

## IEEE 802.15.6 中能量有效的无线体域网拓扑结构优化研究

梁正友<sup>1,2</sup>, 姚玉梅<sup>1,2</sup>

(1. 广西大学计算机与电子信息学院, 广西 南宁 530004;

2. 广西大学广西多媒体通信与网络技术重点实验室培育基地, 广西 南宁 530004)

**摘要:** 提出一种无线体域网(WBAN, wireless body area network)的网络拓扑结构设计方案。该方案针对 IEEE 802.15.6 标准的 2 跳扩展星型拓扑结构, 建立基于混合整数非线性规划的能耗成本优化模型, 通过调整中继节点的位置和数量, 以及数据到汇聚节点的路由, 获得优化的网络拓扑结构。实验结果分析表明, 与 Elias 提出的 EAWD(energy aware WBAN design) 模型相比, 所提出的方案能使网络能耗减少 40.5%, 网络时延平均降低 52.4%, 网络寿命提高了一倍。

**关键词:** IEEE 802.15.6; 网络拓扑; 能量效率; 网络寿命; 混合整数非线性规划

**中图分类号:** TN915.02

**文献标识码:** A

## Study of energy efficient WBAN topology optimization in IEEE 802.15.6

LIANG Zheng-you<sup>1,2</sup>, YAO Yu-mei<sup>1,2</sup>

(1. School of Computer and Electronic Information, Guangxi University, Nanning 530004, China;

2. Guangxi Key Laboratory Cultivating Base of Multimedia Communications and Network Technology, Guangxi University, Nanning 530004, China)

**Abstract:** An optimization model was proposed to design the network topology of wireless body area network (WBAN). Focusing on the two hops extended star topology given in IEEE 802.15.6 standard, a mixed integer non-linear programming model was constructed to minimize the energy consumption of WBAN. Then, the optimized network topology was obtained by adjusting the number and location of relays to be deployed and the data routing towards the hub. The experimental results show that, compared with Elias's model (EAWD, energy aware WBAN design), the proposed model can reduce network energy consumption by 40.5% ,decrease network delay by 52.4% on average, and extend network lifetime by double.

**Key words:** IEEE 802.15.6, network topology, energy efficiency, network lifetime, mixed integer non-linear programming

### 1 引言

无线体域网 (WBAN, wireless body area network) 通过分布在人体体表或植入人体体内的无线传感器或设备, 连续监测人体的生理信号和运动行为, 并将感知的信息由无线信道传送到网关节点, 通过互联网与远程监护系统通信, 从而对被监护者的生理信号和运动行为进行实时监测<sup>[1]</sup>。无线体域网应用到卫生医疗保健领域, 将使以预防为主、早诊断、早治疗的新型医疗模式成为可能, 还可以帮助解决看病难、看病贵、人口老龄化等问题;

在体育和军事训练、消费类电子等非医疗领域, 无线体域网也有着广阔的应用前景<sup>[2]</sup>。由于这些重要的应用前景, 无线体域网成为当前的一个研究热点。IEEE 802 委员会针对无线体域网的短距离、低复杂度、低功耗、高可靠的需求迫切, 于 2012 年 3 月发布专门用于无线体域网的通信标准 IEEE 802.15.6 标准的正式版本<sup>[3]</sup>, 其主要内容规定了无线体域网的物理层和 MAC 层基本结构, 指出加密认证和安全方面的实现方式; 同时, 该标准定义了 1 跳星型拓扑和 2 跳扩展星型拓扑结构, 为无线体域网的标准化和产业化创造了条件。

收稿日期: 2015-08-14; 修回日期: 2016-02-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No.61262003)

**Foundation Item:** The National Natural Science Foundation of China (No.61262003)

无线体域网一般由一系列的传感器节点和中继节点、一个汇聚节点 (hub) 组成。其中, 传感器节点负责采集或转发信息给其他节点, 最后汇集到汇聚节点; 汇聚节点负责将收到的信息发送到互联网的医学信息中心处理; 中继节点不采集信息, 只负责转发信息, 有些无线体域网不使用中继节点。网络中所有节点之间的逻辑连接关系构成网络拓扑结构<sup>[4]</sup>。无线体域网的常见拓扑结构有星型结构<sup>[5]</sup>、2 跳扩展星型结构<sup>[6]</sup>、全网状网结构<sup>[5]</sup>、树型结构<sup>[7]</sup>, 如图 1 所示。

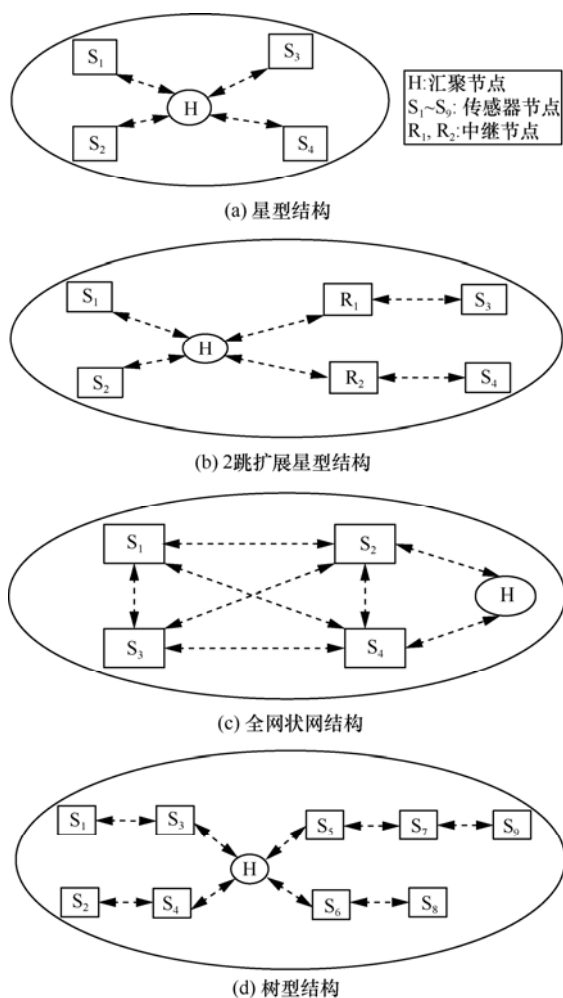


图 1 无线体域网常见拓扑结构

由于无线体域网中的传感器能量有限, 因此要求一个无线体域网要节能, 以延长体域网的网络寿命。另一方面, 无线体域网所采集的信息非常重要, 且需要实时性处理; 因此, 要求无线体域网的网络时延要小。网络拓扑结构对无线体域网节能和减少网络时延有直接的影响, 网络拓扑结构设计和优化被大量的学者重视<sup>[7-19]</sup>。

文献[7, 9, 10]指出在单跳星型拓扑结构中, 当传感器节点与汇聚节点的距离较远时, 单跳的路径损耗效应将影响通信链路的性能 (如接收信号强度指示 RSSI), 因此使用中继节点将较远传感器的信息转发给汇聚节点或其他中继节点, 从而使星型结构扩展成树型结构。Fabio 等<sup>[11]</sup>通过实验研究全网状网络的特性、同步传输的链路相关系数以及传输速率、延迟时间对数据可靠性的影响, 并在此基础上比较了 1 跳和 2 跳网络的性能, 结果表明 2 跳拓扑结构是构建无线体域网的较佳选择。Kim 等<sup>[12]</sup>研究发现 2 跳拓扑结构的网络寿命与 3 跳拓扑结构相当, 指出 2 跳拓扑结构能够满足 WBAN 应用需要。

Braem 等<sup>[13]</sup>研究拓扑结构对网络能耗的影响时, 使用节点间通信距离固定的线型拓扑结构和满二叉树拓扑结构, 实验结果显示单跳通信中, 远离 hub 的传感器能耗大; 多跳通信中, 靠近 hub 的传感器节点兼顾采集信息和转发信息, 因此其能耗较大; 基于这些结果, Braem 提出通过在 hub 的下一级中引入中继设备并使用协作机制的方案, 提高网络寿命。

Hamida 等<sup>[14]</sup>首先从独立无线链路、真实 WBAN 信道以及运动场景下深入分析拓扑结构的动态特性。然后在此调研结果基础上, 研究了 IEEE 802.15.6 标准的 1 跳星型结构和 2 跳扩展星型结构以及全网状网络结构, 并将能量消耗、数据传输率以及延迟作为性能指标评估比较 3 种拓扑结构。结果表明, 2 跳扩展星型结构和全网状网络结构具有相似的性能, 且优于 1 跳星型结构。

Elias 等<sup>[15]</sup>针对多跳树型拓扑结构无线体域网的安装和能耗的优化问题, 提出一个混合整数线性规划模型 (EAWD, energy aware WBAN design model), 根据传感器、hub 和候选位置的坐标等参数, 求解传感器节点的信息到达 hub 的路径, 并明确指出每条路径上中继节点的部署位置以及中继节点的总数量, 以达到降低安装成本和能耗的目标。

综上所述, 文献[7~15]研究了星型、扩展星型、树型和全网状网型等不同拓扑结构对能耗和时延的影响, 得出了 2 跳扩展星型结构具有优良的综合性能, 但他们都没有对网络的部署优化进行研究。Elias 等<sup>[15]</sup>虽然提出了多跳树型拓扑结构的 WBAN 网络拓扑设计优化方案, 但该模型存在的问题是所有传感器节点必须通过中继节点转发给汇聚节点; 但在传感器节点位置靠近汇聚节点的情况下, 引入中继节点不一

定能增加网络寿命，反而增加了网络的总能耗和时延。另一方面，该方案是采用多跳树型拓扑结构，但是对跳数没有严格限制，导致跳数较多的情况下数据传输率降低，网络时延增大；同时，由于忽略遵循无线体域网的相关标准，对拓扑结构的应用性也会造成一定影响。本文在借鉴已有的工作基础上，以研究如何高效利用 WBAN 节点的有限能量来延长网络生命周期为首要目标，通过构建 IEEE 802.15.6 标准的 2 跳扩展星型结构的能耗成本模型，采用混合整数非线性规划优化方法求解模型，得到中继节点部署位置、数量和传感器通往 hub 的路径，减少网络能耗、安装成本，降低时延，增加网络寿命。

## 2 IEEE 802.15.6 的 2 跳扩展拓扑结构设计优化模型

### 2.1 IEEE 802.15.6 的 WBAN 网络模型

在 IEEE 802.15.6 标准的 2 跳扩展星型拓扑结构中，无线体域网由一系列的传感器节点和中继节点、一个汇聚节点组成。其中，传感器节点按照医学应用的要求被预先安装在指定的位置，如手臂、腿部、胸口等位置上，负责采集人体医学信息，发送信息给中继节点或者汇聚节点，最后汇集到汇聚节点；汇聚节点也预先安装在指定的位置，负责将收到的信息发送到位于互联网的医学信息中心处理；中继节点不采集信息，只负责转发信息给汇聚节点；中继节点被安装在候选位置上，其数量和位置不固定，通过拓扑优化设计模型来确定其位置和数量，从而降低网络能耗，延长网络寿命，减少网络时延。通信协议使用 IEEE 802.15.6，采用体表信道。

定义  $S = \{1, L, s\}$  表示传感器集，候选位置集为  $P = \{1, L, p\}$ ， $h$  代表汇聚节点。本文中使用的基本符号如表 1 所示，设中继节点与其他节点建立无线链路的通信范围是  $R_c$ ，汇聚节点 hub 的通信范围为  $R_s$ ，一般情况下， $R_c \leq R_s$ ； $OR_i$  代表传感器节点  $i$  可到达的中继节点的有序向量（第一个分量是离传感器  $i$  最近的中继节点）。

### 2.2 信道和能耗模型

由于人体通信环境复杂，不同位置节点之间的通信信道呈现出不同的特征。根据节点的位置，IEEE802.15.6 标准将无线体域网的信道分为 4 种类型，如表 2 所示。本文重点研究体表到体表的信道  $CM_3$ ，由于体表信道传输存在路径损耗，WBAN 的路径损耗由通信距离和通信频率共同决定；同时人

体本身对它也会产生影响，在视距内（LOS, line of sight）和非视距内（NLOS, non-line of sight）情况下信道模型是不同<sup>[1,16,17]</sup>。因此，将  $N_4$ 、 $N_5$  场景下的  $CM_3$  信道模型分别命名为  $CM_3$ -A、 $CM_3$ -B。

表 1 基本符号

符号	符号描述
$S$	传感器位置集合, $i \in S$
$P$	候选位置集合, $j \in P$
$h$	汇聚节点位置
$C_j$	在候选位置 $j$ 处安装一个中继节点的成本
$T_{ih}$	传感器 $i$ 和汇聚节点 $h$ 之间的通信量
$V_j$	候选位置 $j$ 处中继节点的最大容量
$L_{ih}$	传感器 $i$ 和汇聚节点 $h$ 之间的 0-1 链接性
$L1_{jh}$	候选位置 $j$ 和汇聚节点 $h$ 之间的 0-1 链接性
$L2_{ij}$	传感器 $i$ 和候选位置 $j$ 之间的 0-1 链接性
$t_{jh}$	候选位置 $j$ 和汇聚节点 $h$ 之间的通信量
$x_{ij}$	传感器 $i$ 和候选位置 $j$ 之间通信的 0-1 变量
$y_{jh}$	候选位置 $j$ 和汇聚节点 $h$ 之间通信的 0-1 变量
$w_{ih}$	传感器 $i$ 和汇聚节点 $h$ 之间通信的 0-1 变量
$z_j$	中继节点安装在候选位置 $j$ 的 0-1 变量

表 2 IEEE 802.15.6 信道模型

场景	描述	信道模型
$N_1$	植入到植入	$CM_1$
$N_2$	植入到体表	$CM_2$
$N_3$	植入到体外	$CM_2$
$N_4$	体表到体表 (LOS)	$CM_3$
$N_5$	体表到体表 (NLOS)	$CM_3$
$N_6$	体表到体外 (LOS)	$CM_4$
$N_7$	体表到体外 (NLOS)	$CM_4$

根据对 IEEE 802.15.6 信道的路径损耗分析，并从保护人体组织的角度考虑<sup>[20]</sup>，将中继节点的通信范围上限设  $R_c$  为 45 cm，汇聚节点的通信范围上限设  $R_s$  为 80 cm。

每个传感器和中继节点能耗主要由 4 部分构成：采集、接收、发送和处理能耗。以一位数据为例<sup>[1,21]</sup>，发送能耗包括发送器产生的能耗为  $E_{TXelec}$  和放大器产生的能耗为  $E_{amp}(n_{ij})D_{ij}^{n_{ij}}$ ，其中， $n_{ij}$ 、 $D_{ij}$  分别为节点  $i$  与  $j$  之间的路径损耗系数和距离；接收器产生的接收能耗为  $E_{RXelec}$ 。假设采集能耗和处理能耗忽略不计，共传输  $\sigma$  位数据，则总发送能耗为  $\sigma [E_{TXelec} + E_{amp}(n_{ij})D_{ij}^{n_{ij}}]$ ，总接收能耗为  $\sigma E_{RXelec}$ 。

### 2.3 IEEE802.15.6 网络能耗成本优化模型

根据图 1(b)可知，IEEE802.15.6 的 2 跳扩展星

型结构的通信方式为部分传感器节点直接与 hub 通信、另一部分传感器节点经过中继节点将信息转发给 hub。因此，哪些传感器节点可以直接与 hub 通信、哪些传感器节点需要中继节点转发信息、中继节点部署在身体的哪个位置成为设计拓扑结构的关键问题。

由于网络部署时，主要考虑的因素为网络总能耗和安装成本，结合 2.1 节定义的 WBAN 网络模型以及 2.2 节分析的传输模型和能耗模型可知，安装成本为候选位置安装的各中继节点成本之和，定义为  $C_{\text{install}}$ ，如式(1)所示。

$$C_{\text{install}} = \sum_{j \in P} C_j z_j \quad (1)$$

传感器节点发送信息到中继节点的总能耗是与中继节点链接的所有传感器节点发送能耗之和，定义为  $E_{\text{sensor-relay}}$ ，如式(2)所示。

$$E_{\text{sensor-relay}} = \sum_{i \in S, j \in P} T_{ij} x_{ij} \left( E_{\text{TXelec}} + E_{\text{amp}}(n_{ij}) D_{ij}^{n_{ij}} \right) \quad (2)$$

中继节点接收传感器信息的总能耗为负责转发的中继节点接收能耗之和，定义为  $E_{\text{relay-sensor}}$ ，如式(3)所示。

$$E_{\text{relay-sensor}} = \sum_{i \in S, j \in P} T_{ij} x_{ij} E_{\text{RXelec}} \quad (3)$$

中继节点将信息转发给汇聚节点 hub 的总能耗为负责转发的中继节点发送能耗之和，定义为  $E_{\text{relay-hub}}$ ，如式(4)所示。

$$E_{\text{relay-hub}} = \sum_{j \in P} t_{jh} y_{jh} \left( E_{\text{TXelec}} + E_{\text{amp}}(n_{jh}) D_{jh}^{n_{jh}} \right) \quad (4)$$

传感器节点发送信息到汇聚节点 hub 的总能耗为与汇聚节点 hub 链接的所有传感器节点发送能耗之和，定义为  $E_{\text{sensor-hub}}$ ，如式(5)所示。

$$E_{\text{sensor-hub}} = \sum_{i \in S} T_{ih} w_{ih} \left( E_{\text{TXelec}} + E_{\text{amp}}(n_{ih}) D_{ih}^{n_{ih}} \right) \quad (5)$$

考虑到汇聚节点 hub 能量充足，hub 的接收能耗忽略不计；同时，考虑平衡安装成本和能耗，为总能耗设置权值  $\alpha$ 。因此，能耗成本模型为

$$EC = C_{\text{install}} + \alpha(E_{\text{sensor-relay}} + E_{\text{relay-sensor}} + E_{\text{relay-hub}} + E_{\text{sensor-hub}}) \quad (6)$$

以传感器、候选位置以及 hub 之间的通信变量  $x_{ij}$ 、 $y_{jh}$ 、 $w_{ih}$  和安装变量  $z_j$  作为决策变量，能耗成本模型作为目标函数，将拓扑结构设计转化为最小化网络总能耗和安装成本的混合整数非线性规划

问题，即  $\min(EC)$ 。将式(1)~式(6)代入  $\min(EC)$  得到网络能耗成本优化模型 (OECM, optimal energy and cost model in WBAN)，如式(7)~式(16)所示。

$$\min \left\{ \sum_{j \in P} C_j z_j + \alpha \left[ \sum_{i \in S, j \in P} T_{ij} x_{ij} E_{\text{RXelec}} + \sum_{i \in S, j \in P} T_{ij} x_{ij} \left( E_{\text{TXelec}} + E_{\text{amp}}(n_{ij}) D_{ij}^{n_{ij}} \right) + \sum_{j \in P} t_{jh} y_{jh} \left( E_{\text{TXelec}} + E_{\text{amp}}(n_{jh}) D_{jh}^{n_{jh}} \right) + \sum_{i \in S} T_{ih} w_{ih} \left( E_{\text{TXelec}} + E_{\text{amp}}(n_{ih}) D_{ih}^{n_{ih}} \right) \right] \right\} \quad (7)$$

其中，式(7)为模型的目标函数，指出无线体域网最优化的总安装成本和总能耗。式(8)~式(16)为模型的约束条件，式(8)限制传感器节点最多与一个中继节点通信。

$$\sum_{j \in P} x_{ij} \leq 1, \forall i \in S \quad (8)$$

式(9)说明如果传感器  $i$  和中继节点  $j$  通信，应该确保候选位置  $j$  上安装了中继节点，并且它们的距离在可通信范围内。

$$x_{ij} \leq z_j L_{2ij}, \forall i \in S, \forall j \in P \quad (9)$$

式(10)规定若汇聚节点  $h$  与中继节点  $j$  通信，应该确保候选位置  $j$  上安装了中继节点，并且它们的距离在可通信范围内。

$$y_{jh} \leq z_j L_{1jh}, \forall j \in P \quad (10)$$

式(11)说明传感器  $i$  与汇聚节点  $h$  间的通信受可通信范围的约束。

$$w_{ih} \leq z_j L_{ih}, \forall i \in S \quad (11)$$

式(12)指出经过中继节点的通信量不能超过其自身的容量。

$$\sum_{i \in S} T_{ij} x_{ij} \leq V_j, \forall j \in P \quad (12)$$

式(13)规定了中继节点处的通信平衡，即接收传感器信息的通信量等于发送给汇聚节点的通信量。

$$\sum_{i \in S} T_{ij} x_{ij} - t_{jh} y_{jh} = 0, \forall j \in P \quad (13)$$

式(14)强调每个传感器节点分配给最近的中继节点或者汇聚节点。

$$z_{OR_i(a)} + \sum_{b \in I, b > a} x_{iOR_i(b)} \leq 1, \forall a \in I, i \in S \quad (14)$$

式(15)限制传感器节点不能同时与中继节点和汇聚节点链接。

$$\sum_{j \in P} x_{ij} + w_{ih} = 1, \forall i \in S \quad (15)$$

式(16)对变量取值做出约束。

$$x_{ij}, y_{jh}, w_{ih}, z_j \in \{0,1\}, t_{jh} \geq 0 \quad (16)$$

OECM 模型是一个混合整数非线性规划模型, 可使用优化建模软件 Localsolver 编程实现并对求得模型的最优解, 同时确定中继节点的部署位置、数量以及传感器发送信息到 hub 的最优路径。

从时间复杂度角度分析, 一方面, OECM 模型确定部分传感器节点直接与 hub 通信, 因此不需要为其选择匹配合适的中继节点, 从而降低了求解模型的时间复杂度; 另一方面, OECM 模型将拓扑结构限定为 2 跳。假设传感器节点数目为  $m$ , 候选位置个数为  $n$ , 结合 OECM 模型流程图 (如图 2(a)所示) 可知, 该模型求解的时间复杂度为  $O(mn)$ ; 但 EAWD 模型并未限定拓扑结构的跳数, 若其得到拓扑结构的最大跳数为  $k(k \geq 2)$ , 结合 EAWD 模型流程 (如图 2(b)所示) 可知, 该模型求解的时间复杂度为  $O(m^{k-1}n)$ 。综上分析可知, OECM 模型的时间复杂度低于 EAWD 模型。

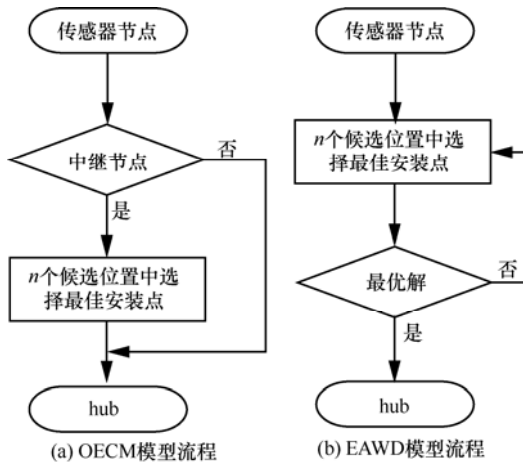


图 2 模型流程

### 3 实验与分析

本文实验平台为一台联想电脑, 配置为 Intel(R) Pentium(R) CPU G3220 @ 3 GHz 处理器, 2 GB 内存, Windows XP。使用 Localsolver 5.0 编程实现优化模型, 并求解得到中继节点的数量和部署位置以及整个网络的拓扑结构, 用 Matlab2014a 分析整理实验数据。

#### 3.1 实验参数

本文采用文献[22]的节点位置模型, 文献[22]中

指出人体的测量标准是正确定位传感器和汇聚节点的必需步骤, 作者使用达芬奇人体测量的方法, 将基于理想比例的维特鲁威人素描图作为测量对象, 并在三维坐标系的基础上, 研究出最优的传感器和汇聚节点部署位置, 即在人体体表部署 10 个传感器节点: 胃部的  $u_1=(0.5h, 1.5h, 0)$ , 心脏处的  $u_2=(h, 2h, 0)$ , 肩膀处的  $u_3=(-1.5h, 2.5h, 0)$ , 颈部的  $u_4=(-0.5h, 3.4h, 0)$ , 胯部的  $u_5=(1.5h, 0, 0)$ , 大腿处的  $u_6=(0.5h, -h, 0)$ , 右膝处的  $u_7=(-0.5h, -2h, 0)$ , 左膝处的  $u_8=(0.5h, -2h, 0)$ , 小腿处的  $u_9=(0.25h, -2.5h, 0)$ , 腋下的  $u_{10}=(h, 1.5h, 0)$ , 1 个汇聚节点:  $O=(0.5h, 0.5h, 0)$ , 其中,  $h=25$  cm (相当于身高为 175 cm); 将 Nordic nRF2401<sup>[23]</sup>收发机作为传感器和中继器, 其能耗参数如表 3 所示。

表 3 Nordic nRF2401 的能耗参数

参数	值/(nJ·bit <sup>-1</sup> )	备注
$E_{TXelec}$	16.7	发送能耗
$E_{RXelec}$	36.1	接收能耗
$E_{amp}(3.38)$	1.97	视距(LOS)放大能耗
$E_{amp}(5.9)$	7 990	非视距(NLOS)放大能耗

考虑到人体活动对中继节点转发信息的影响以及人体的穿戴舒适程度, 因此尽可能避免将候选位置选取到运动频率和运动幅度较大的部位, 如手臂、手脚、腿部等。同时综合考虑线段公理以及距离对能耗的影响, 候选位置选取在传感器节点与 hub 组成的若干个多边形区域, 如图 3 所示的 3 个多边形区域, 结合常用中继节点的设备规格, 将多边形区域顶点的  $x$ 、 $y$  最值 10 等分, 连线的交点即为候选位置。

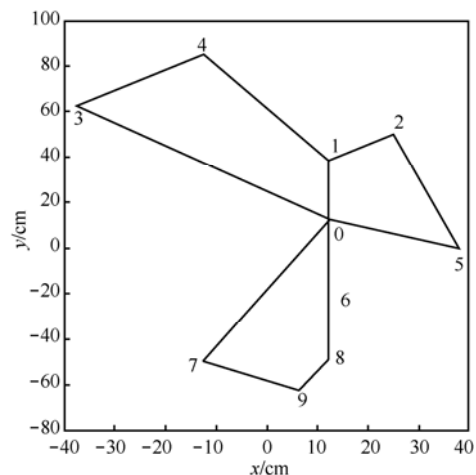


图 3 候选位置区域

### 3.2 实验分析

本文实验包括两部分，第一部分根据 OECM 模型的主要设计目标，即如何高效利用体域网中继节点的有限能量来延长整个网络的生命周期，因此首先忽略安装成本部分，评估通信量( $w_{ih}$ )对总能耗的影响，然后研究权重参数对总能耗、安装成本、中继节点负载的影响。第二部分以网络能耗、规模、寿命以及传输延迟作为性能指标，与 EAWD 模型<sup>[16]</sup>和 IEEE802.15.6 的 1 跳星型拓扑结构进行对比分析。

#### 3.2.1 通信量 $w_{ih}$ 的影响

为了评估通信量对构建节能拓扑结构的影响，考虑 WBAN 网络场景保持如图 3 不变的情况下， $w_{ih}$  从 40 bit/s 以 20 bit/s 为间隔取值到 200 bit/s，求解模型的最优解，即网络总能耗最小值。实验结果如图 4 所示，3 种拓扑结构网络总能耗不受通信量的取值影响，而且本文的 OECM 模型得到的网络总能耗比 EAWD 模型降低 38.6%，且均优于 1 跳星型拓扑结构。因此，将 10 个传感器的通信量设为[20, 200]的随机值。

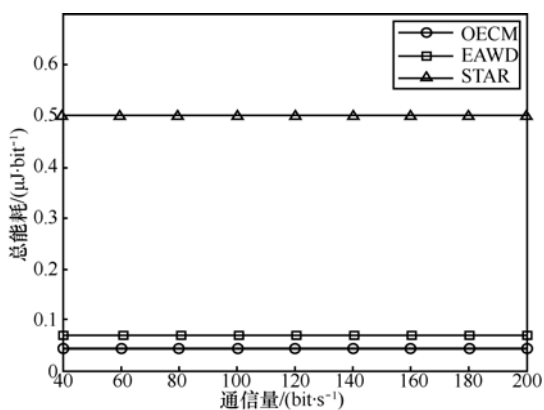


图 4 通信量对总能耗的影响

#### 3.2.2 权重参数 $\alpha$ 的影响

在 OECM 模型中， $\alpha$  作为安装成本和网络能耗的权衡因子，如果不考虑安装成本，则设  $\alpha$  为较大值，比如  $\alpha = \infty$ 。本节在 WBAN 网络场景保持如图 3 不变的情况下，研究参数  $\alpha$  对 EAWD 模型和 OECM 模型求解最优解（即网络总能耗最小值、总安装成本最小值）的影响。

实验结果如图 5~图 7 所示，从图 5 可以看出， $\alpha$  对模型构造无线体域网的总能耗没有影响，但本文 OECM 模型得到的无线体域网总能耗比 EAWD 模型降低 41.4%。由于总安装成本=每个中继节点的安装成本×中继节点数目，且本文假设在所有候选

位置安装中继节点的成本相同，因此总安装成本与中继节点数目成正比。如果  $\alpha$  较大时，说明不重视引入中继节点的个数，因此优化模型引入更多的中继节点，导致安装成本增加；反之， $\alpha$  较小时，安装成本降低。图 6 可以看出，权重参数  $\alpha=1$  时，构造无线体域网的总安装成本最低， $\alpha > 10^5$  对总安装成本没有影响，且本文 OECM 模型得到的无线体域网总安装成本比 EAWD 模型降低 50%。

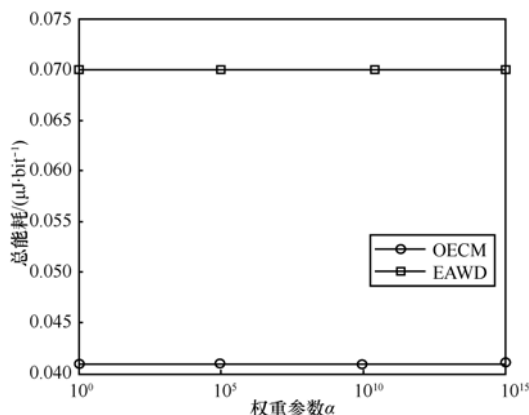


图 5 权重参数对总能耗的影响

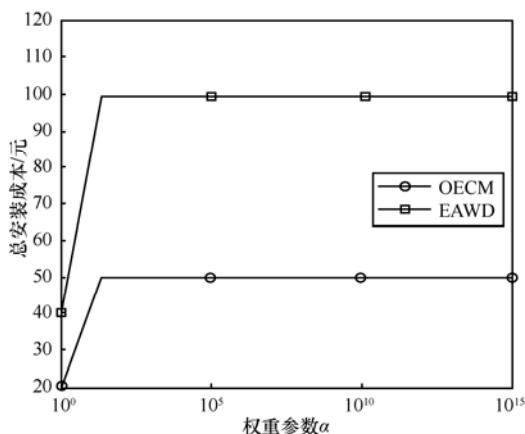


图 6 权重参数对总安装成本的影响

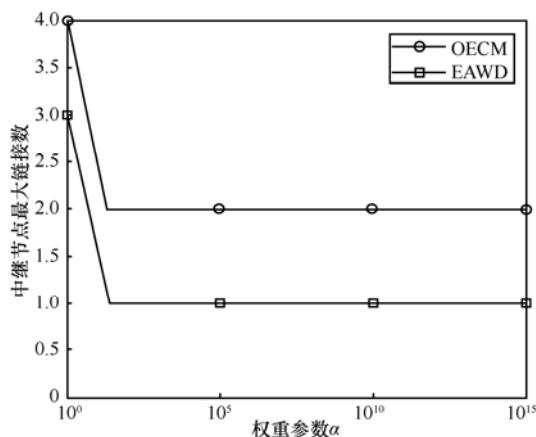


图 7 权重参数对中继节点最大链接数的影响

由于 OECM 模型限定拓扑结构为 2 跳，使用的中继节点数目受到一定限制，因此当  $\alpha$  为较大值时，无线体域网引入的中继节点数目增加不明显，而 EAWD 模型并未限定跳数，导致实验结果的规律与文献[23]相比有一定偏差。

除了网络能耗和安装成本，当中继节点的链接数较大时，转发任务使该节点能量消耗速率加快，从而导致无线体域网中的节点能耗分布不均匀，因此中继节点的最大链接数作为衡量网络总能耗分布情况的重要指标，本节在  $\alpha$  取不同值时，计算中继节点链接传感器的最大链接数。从图 7 可以看出，权重参数  $\alpha=1$  时，构造无线体域网中继节点链接传感器的最大链接数最大， $\alpha>10^5$  时，对中继节点最大链接数没有影响，与 EAWD 模型相比，本文 OECM 模型得到的无线体域网中继节点最大链接数降低 33%。

因此在 WBAN 的实际部署时，为了同时确保低能耗、低成本以及能耗均匀分布，可以考虑将权重参数  $\alpha$  设为  $[1, 10^5]$  的值。

### 3.2.3 网络能耗分析

对于本文采用的节点位置模型用 OECM、EAWD 优化设计模型得到的网络拓扑分别如图 8(a)、图 8(b)所示，星型网络拓扑 (STAR 模型) 如图 8(c)所示。从拓扑结构上看，OECM 引入 5 个中继节点，其最大链接数 (Max\_RS) 为 1；而 EAWD 引入中继节点的数目 ( $N_R$ ) 最多为 8 个，最大链接数为 2。由于拓扑结构的变化对网络能耗、时延和网络寿命产生了很大的影响，本文将在本节和随后 2 节进行分析。

图 8 所示的网络拓扑的能耗如表 4 所示。OECM 模型的总能耗 ( $E_{tot}$ ) 比 EAWD 模型改进百分比 (PI, percentage improvement) 为 40.5%，这是由于图 8(b)EAWD 模型结构中部分靠近 hub 的传感器使用中继节点转发信息，不仅使中继节点数目增加 3 个，而且转发的能耗大于直接发送的能耗，导致总能耗增加。同时，中继节点的最大链接数为 2，可能会导致链接数大的中继节点能耗升高，导致平均能耗 ( $E_R$ ) 较大，也增加了总能耗。而对于 STAR 模型，虽然没有引入中继节点，但远离 hub 的传感器节点需要更多的发射放大功耗传送数据，使得传感器平均能耗 ( $E_S$ ) 远大于 OECM 模型，导致总能耗比 OECM 模型高出 13.06 倍。

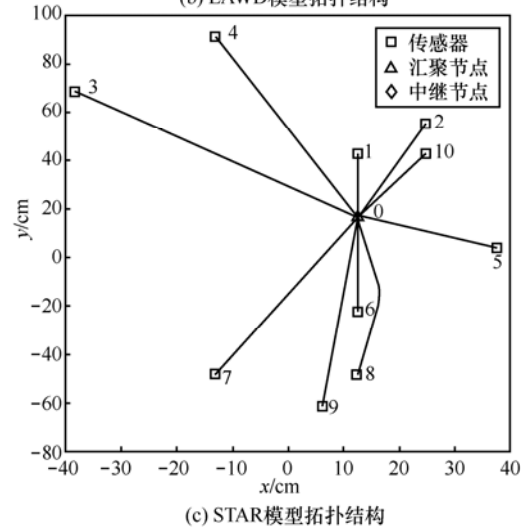
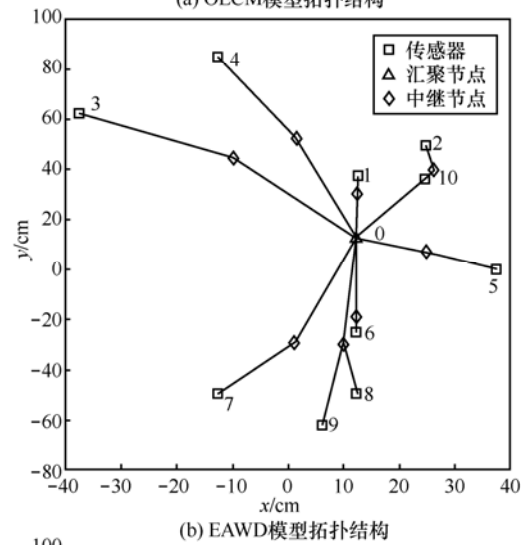
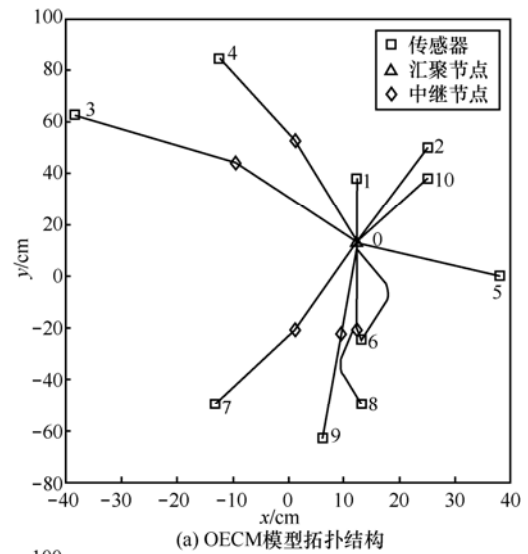


图 8 模型拓扑结构

### 3.2.4 网络时延分析

网络时延指的是信息从传感器端传送到汇聚节点 hub 端所需要的时间，它包括了发送时延、传

表 4 网络能耗对比

模型	$E_{tot}/(nJ \cdot bit^{-1})$	PI(%)	$E_s/(nJ \cdot bit^{-1})$	$E_R/(nJ \cdot bit^{-1})$	$N_R/个$	Max_RS/个
OECM	41.4	—	1.7	4.9	5	1
EAWD	69.6	40.5	1.7	6.6	8	2
STAR	582.2	1 306	58.2	—	—	—

播时延、排队时延和传输时延。假设发送时延和传输时延相同，则可以忽略不计，那么网络时延( $T_d$ )=传播时延( $T_s$ )+排队时延( $T_q$ )。其中，排队时延为等待队列前信息发送时间，如式(17)和式(18)所示。

$$T_s(d) = Ad + B \tag{17}$$

$$T_q(i) = \sum_{j \leq i} \frac{D_j}{v}, \quad \forall i, j \in q \tag{18}$$

式(17)中,  $d$  表示发送节点与接收节点之间的距离,  $A$  和  $B$  为参数, 在人体上,  $A=0.54, B=-1.82$ ; 式(18)中  $q$  为等待队列,  $D_j$  为在等待队列  $j$  位置处的数据<sup>[7]</sup>,  $v$  为节点的处理信息速度, 本文以 Nordic nRF2401<sup>[23]</sup>的处理速率 1 Mbit/s 作为本实验的处理信息速度。根据计算结果得到 3 种拓扑结构的网络时延, 如图 9 所示。

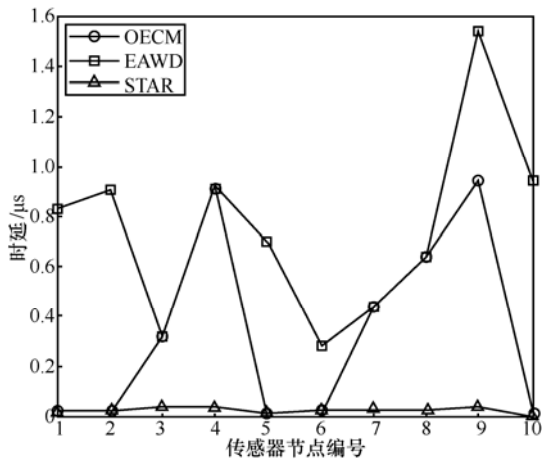


图 9 传感器的网络时延

从图 9 可以看出, 由于 1 跳星型拓扑结构 WBAN 中的传感器直接与汇聚节点通信, 只需考虑传输时延, 因此网络时延最低。将图 8 中 OECM 模型得到的网络与 EAWD 模型得到的网络相比, 除了传感器 3、4、7、8 的网络时延相同, 其余传感器的网络时延均有明显降低, 原因是图 8(a)中传感器 1、2、5、6、10 没有引入中继节点, 选择直接与汇聚节点通信, 从而省去了排队时延; 传感器 9 的中继节点选取在较好的候选位置并且独自使

用一个中继节点节省了排队时延, 使其网络时延降低。整个无线体域网的传感器网络时延平均降低 52.4%。

3.2.5 网络寿命分析

本文以第 1 个传感器节点“失效”前其信息采集轮数 (round) 来衡量网络寿命, 假设所有节点能量均为 5 J, 根据网络能耗分析实验数据和结果发送数据, 传感器和中继节点的网络寿命如表 5 和表 6 所示。

表 5 传感器的网络寿命

传感器编号	OECM/round	EAWD/round	STAR/round
1	3 511 113	3 514 766	3 511 113
2	3 221 671	3 237 944	3 221 671
3	9 899 618	9 899 618	157 796
4	3 205 971	3 205 971	31 867
5	4 234 705	4 240 991	4 234 705
6	10 723 873	10 769 794	10 723 514
7	7 063 115	7 073 647	149 740
8	4 687 881	4 693 646	152 041
9	3 080 317	3 090 331	34 268
10	3 075 693	3 080 582	3 075 693

根据表 5 和表 6 中的数据, 并结合网络寿命的定义, 可知 EAWD 模型得到的无线体域网寿命为 499 012; 星型拓扑结构 WBAN 网寿命为 31 867; OECM 模型得到的无线体域网寿命为 1 015 499, 与 EAWD 模型相比, 网络寿命提高近 104%。由于无线体域网中引入了中继节点, 传感器只需将信息交由距离较近的中继节点转发, 从而提高了它们的网络寿命, 因此离汇聚节点较远的传感器, 如图 8(c)中的传感器 4 成为星型拓扑结构 WBAN 的网络寿命瓶颈。但是 EAWD 得到的无线体域网中继节点的最大连接数大于 OECM 的无线体域网中继节点的最大连接数, 因此转发任务集中到链接数较大的中继节点, 如图 8(b)传感器 8 和传感器 9 共用的中继节点能耗增加, 从而降低了网络寿命。

表 6 中继节点的网络寿命

中继节点编号	OECM/round	EAWD/round
1	1 015 499	1 015 499
2	3 134 915	3 134 915
3	2 237 327	1 111 655
4	9 705 346	499 012
5	1 483 856	1 341 415
6	—	2 234 907
7	—	589 415
8	—	3 403 259

### 3.2.6 误比特率分析

以医疗无线体域网为例，WBAN 采集到的人体生理参数是作为医务人员对监测者疾病诊断的重要依据，所以说完整准确的监测数据对于疾病的诊断具有重要的意义。因此传输过程中路径损耗带来的误比特率是衡量无线体域网好坏的一个重要指标。

#### 1) 路径损耗模型

文献[24]利用最小二乘法将 2 个频带拟合合成回归直线并推导出信道 CM3-A 的路径损耗模型如式(19)所示。

$$PL(d) = a \lg(d) + b + N \quad (19)$$

其中， $a$  和  $b$  为线性拟合系数， $d$  表示发射器与接收器之间的距离， $N$  是标准偏差为  $\delta_N$  的正态分布随机数；在室内环境下， $a=6.6$ ， $b=36.1$ ， $\delta_N=3.8$ 。

信道 CM3-B 的路径损耗模型如式(20)所示[24]。

$$PL(d) = -10 \lg(P_0 e^{-md} + P_1) + N \quad (20)$$

其中， $P_0$  为接近天线的平均损耗， $m$  为表面波在人体周围传播时的平均衰减率， $d$  为距离， $P_1$  为在室内环境中信号远离身体并反射到接收器的平均衰落， $N$  为标准偏差为  $\delta_p$  的正态分布随机数；在室内环境下， $P_0=25.8$ ， $m=2.0$ ， $P_1=-71.3$ ， $\delta_p=3.6$ 。

为了区别无线通信链路类型（即 LOS 和 NLOS），本文将人体表面大致分为 6 个区域，分别为左小腿区域、右小腿区域、左大腿区域、右大腿区域、左躯干区域和右躯干区域。

当 2 个传感器节点之间的链路位于同一区域时，链路类型为 LOS，信道的路径损耗模型采用式(19)；当链路跨域 2 个区域时，链路类型为 NLOS，信道的路径损耗模型使用式(20)。

#### 2) 无线通信链路分析

精确的无线通信链路分析主要包括信噪比（SNR, signal-to-noise ratio）以及误比特率（BER, bit error rate）。SNR 大多是通过基于阈值的方法评估，但从全面性和准确性的角度出发，本文采用计算公式，如式(21)所示[24]。

$$SNR_{i,j} = P_{Tx} + PL_{i,j} - P_N \quad (21)$$

其中， $P_{Tx}$  是发射功率， $P_N$  是噪声功率， $PL_{i,j}$  是节点  $i$  和节点  $j$  之间的路径损耗。本文设定  $P_{Tx}=-10\text{dBm}$ ， $P_N=-92\text{dBm}$ ， $PL_{i,j}$  由式(19)和式(20)计算得出。在此基础上，BER 通过由 SNR、频率和数据率组成的函数计算得出，如式(22)和式(23)所示。如果 2 个节点之间存在中继节点，那么其误比特率为中间各段链路的误比特率平均值。

$$BER_{i,j}^{\text{DBPSK}} = 0.5e^{-\frac{E_b}{N_o}} \quad (22)$$

$$\frac{E_b}{N_o} = SNR_{i,j} + 10 \lg\left(\frac{BW}{R}\right) \quad (23)$$

其中， $BW$  选用 2.45GHz，传感器的数据率  $R=200\text{ kbit/s}$ ，使用 Matlab 对拓扑结构为如图 8 所示的 3 个无线体域网场景计算传感器节点与 hub 之间的误比特率，计算结果如图 10 所示。

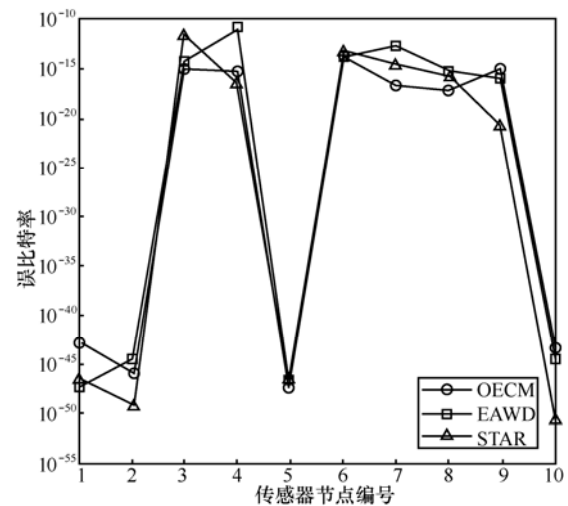


图 10 传感器的误比特率

同时，计算得出 OECM 模型、EAWD 模型和 STAR 模型的平均误比特率分别为  $2.45 \times 10^{-15}$ 、 $1.23 \times 10^{-12}$ 、 $2.12 \times 10^{-13}$ ，结合图 10 可以看出，OECM 模型的误比特率较优于 EAWD 模型和 STAR 模型，原因是 OECM 模型中的传感器 3、4、7、8

引入中继节点, 将 STAR 模型中的长距离 NLOS 链路转化为 LOS 链路和短距离 NLOS, 且中继节点位置优于 EAWD 模型, 降低了路径损耗, 从而优化了误比特率。

#### 4 结束语

本文研究了 IEEE 802.15.6 无线体域网拓扑结构优化设计方法, 并建立了 IEEE 802.15.6 标准的 2 跳扩展星型结构的能耗成本优化模型, 采用混合整数非线性规划方法求解该模型下以节能和部署代价为优化目标的中继节点的最佳数量、部署位置及其数据路由。实验结果表明, 与其他拓扑结构模型相比, 所提出的 OECM 模型在节能、提高网络寿命、降低网络时延、安装成本和误比特率方面都有所改善, 为 IEEE 802.15.6 无线体域网的设计和部署提供了有力的支持。

#### 参考文献:

- [1] REUSENS E, JOSEPH W, BRAEM B. Characterization of on-body communication channel and energy efficient topology design for wireless body area networks [J]. IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine, 2009, 13 (6): 933-945.
- [2] 刘毅, 宋余庆. 无线体域网技术研究[J]. 小型微型计算机系统, 2013, 34(8): 1757-1762.  
LIU Y, SONG Y Q. Study on wireless body area networks[J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2013,34(8): 1757-1762.
- [3] IEEE standard for local and metropolitan area networks part 15.6: wireless body area networks[J]. 2012:1-271.
- [4] BYKOWSKI M, TRACEY D, GRAHAM B. A schema for the selection of network topology for wireless body area networks[C]//2011 IEEE Radio and Wireless Symposium (RWS). Arizona, USA, c2011: 390-393.
- [5] MESMOUDI S, FEHAM M. BSK-WBSN: biometric symmetric keys to secure wireless body sensors networks[J]. International Journal of Network Security & Its Application (IJ- NSA), 2011, 3(5): 155-166.
- [6] LIN C S, CHUANG P J. Energy efficient two hop extension protocol for wireless body area networks[J]. IET Wireless Sensor Systems, 2012, 3(70): 37-56.
- [7] DRICOT J M, ROY S V, FERRARI G, et al. Impact of the environment and the topology on the performance of hierarchical body area networks[J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2011, 122(1): 1-17.
- [8] HE Y F, ZHU W W, GUAN L. Optimal resource allocation for pervasive health monitoring systems with body sensor networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2011, 10(11): 1558-1575.
- [9] CHEBBO H, ABEDI S, LAMAHEWA T A, et al. Reliable body area networks using relays: restricted tree topology[C]//2012 International Conference on Computing, Networking and Communication (ICNC). Hawaii, USA, c2012: 82-88.
- [10] CAI X, LI J, YUAN J, et al. Energy aware adaptive topology adjustment in wireless body area networks[J]. Telecommunication Systems, 2015, 58(2): 139-152.
- [11] FRANCO F D, TINNIRELLO I, GE Y. 1 Hop or 2 hops topology analysis in body area network[C]//2014 European Conference on Networks and Communications (EuCNC). Bologna, Italy, c2014: 1-5.
- [12] KIM S Y, KWON J A, LEE J W. Study of optimal topology and routing in the BAN[C]//2012 International Conference on ICT Convergence (ICTC). Jeju Island, Korea, c2012: 702-703.
- [13] BRAEM B, BLONDIA C, MOERMAN I, et al. The need for cooperation and relaying in short range high path loss sensor networks[C]//International Conference on Sensor Technologies and Applications, Valencia, Spain, c2007: 566-571.
- [14] HAMIDA E B, ERRICO R, DENIS B. Topology dynamics and network architecture performance in wireless body sensor networks[C]//2011 4th IFIP International Conference on New Technologies, Mobility and Security (NTMS). Paris, France, c2011: 1-7.
- [15] ELIAS J. Optimal design of energy efficient and cost effective wireless body area networks[J]. Ad Hoc Networks, 2014, 13: 560-574.
- [16] SHAY W T, JAN S C, TARNG J H. A reduced size wide slot antenna for enhancing along body radio propagation in UWB on body communications[J]. IEEE Transactions on Antenna and Propagation, 2014, 62(3): 1194-1203.
- [17] GHANEM K, KHAN I, HANZO L. MIMO stochastic model and capacity evaluation of on body channels[J]. IEEE Transactions on Antenna and Propagation, 2012, 60(6): 2980-2986.
- [18] KHAN J Y, YUCE M R, BULGER G, et al. Wireless body area network design techniques and performance evaluation[J]. Journal of Medical Systems, 2012, 36(3): 1441-1457.
- [19] ABBASI Q H, SANI A, ALOMAINI A, et al. Numerical characterization and modeling of subject specific ultra wide band body centric radio channels and systems for health care applications[J]. IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine, 2012, 16 (2): 221-227.
- [20] ALAM M M, HAMIDA E B. Surveying wearable human assistive technology for life and safety critical applications: standards, challenges and opportunities[J]. Sensor, 2014, 14(5): 9153-9209.
- [21] ZHAO H W, QIN J, HU J K. An energy efficient key management scheme for body sensor networks[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2013, 24(11): 2202-2210.
- [22] DOMINGO M C. Sensor and gateway location optimization in body sensor networks [J]. Wireless Networks, 2014, 20 (8): 2337-2347.
- [23] NORDIC I. nRF2401 single chip 2.4 GHz radio transceiver data sheet [EB/OL]. <http://www.nordicsemi.com/eng/products/2.4GHz-RF/nRF2401A/>, 2015.07.08.
- [24] ALAM M M, HAMIDA E B. Towards accurate mobility and radio link modeling for IEEE 802.15.6 wearable body sensor networks[C]//2014 Seventh IEEE International Workshop on Selected Topics in Wireless and Mobile Computing. Larnaca, Cyprus, c2014: 298-305.

#### 作者简介:



梁正友 (1968-), 男, 壮族, 广西天等人, 博士, 广西大学教授, 主要研究方向为网络并行分布式计算技术、无线传感器网络。



姚玉梅 (1990-), 女, 河北保定人, 广西大学硕士生, 主要研究方向为无线体域网。