi-jun<sup>1</sup>, HU Feng-ye<sup>1</sup>, YIN Ying-qi<sup>2</sup>, LIU Xiao-lan<sup>1</sup>

(1. College of Communication Engineering, Jilin University, Changchun 130012, China; 2. East Inner Mongolia Grid Company LTD., Xing'an 137400, China)

**Abstract:** Wireless body area networks (WBAN) were expecting to play an essential role for healthcare, sports, leisure, and all the aspect of our daily life. The purpose was to solve two key issues of WBAN. The first issue was which sensor should transmit during each time slot in order to maximize the lifetime as well as maintaining fairness performance. The second issue was which transmit power level should be chosen for the purpose of energy saving without degrading reliability. For the first problem, a distributed scheduling algorithm was proposed to balance lifetime and fairness for WBAN. For the second issue, a modified transmission power control algorithm was presented to adjust transmit power adaptively. Simulation results are presented to demonstrated efficacy of the proposed algorithm.

**Key words:** wireless body area networks; lifetime; fairness; power control; scheduling algorithm

### 1 引言

无线体域网(WBAN, wireless body area networks)是为各种医疗和非医疗应用提供实时监控的新兴技术<sup>[1]</sup>, 它是包含一个 AP(access point)节点和若干可以采样、处理、传输人体生理参数的传感器节点的特殊无线传感器网络。在2012年2月, IEEE 802.15.6工作组发布了无线体域网标准<sup>[2]</sup>, 涵盖了无线体域网的各个方面, 包括物理层、媒体接入控制层和安全模式等, 制定了人体内和人体附近的无线短距离通信标准。近年来, 无线体域网的研究已经取得了显著的进展<sup>[3,4]</sup>, 但是仍然还有很多问题亟待解决。

在能量受限的无线体域网中, 网络生存期是主要需要解决的问题。网络生存期最大化问题的研究可以追溯到无线传感器网络(WSN, wireless sensor networks)。Chen等提出动态传输调度算法(DPLM, dynamic protocol for lifetime maximization)<sup>[5]</sup>, 分析表明该调度算法在优化网络生存期方面是渐进最优的。Chen等又提出了在3种信道状态信息(CSI, channel state information)类型下利用随机最短路径马尔可夫决策过程来计算网络生存期最大化的问题<sup>[6]</sup>。

但是, 上述的传输调度算法存在不公平性的缺点。在信道状态持续衰落的情况下, 可能导致某些节点在很长一段时间内都没有被选择去发送数据的结

收稿日期: 2014-09-29; 修回日期: 2015-05-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61074165, 61273064)

**Foundation Item:** The National Natural Science Foundation of China (61074165, 61273064)

果。由于不同传感器节点的异构要求，公平性也是无线体域网考虑的一个非常重要的方面。公平性的概念在资源分配方面得到了充分的研究，提出了几种在限制公平性的条件下来提高系统性能的算法<sup>[7,8]</sup>。

Yazdandoost 等提出了体域网体表信道传输特性<sup>[9]</sup>。随着人体的不断运动，信道状态也随着剧烈运动，显然传感器节点使用固定的发射功率是不合适的。因为当信道状况较好的时候，过高的发射功率不仅造成了不必要的能量浪费而且还对其他体域网造成了干扰。当信道状况较差时，发射功率较低会降低网络的可靠性。所以，需要研究无线体域网中的自适应功率控制机制来延长网络的生存期和提高可靠性<sup>[10,11]</sup>。

本文主要研究了 2 个关键的问题。第一个问题是：在每个时隙内，保证最大化网络生存期和可靠性的前提下选择合适的传感器节点传输。第二个问题是：在不降低可靠性的前提下，选择合适的发射功率等级达到节省能量的目的。接下来通过改进的自适应功率控制算法来解决第二个问题。在此基础上提出一个分布式公平调度算法来解决第一个问题。仿真实验结果验证所提出算法的有效性。

## 2 无线体域网的网络模型

IEEE 802.15.6 标准规定了无线体域网的网络拓扑结构为星型结构并且支持两跳的扩展网络，本文只考虑单跳的情况。在无线体域网中，每个传感器节点只测量某一种生理参数并且通过衰落信道直接将数据发送给 AP 节点。本文只考虑在不同的时隙内传感器传输调度的单一网络，以至于干扰可以被忽略。本文只考虑采用局部信道状态信息和剩余能量信息(REI, residual energy information)的分布式调度算法。并且这个集中式的传输调度算法的开销极高，而本文未考虑传感器之间的计算复杂度。

在 IEEE 802.15.6 通信标准的 MAC 层协议中，时间被分成了等长的超帧结构。每个超帧结构包括如下 4 个部分：控制阶段、竞争接入阶段(CAP, contention access phase)、竞争空闲阶段(CFP, contention free phase)、非活跃阶段。CFP 阶段又继续分成若干时隙。本文关注数据分组主要在 CFP 阶段传输的基于 TDMA 的协议。所以在研究的体域网中，时间是待分配给各个传感器节点的资源。

假定一个 WBAN 包括  $N$  个具有初始能量  $E_{in}$  的

传感器节点和一个汇聚节点 AP。网络采用星形网络拓扑结构，也就是说，所有的传感器节点共享一个信道。信道模型采用块衰落信道，在每个时隙信道增益保持不变。在体域网的通信中，信号在传播过程中会经历能量吸收、反射、衍射、身体遮蔽和不同的身体姿势等，这样就导致了衰落。理论信道模型起源于电磁传播的基本原则，为特定的场景在无线电链路层级提供精确的建模。这项工作太复杂，超出了本文的研究范围。本文采用文献[12]提出的信道模型和信道统计特征。

IEEE 802.15.6 TG6 小组的报告中给出了在 2.4 GHz 频段上 4 个数据传输速率和相应的最小接收功率，如表 1 所示。

表 1 2.4 GHz 数据速率和相应的最小接收功率

数据速率/(bit·s <sup>-1</sup> )	R <sub>x_sens</sub> /dBm
121.4	-95
242.9	-93
485.7	-90
971.4	-86

假设所有的传感器节点都能够输出 -25 dBm 到 0 dBm 的发射功率。为了便于计算节省能量的值，需要将输出功率  $P_{tx}$ (dBm) 转换成能量消耗  $P_{con}$  (mW)。所以，传感器节点  $i$  传输生理数据消耗的总能量为

$$E_{txi} = P_{con} T_i = P_{con} \frac{I}{v_i} \quad (1)$$

其中， $I$  是数据分组的大小， $v_i$  是传感器节点的传输速率。

## 3 自适应功率控制机制

由于无线体域网的信道质量会随着环境的改变和身体的移动而迅速改变。所以，在功率控制机制中，当信道状况变差时，传输功率必须相应地提高来避免数据分组丢失；当信道状况较好时，传输功率要适当减少来提高能效。Xiao 等<sup>[13]</sup>提出的自适应功率控制机制已经达到了很好的性能。下面介绍能达到这种效果的功率控制机制，其对功率的控制是通过调节其中的参数设置实现的。

假设传感器节点的发射机通过接收机反馈的信息知晓每个数据分组的 RSSI，用  $R$  表示。在算法中涉及到 4 个重要的系数： $\partial_u$ 、 $\partial_d$ 、 $T_L$  和  $T_H$ 。系数  $\partial_u$  和  $\partial_d$  分别应用于较好的信道状况和较差的信道状况。这样做有利于功率控制机制及时地对不断波动的信道状况做出相应的调整，使算法决定是更加注重能效还是更加注重数据的可靠

性。功率控制算法的目标是通过调节发射功率使  $RSSI$  的指数加权滑动平均  $\bar{R}$  保持在最低阈值  $T_L$  和最高阈值  $T_H$  之间。在 Xiao 等的算法中, 当信道状况变差使  $\bar{R} < T_L$  时, 传输功率加倍, 当信道状况较好使  $\bar{R} > T_H$  时, 传输功率减少一个固定数值。此算法可能会导致这样的情况, 在信道的波动中  $\bar{R}$  刚刚达到低于  $T_L$  的值时, 在下一个时隙算法会过度反应将发射功率加倍使发射功率远高于合适的发送功率而造成能量的浪费。当信道条件稍好使  $\bar{R}$  的值刚刚高于阈值  $T_H$  时, 发射功率降低一个固定的数值可能会使实际的发射功率低于合适的功率造成数据传输的可靠性降低。

本文提出了一个改进的功率控制机制来解决上述问题。为了便于对比, 本文使用的所有参数均与文献[13]相同。算法采用二分查找的方法来调节传输功率等级。如算法 1 所示。

**算法 1** 改进的功率控制算法

1) 输入  $R$ (当前的  $RSSI$  值)和  $\bar{R}$  ( $RSSI$  的指数加权平均)。

2) 如果  $R \leq \bar{R}$ , 则更新  $\bar{R}$  的值

$$\bar{R} \leftarrow \partial_d R + (1 - \partial_d) \bar{R}$$

3) 如果  $R > \bar{R}$ , 则更新  $\bar{R}$  的值

$$\bar{R} \leftarrow \partial_u R + (1 - \partial_u) \bar{R}$$

4) 若  $\bar{R} < T_L$ , 更新发送功率

$$transpower \leftarrow \frac{transpower + maxpower}{2}$$

5) 若  $\bar{R} > T_H$ , 更新发送功率

$$transpower \leftarrow \frac{transpower + minpower}{2}$$

6) 若  $T_L \leq \bar{R} \leq T_H$ , 发送功率保持不变。

如上述功率控制算法所示, 如果  $\bar{R}$  降低到最低阈值  $T_L$  以下, 下一个时隙发射功率的值为即时发射功率与最高发射功率的平均值(步骤 4)。相似地, 当  $\bar{R}$  的值高于最高阈值  $T_H$ , 下个时隙的发射功率为即时发射功率与最低发射功率的平均值(步骤 5)。这种功率控制机制非常灵活, 参数  $\partial_u$  和  $\partial_d$  均可以根据实际应用的要求来调整达到能效和可靠性的折衷。在文献[13]中, 为了适应监测不同生理参数的要求, 定义了 3 种方法分别称为保守、激进和平衡策略。保守策略适合应用在对可靠性要求较高但对能效要求不严格的情况下。在对能耗要求极其严格但对可靠性要求不高的条件下适合于采用激进的策略。平衡

的策略对能效和可靠性的侧重点是相同的, 即对网络信道状况变好和变差的变化趋势反应程度相同。在第 5 节的仿真中将针对这 3 种方法分别与文献[13]进行比较来验证提出算法的能效和可靠性。

## 4 公平权值的设计

本节将提出一个分布式的传输调度算法。整个算法的重点是公平权值的设计, 它是 CSI、REI 和数据速率的指数加权滑动平均(EWMA, exponentially weighted moving average)的函数。

### 4.1 公平权值的设计原则

公平权值的设计需要满足 2 个条件: 1) 公平权值需要平衡好 CSI 和 REI 的关系来延长整个网络的生存期; 2) 传输调度算法需要能够根据过去的传输记录来调整公平权值以达到保持公平性的目的。

### 4.2 公平权值的设计

因为 DPLM 算法取得了渐进最优的网络生存期, 为了满足第一个条件, 借鉴了 DPLM 的思想。在每个时隙开始的时候, DPLM 算法选择这样的传感器节点来传输数据, 其当前传输需要的能量占剩余能量的比例最小。因此, 把剩余能量和传输需要能量的比值定义为能效系数, 表示如下。

$$e_i = \frac{E_i}{E_{\text{req}i}} \quad (2)$$

其中,  $E_i$  是传感器节点  $i$  的剩余能量。

考虑到第二个条件, 引入了数据速率的指数加权滑动平均(EWMA)。它的基本思想是: 预测值是以前观测值的加权和, 且对不同的数据给予不同的权值, 新数据给较大的权, 旧数据给较小的权。这是一种常用的数据预测方法。这个算法包含了数据速率的滑动平均, 通过决策历史新样本的指数加权滑动平均来计算。在时隙  $n$  开始的时候, 对于任意一个传感器节点  $i$ , 算法会更新数据速率的指数加权滑动平均如下。

$$\overline{v_i(n)} = \partial_i v_i(n-1) + (1 - \partial_i) \overline{v_i(n-1)} \quad (3)$$

其中,  $v_i(n-1)$  是节点  $i$  在时隙  $n-1$  时的传输速率。如果节点  $i$  在时隙  $n-1$  没有被选中发送数据, 则把  $v_i(n-1)$  设为 0。  $\partial_i$  决定着节点  $i$  对于过去速率值的指数衰减速度。  $\partial_i$  越大, 过去的速率值衰减得越快, 反之亦然。可以根据实际监测的生理参数来调整  $\partial_i$  以达到保持公平性的目的。例如, 对于心电图(ECG, electrocardiogram)信号的监测需要相对较高的数据速率, 而体温监测则对数据速率的要求很低。可以给监测心电信号

的传感器节点设定较高的  $\partial_i$  值, 这样, 在这个节点连续几次没有发送数据时,  $\bar{v}_i$  的值会迅速降低。相应地, 给监测体温信号的传感器节点设定相对较低的  $\partial_i$  值, 即便节点连续一段时间没有发送数据,  $\bar{v}_i$  的值也不会变动太大。所以, 提出这种可以补偿分配不公的算法是非常有必要的。

设定对于传感器节点  $i$ , 数据速率的指数加权平均  $\bar{v}_i$  和期望的数据速率  $R_{0i}$  的比值为  $R_i$ , 表示为

$$R_i = \frac{\bar{v}_i}{R_{0i}} \quad (4)$$

其中,  $R_{0i}$  对于监测不同生理参数的传感器节点  $i$  来说都是不同的。 $R_i$  的物理意义表示的是  $\bar{v}_i$  和  $R_{0i}$  的偏离程度。定义节点  $i$  的公平权值为

$$W_i = \frac{e_i}{R_i} = \frac{e_i R_{0i}}{\bar{v}_i} \quad (5)$$

公平权值用来决定在每个时隙开始的时候哪一个传感器节点通过共用的信道传输数据。各个传感器节点通过 CSI、REI、数据速率的要求和传输历史来计算出自己的公平权值。如果传感器节点  $i$  连续一段时间没有被选中传输数据,  $\bar{v}_i$  的值会急剧减小, 结果是  $R_i$  也会减小导致公平权值  $W_i$  增大来提高发送的概率。公平权值在每个时隙开始的时候随着信道状况的改变都会更新。本文目标是在不牺牲过多网络生存期的前提下克服现有很多分布式传输调度算法没有考虑到公平性的缺点, 希望通过使用公平权值使整个 WBAN 达到网络生存期和公平性合理的折衷。

### 4.3 分布式实现

在本节中将讨论分布式传输调度算法的实现。采用机会载波侦听的思想, 其基本观点是将各传感器节点的公平权值与载波侦听的退避函数匹配, 得到等待时间, 它为搜索全局最优提供了一种分布式的解决算法。在每个时隙开始的时候, AP 广播一个信标帧, 各传感器节点接收到信标信号以后开始侦听自己的信道状态来计算公平权值。然后, 将得到的公平权值  $W_i$  映射到既定的退避函数  $f(w)$  上得到等待时间  $\tau_i$ 。等待时间到达后开始侦听信道, 如果此时信道空闲, 则此传感器节点开始发送数据, 如果此时信道忙碌, 说明已经有传感器节点开始发送数据, 则要等待下一个时隙。需要注意的是,  $f(w)$  必须是关于  $w$  的严格递减函数, 这样才能保证在机会载波侦听中具有最大公平权值的传感器节点得到发送的机会。需要说明的是, 在上述过程中可能

会出现在某个时隙几个传感器节点的公平权值相同, 这样它们的等待时间也相同, 就会导致几个节点同时发送数据造成冲突的情况, 在未来的研究中将会考虑这个问题。

## 5 仿真实验分析

### 5.1 改进的功率控制算法实验分析

在本节中, 用 MATLAB 对改进的功率控制算法进行仿真。在仿真中, 无线体域网产生的信号(接收功率与发送功率的比值)的数据分布来源于 NICTA 的大量信道测量实验<sup>[6]</sup>。性能指标评价参数: 1) 传感器节点发送数据分组的平均能耗, 单位为 mW; 2) 中断概率(outage probability), 即信号由于路径损耗和阴影衰落造成的 RSSI 的值低于最低目标值  $RSSI_{min}$  的概率。上述 2 个性能指标即为衡量网络能效和可靠性的标准。在仿真中将 RSSI 的最低阈值和最高阈值分别设定为 -80 dBm 和 -75 dBm。

根据文献[13]在保守、激进和平衡 3 种情况下对改进的功率控制机制与文献中的算法进行对比, 如图 1~图 6 所示。图中显示了各种情况下改进的算法和 Xiao 等的算法的 RSSI 和相应的传输功率等级。

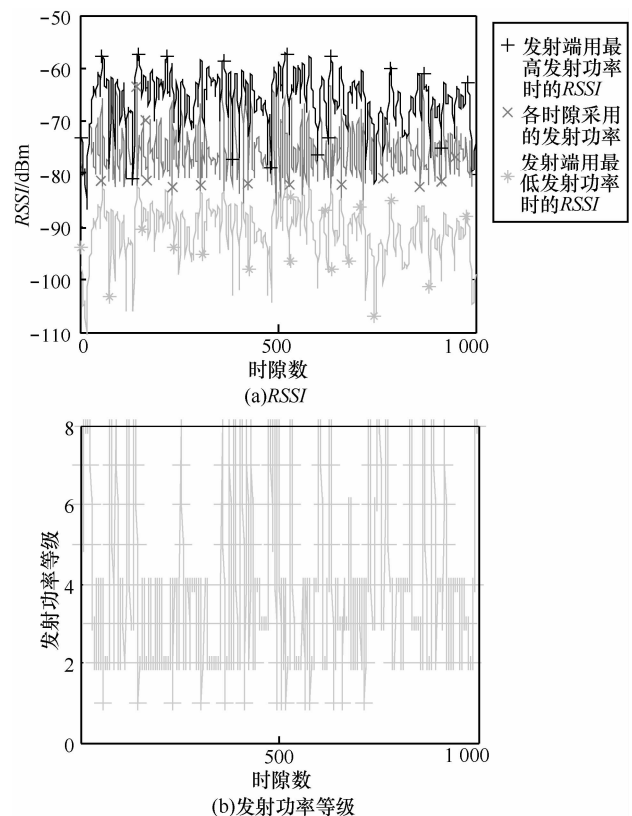


图 1 原有算法的保守策略

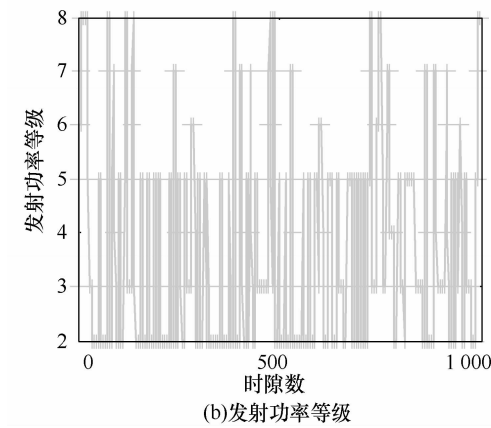
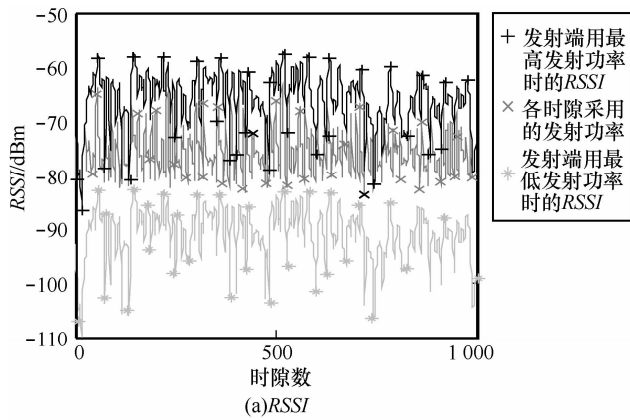


图 2 改进算法的保守策略

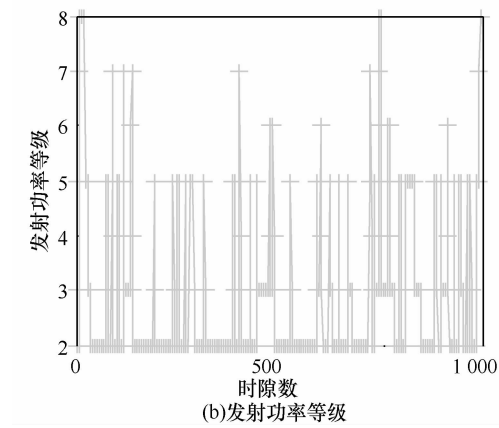
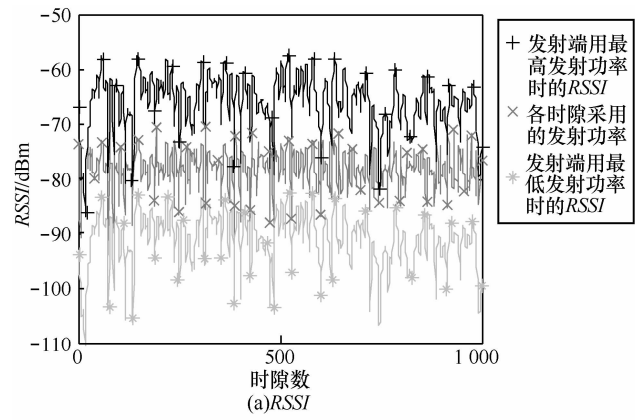


图 4 改进算法的激进策略

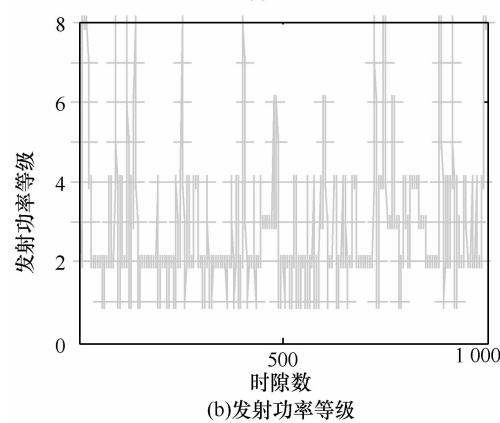
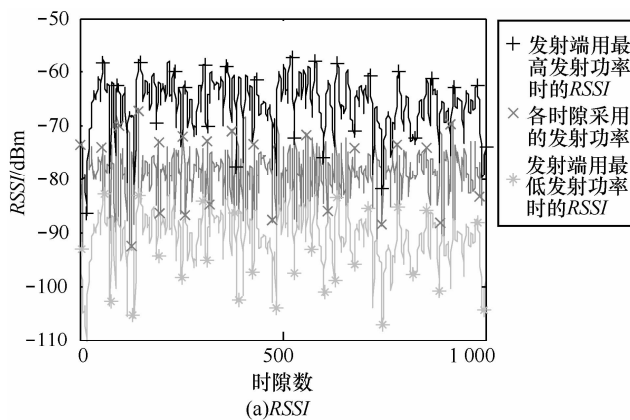


图 3 原有算法的激进策略

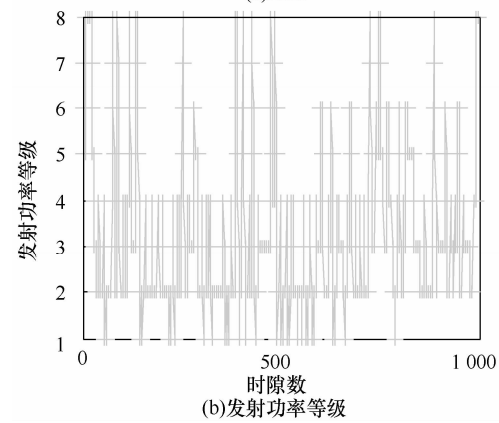
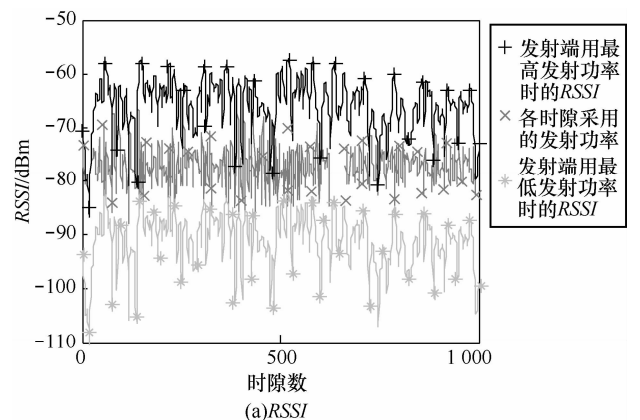


图 5 原有算法的平衡策略

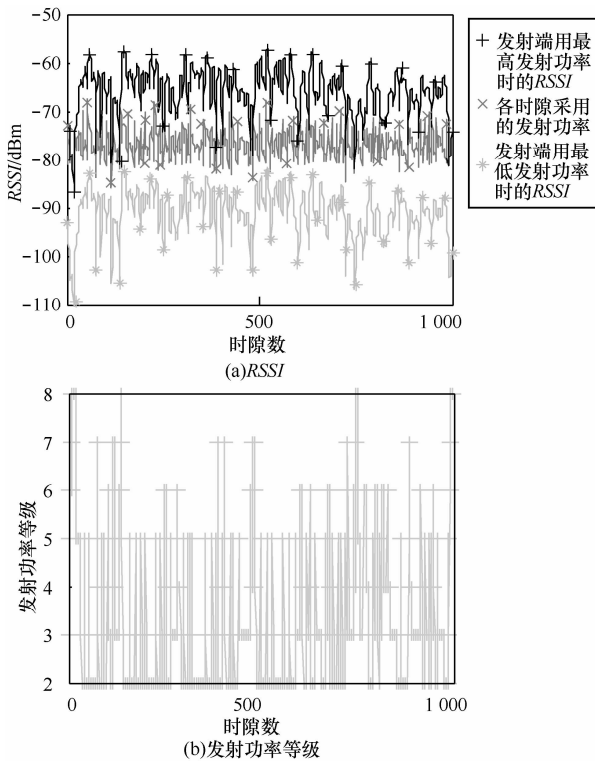


图 6 改进算法的平衡策略

从图 1~图 6 的 3 组对比中可以看出,改进的功率控制机制的发射功率比原有机制中的发射功率更加稳定且等级更低,而且能保证 RSSI 的值绝大部分均在 -85 dBm 以上。根据 IEEE 802.15.4 标准, RSSI 的值在 -85 dBm 以上能够保证 1% 以下的分组丢失率。各种策略下的平均能耗和中断概率数值统计如表 2 所示。从表 2 可以看出,在保守、激进和平衡 3 种策略下,改进功率控制机制均能获得更低的平均能耗与中断概率。这说明改进的算法能在不牺牲可靠性的前提下降低能量消耗,取得了很好的性能。

表 2 各种情况的平均能耗和中断概率对比

功率控制机制	指标	保守	激进	平衡
原有的算法	能耗/mw	22.191 7	19.599 4	20.692 9
	中断概率%	0.098	0.338	0.135
改进的算法	能耗/mw	21.697 8	19.541 2	20.458 7
	中断概率%	0.090	0.256	0.107

## 5.2 公平权值仿真实验分析

### 5.2.1 公平性标准

为了评估算法的公平性,需要引入一个公平性标准。不同于前面提到的公平系数,本节定义的衡量公平性的标准为公平因子,表示如下

$$F = \sum_{x=1}^N \sum_{y=1}^N |f_x - f_y| \quad (6)$$

其中,  $f_x$  和  $f_y$  分别为在一段固定时间内节点  $x$  和节点  $y$  的实际传输的次数与期望的理想传输次数的比值。公平因子  $F=0$  代表传输调度算法是严格公平的。 $F$  的值越大,代表传感器节点之间的资源分配越不公平,反之亦然。

### 5.2.2 仿真结果和性能分析

本小节将通过仿真实验验证采用公平权值算法的性能。性能的标准为网络生存期和公平因子。将采用公平权值的算法与机会调度协议和 DPLM 协议进行对比。仿真参数如下:假设包含 5 个传感器节点和一个 AP 的无线体域网,功率谱密度和带宽分别为 -70 dBm/Hz 和  $5 \times 10^6$  Hz。为了简便起见,假设信道增益服从均值为 1 的指数分布,每个时隙传感器发射电路需要消耗的能量  $E_c$  为 0.001 J。传感器节点 1 到节点 5 期望的传输速率  $v_i$  均为 {121.4, 242.9, 485.7, 971.4, 971.4} kbit/s。节点 1 到节点 5 期望的数据速率分别为  $R_{0i} = \{35, 40, 45, 60, 80\}$  kbit/s,相应的参数  $\partial_i$  分别设定为 {0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9}。载波侦听消耗的能量很少且对于所有传感器节点都相同,所以将其忽略。

如图 7 所示,当 WBAN 分别采用公平权值、机会调度和 DPLM 算法进行传输时,网络生存期均随着传感器节点初始能量的增加而增大。机会调度协议的生存期性能最差,因为没有考虑到剩余能量的因素。DPLM 协议因为没有公平性的约束而获得了最长的网络生存期。考虑到公平性的约束条件,采用公平权值的算法获得了接近于 DPLM 协议的网络生存期,显示了很好的平衡生存期和公平性的性能。采用公平权值的算法和 DPLM 协议在生存期上的差距是因为在某个节点长时间得不到发送机会的情况下为了保证公平性,公平权值会不顾它的 REI 和 CSI 等条件强迫网络选择这个节点,从而多消耗了一部分能量。

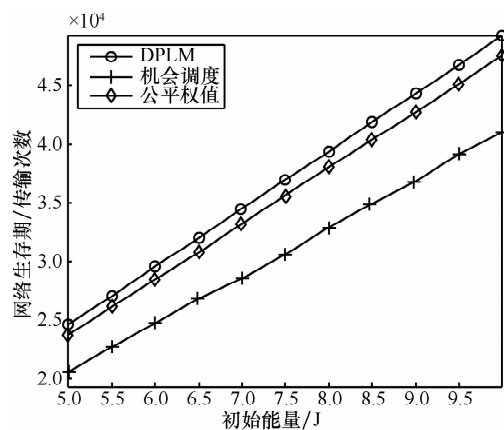


图 7 3 种算法生存期对比

图 8 显示了上述 3 种算法在 300 个时隙之内的公平因子。随着时隙数的增加，公平因子逐渐趋于稳定。采用公平权值的算法的公平因子的值远远低于另外 2 个协议，表示比其他 2 个协议的公平性要高很多。这是因为每个时隙更新的公平权值尽可能地在不损失过多生存期的情况下补偿时间分配的不公平性，以满足监测不同生理参数的传感器节点对数据速率的不同需求。结合图 7 和图 8 可以看出，采用公平权值的算法大大提高了公平性，代价是牺牲了小部分网络生存期，这个代价是可以接受的。同时，采用公平权值的算法还很好地平衡了整个体域网的网络生存期和公平性性能。

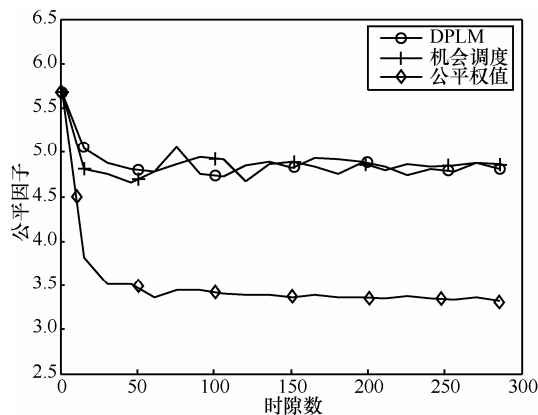


图 8 3 种算法公平因子对比

## 6 结束语

本文首先说明了无线体域网链路的动态变化特性和采用功率控制机制的必要性。功率控制机制可以从直接的减少发送所需要的能量和间接的减少碰撞 2 个方面节约能耗，是一种有效的节能机制，能够有效地延长网络的生存期。然后在原有功率控制机制的基础上提出了一种改进的功率控制机制。仿真结果表明，改进的功率控制机制能够在保证数据传输可靠性的前提下进一步降低发射功率而达到较好的性能。

最后，提出了一种使用局部信道信息的分布式传输调度算法，减少了体域网的网络开销和算法的复杂度。仿真结果表明，这个算法能够在不同的信道条件下合理的分配时隙，使整个网络的生存期和公平性达到平衡。

## 参考文献：

[1] PATEL M, WANG J. Applications, challenges, and prospective in emerging body area networking technologies[J]. *Wireless Communi-*

- ications, IEEE, 2010,17(11):80-88.
- [2] ASTRIN A. IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks Part15.6: Wireless Body Area Networks[S]. IEEE Std 802.15. 6-2012. 76-82.
- [3] BOULIS A, SMITH D, MINIUTTI D, *et al.* Challenges in body area networks for healthcare: the MAC[J]. *Communications Magazine*, IEEE, 2012, 50(5):100-106
- [4] HU F, LI S, XUE T, *et al.* Design and analysis of low-power body area networks based on biomedical signals[J]. *International Journal of Electronics*, 2012, 99(6):811-822.
- [5] CHEN Y, ZHAO Q. An integrated approach to energy aware medium access for wireless sensor networks[J]. *IEEE Trans Signal Process*, 2007,55(7):3429-3444.
- [6] CHEN Y, ZHAO Q, VIKRAM K, DEJAN D. Transmission scheduling for optimizing sensor network lifetime: a stochastic shortest path approach[J]. *Signal Processing*, IEEE Transactions, 2007,55(5): 2294- 2309.
- [7] MEHRJOO M, AWAD M K, DIANATI M. Design of fair weights for heterogeneous traffic scheduling in multichannel wireless networks[J]. *Communications*, IEEE Transactions, 2010,58(10):2892-2902.
- [8] CHENG H T, ZHUANG W. An optimization framework for balancing throughput and fairness in wireless networks with QoS support[J]. *Wireless Communications*, IEEE Transactions, 2008,7(2):584-593.
- [9] ASTRIN A.IEEE P802.15-08-0780-09-0006 Channel Model for Body Area Network (BAN)[S]. 2009.
- [10] QUWAIDER M, RAO J, BISWAS S. Body-posture-based dynamic link power control in wearable sensor networks[J]. *Communications Magazine*, IEEE,2010, 48(7): 134-142.
- [11] KIM S, KIM S, EOM D S. RSSI/LQI-based transmission power control for body area networks in healthcare environment[J]. *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, 2013, 17(3): 561-571.
- [12] ASTRIN A, *et al.* Tg6 draft. IEEE802.15.6 Technical Contribution[S]. ID:15-10-0254-040245-06-0006-tg6-draft.
- [13] XIAO S, DHAMDHERE A, SIVARAMAN V, *et al.* Transmission power control in body area sensor networks for healthcare monitoring[J]. *Selected Areas in Communications*, IEEE Journal, 2009, 27(1): 37-48.
- [14] SMITH D, MINIUTTI D, ZHANG A, *et al.* Matlab Code for Generating BAN Fading Power Profile[S]. IEEE 802.15-08-0850- 00-0006.

## 作者简介：



王志军（1984-），男，吉林长春人，吉林大学硕士生，主要研究方向为无线体域网、协作通信技术、信号处理等。

胡封晔（1974-），男，河南原阳人，吉林大学教授、硕士生导师，主要研究方向为无线体域网、认知无线网络、传感器网络、MIMO-OFDM、空时通信和无线定位。

尹颖奇（1990-），女，内蒙古赤峰人，国网内蒙古东部电力有限公司兴安供电公司初级工程师，主要研究方向为体域网、光通信技术。

刘小兰（1992-），女，重庆人，吉林大学硕士生，主要研究方向为无线体域网、传感器节点优化。