

面向无线体域网通信的最优温度—QoS 感知路由协议

林佳怡, 郑嘉豪*

福州大学物理与信息工程学院, 福州 350108, 福建, 中国

摘要: 无线体域网 (WBAN) 已成为应对人口老龄化、医疗设施不足以及各类慢性疾病等问题的一种有前景的解决方案。WBAN 面向实时应用, 其需求正不断增长。然而, 由于网络结构持续变化、供电受限、计算能力受约束以及能量约束, 实现服务质量 (QoS) 保障是一项困难的任务。为缓解上述限制, 本文提出了一种面向 WBAN 通信的最优温度—QoS 感知路由协议 (OTQRP), 并从温升、能耗和时延三个方面考察了其效果。结果表明, 与已有工作相比, 本文方法具有更好的能量效率。最后, 本文还从复杂度、时延和能量经济性等特征出发, 将 OTQRP 与近期研究进行了对比, 结果显示 OTQRP 的综合表现优于其他方法。

关键词: 能量; 优化; QoS; 路由协议; 温度; 无线体域网

Optimal Thermo-QoS-Aware Routing Protocol for WBAN Communication

JiaYi Lin, JiaHao Zheng*

College of Physics and Information Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, Fujian, China

Abstract: Wireless body area network (WBAN) has emerged as a promising solution to address problems such as population aging, a lack of medical facilities, and different chronic ailments. WBANs have real-time applications, and there is an increasing demand for them. However, due to changing network structure, power supply limitations, and constrained computing capacity, energy constraints, it is difficult task to achieve quality of service (QoS). To mitigate these limitations, the paper proposed an optimal thermo-QoS-aware routing protocol (OTQRP) for WBAN communication. The result was investigated in terms of temperature rise, energy consumption and delay. The paper shows better energy efficiency with respect to existing works. Finally, OTQRP feature comparison is also presented with recent research in terms of features such as complexity, latency, and energy economy and observed that OTQRP shows best performance as compared to others.

Keywords: Energy; Optimization; QoS; Routing protocol; Temperature; Wireless body area network

一、引言

无线体域网 (WBAN) 是技术进步的产物, 由微型可穿戴生物传感器或植入式设备构成, 用于采集心电 (ECG) 数据、体温和血压等生理信号, 如图 1 所示。WBAN 已被用于医疗保健、人际交互应用和助残等领域, 其中最主要的应用场景是医学: 无线传感设备先采集并分析医学生命体征数据, 再将其发送至远程服务器进行分析。

Copyright © 2026 by author(s) and Ufascience Publisher.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution international License (CC BY 4.0)

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



文章引用: 林佳怡, 郑嘉豪. 面向无线体域网通信的最优温度—QoS 感知路由协议[J]. 现代工程与应用, 2026, 4(1): 20-26.

DOI: <https://doi.org/10.61784/mea2006>

物理层负责优化无线信道模型并尽量降低路径损耗；数据链路层则致力于构建节能且能延长网络寿命的高效多址接入协议[1]。由于人体运动难以预测、网络结构随之改变，网络层的重点在于为 WBAN 确定合适的拓扑结构，其目标是提供高可靠性的数据传输。近期研究多集中于无线传感器网络（WSN）的路由协议，但在 WBAN 中，降低功耗只是众多考虑因素之一，还需兼顾节点能耗、无线网络中收发有效字节数，以及尽量减少患者身上佩戴的设备数量[2]。

在静态网络中，多数 WSN 协议假定传感器是同构的，而 WBAN 中的设备则是异构且移动的。WBAN 通信还必须满足严格的实时性约束，并把毫米级的运动精度纳入考虑。尽管 WBAN 与 WSN 面临相似的问题，但由于二者内部差异显著，前者仍需更深入的研究。

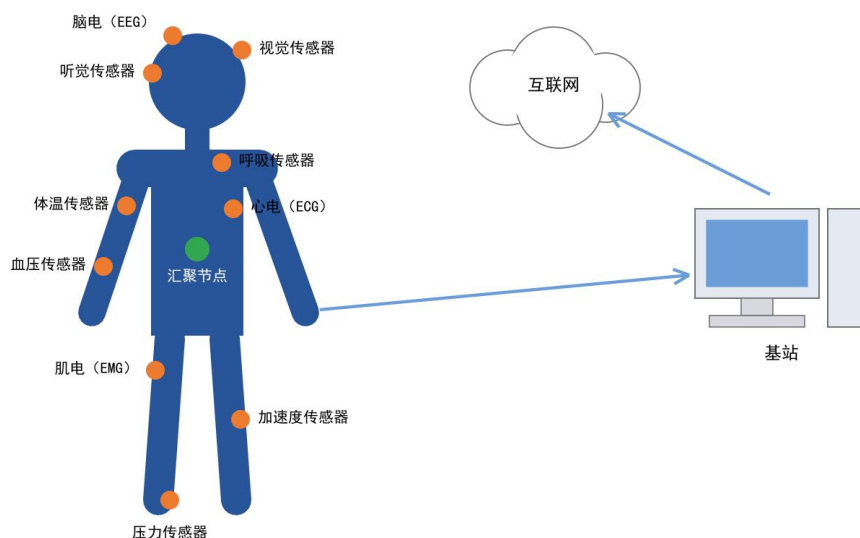


Figure 1 Wireless Body Area Networks

图 1 无线体域网

WBAN 借助无线通信与传感技术监测来自人体的生理数据，并按三层结构组织数据的处理与传输。第一层是置于体表或体内、负责采集数据的传感器；第二层是接收这些数据并将其转发至终端数据中心的设备；第三层即数据中心，在此完成数据处理并支撑各类应用。WBAN 能够实现实时监测与应急响应：一旦检测到异常数据即可立即告警。该技术把人体接入通信网络，使泛在、连续的健康监护服务成为现实[3]。

因此，WBAN 是长期人体监护的关键手段，而受限于资源条件，其运行高度依赖能量效率。该领域的研究已探索了多种优化技术，包括协作分簇、粒子群优化（PSO）、QoS 感知路由协议以及 LEACH 等算法，以提升能量效率。然而挑战依然存在：对网络异构性、移动性和多 WBAN 组网的支持不足；除能量之外，仍缺少用于筛选更高效 WBAN 路由协议的最优参数。此外，如何在能量效率与时延等性能指标之间取得平衡，也仍是亟待改进的关键问题。尽管已有长足进展，该领域仍在寻求能够适应 WBAN 动态而多样之需求的方案，这凸显了对可扩展、灵活且面向性能的协议的迫切需要。

研究者在 WBAN 路由协议方面的贡献，集中体现在能量效率管理、时延降低，以及针对姿态、温度等特定条件的优化上[3]。已有工作提出了从基于姿态、基于温度到基于簇、基于服务质量（QoS）的一系列协议，分别应对 WBAN 路由的不同侧面。其中一些协议在能量效率或复杂度控制上表现突出，另一些则侧重于降低时延或适应动态条件。尽管如此，局限依然存在：能量效率与时延之间的权衡、某些算法过高的复杂度，以及对适应性和可扩展性的更高要求。由此可见，后续的研究方向包括：更有效地平衡能量与时延、简化复杂协议、

增强对变化条件的适应能力、支持网络异构性, 以及探索跨层优化策略。解决这些局限有望带来更稳健、更高效的 WBAN 路由方案, 从而提升此类网络在健康监护等场景中的可靠性与可用性。

受此驱动, 本文的主要贡献如下:

- (1) 梳理了 WBAN 中基于 QoS 的路由所面临的若干关键问题与可能的发展方向。
- (2) 设计了一种以温度和 QoS 为影响因素的 WBAN 通信路由协议。
- (3) 所提出的 OTQRP 具有低复杂度、低时延和高能量效率。

本文其余部分安排如下: 第二节介绍 WBAN; 第三节为文献综述, 梳理研究者在 WBAN 路由领域的近期贡献, 并按姿态、温度和能量效率等分类讨论不同类型的路由协议; 第四节给出所提方法及其流程图与算法; 第五节为模型的结果分析与横向对比; 第六节为讨论; 第七节给出结论与未来工作展望。

二、无线体域网概述

WBAN 是一类采用三层架构运行的体域网。该网络由附着于体表或植入体内的传感器(第一层)、智能设备(第二层)以及提供各类应用的远程服务器(第三层)组成。有关人体生理状态的信息被采集后, 经互联网服务传送至数据中心; 数据中心随即对所采集的数据进行分析, 并在出现异常数据时通过应急传输和告警作出动态响应。这一创新技术使应急处置与救援更为迅速。目前 WBAN 的应用尚不算多, 但拓展其应用清单的研究正在推进。WBAN 在医疗与健康行业应用最广, 可用于远程医疗、远程患者监护和应急响应, 也可用于军事、娱乐以及运动健身监测。不过, 要把 WBAN 的潜在应用扩展到其他行业, 仍需更深入的研究与开发。在健康监护中, 生物反馈被视为 WBAN 的主要应用之一: WBAN 使医护人员能够采集人体传感器信号, 用于健康评估、医学诊断和处方开具; 通过提供实时反馈与居家康复支持, WBAN 也有助于康复治疗; 借助传感器对人体进行远程监测, 还可将生物反馈用于维持和改善健康。此外, WBAN 可用于养老与助残机构, 对居家的老年人和残障人士进行监测, 在提升其生活质量的同时降低医疗成本。与此同时, 安全性、互操作性、隐私、系统部件的复杂度、传感器数据校验、数据一致性、干扰与数据管理等, 都是该技术面临的困难。WBAN 要有效运行, 必须确保患者数据安全、跨多种技术标准的互操作性、隐私保护以及尽可能低的系统设备复杂度; 此外还需解决传感器数据的一致性与有效性管理, 以及海量生成数据的管理问题; 为改善与其他网络设备的共存, 也应设法降低干扰。

三、相关研究

(一) 基于姿态的路由

基于姿态的路由协议面向的是拓扑随人体姿态而设计的网络。人体动作的规律性有助于改善网络拓扑; 肢体运动会影响网络结构并产生阴影效应, 从而引发时延。提前预测下一个动作有助于减少时延、提高数据传输速率。为提升 WBAN 系统的效能与性能, 研究者提出了多种方法。Sun[1] 提出了一种基于贝叶斯网络的数据传输方法, 其实时性表现更优。此外, Gao 等[2] 提出了人体姿态的分层识别算法, Quwaider 等[3] 设计了用于最优功率分配的功率控制机制, Alrashidi 和 Nasri[4] 考察了新型无线技术。Liang 等[5] 提出了一种以降低节点能耗为主要目标的面向姿态的路由协议。Karmakar 等[6] 提出了由两组完全相同的节点构成的容错系统; Samanta 和 Misra[7] 则针对机会式 WBAN 提出了一种成本最小化的最优框架。上述工作的实验结果均显示网络性能有显著改善。

(二) 基于温度的路由

在基于温度的路由方法中, WBAN 选择路径的首要参数是节点温度。该方法通过选择能够避开高温节点的最优路径, 来防止或减缓节点温升。出于 WBAN 的安全性顾虑, 这一方法最早受到研究; 但近年来随着关注点转向能量效率, 其使用有所减少。Boano 等[8] 搭建了 TempLab 测试床, 用于控制温度并展示温度对网络性能的影响。Park[9] 演示了一种基于 WSN 的设备, 用于减少温室环境中的结露; Nasipuri 等 则为变电站监测设计了温度感知路由协议。近期研究还包括: Ciani 等 应用智慧农业技术监测环境条件与土壤参数, Kadjouh 等使用 CupCarbon 对电池进行仿真, Alassery 提出了一种面向 WSN 的高效路由技术。Tang 等 采用热感知路由协议解决植入式传感器网络中的路由问题[10-12]; Khan 等 提出了面向无线体域传感器网络的稳定网络方案。Bhangwar 等 提出了兼顾信任与热效应的 WBAN 路由协议; Kim 等 则提出了一种计及温度的路由方法。所有这些算法在仿真中的表现均优于其他方案, 在多种业务条件下降低了热点、投递时延、丢失率、丢包率、吞吐量与温度等指标。

(三) 跨层路由

该类路由协议融合多个协议, 通过多层次协同为不同类型的数据提供定制化服务, 从而实现低时延与高可靠性; 它对动态 WBAN 的适应性更强, 也更节能。实验已证明跨层方法的有效性。Bai 等 提出了面向 WSN 的跨层能量优化方法 (EOA), 把物理层、介质访问控制 (MAC) 层和路由层的优化结合起来以提升能量效率。Saleem 等 提出了一种基于跨层架构、受蚁群启发的路由协议, 依据链路质量、能量水平和速度特征寻找最优路径。Singh 和 Verma 提出了一种跨层路由协议, 它结合主动式与反应式网络技术, 基于面向异构网络的自适应阈值敏感分布式路由协议构建。总体而言, 这些研究表明跨层策略能够提升 WSN 的能量效率与数据传输性能。Melodia 等 把跨层路由协议表述为一个优化问题。Jaradat 等 提出了一种能量感知路由方案, 利用模糊逻辑系统控制器, 依据来自不同协议栈层的参数作出下一跳路由决策。Kaur 和 Kumar 提出了计及 QoS 的多目标跨层路由协议, 其能量效率更高、端到端时延更低。Bahadur 和 Lakshmanan 综述了 WSN 中近期的跨层 QoS 方法, 并建议采用 RAS 分类法来实现 QoS。最后, Alrajeh 等 设计了一种基于跨层理念并覆盖安全性的路由协议。

(四) 基于簇的路由

分簇技术源自 WSN, 在 WBAN 中得到了广泛应用。分簇路由协议能够保障网络连通性、优化能耗、适应拓扑变化并增强网络韧性。在该方法中, 节点被划分为若干簇, 每个簇包含多个簇内节点和一个负责在簇内采集并传输数据的簇头 (CH)。LEACH 是 WSN 中著名的分簇路由协议, 而分簇路由已被证明更适用于 WBAN。Singh 和 Sharma 提出了基于簇的路由技术分类, 并对分簇方案作了全面综述。Singh 等 聚焦 WSN 的基于簇的分层路由协议, 发现低功耗协议、网络设计、协议路由和覆盖问题等方向已有大量研究。Tang 等 提出了结合遗传优化与粒子群算法的混合方法, 用以优化簇头选择并基于汇聚节点的移动性改善数据传输。Yu 等 提出了名为 CCM 的路由方法, 兼取 LEACH 与 PEGASIS 之长以提升性能。Fanian 和 Rafsanjani 亦针对 WBAN 设计了能量约束分簇协议。Maheshwari 等 对 WSN 分簇技术作了综述, 并按方法论将其分为四类。Sabet 和 Naji 等 同样对 WSN 分簇技术作了综述, 并按方法论将其分为四类。Lotf 等 提出了一种去中心化的分层分簇路由方法, 同时使用多跳路由与分簇以减少控制包、延长网络寿命。Ke 等 提出了具备能量感知能力的分层分簇路由协议, 在保证节点间能耗均衡的同时降低总能耗。Sahoo 等 在延长簇头寿命 (ELCH) 路由协议中给出了一种新颖的分簇算法: 由传感器为其邻居投票, 以此选出合适的簇头, 从而得到分布均匀的簇。

(五) 基于 QoS 的路由

由于 WBAN 运行于资源受限的环境, 必须考虑那些确保数据传输可靠、高效的 QoS 因素。Othman 和

Yahya 提出了 EQSR 协议, 在均衡各节点能耗的同时优化时延、吞吐量和数据冗余。Liu 等 设计了一种基于软件代理的协议, 由代理负责监测网络拓扑变化并参与路由。Fonoage 等 提出了结合 QoS 支持的地理路由机制; Tan 等 在所提出的 QSDN-WISE 协议中采用基于双簇头的非均匀分簇方法, 以节省能量、延长网络寿命。Zhang 和 Xu 使用 PSO 对多项 QoS 指标进行优化。Mahajan 等 设计了基于簇头节点权重的节能路由协议。Sharma 等 从能量角度设计了 QoS 路由协议。Kalnoor 和 Agarkhed 提出了一种兼具安全路由协议与入侵检测的节能方法, 以改善端到端时延。Maheshwari 和 Karthika 设计了带入侵检测的分簇路由协议, 以获得更好的 QoS。此外, Kumar 和 Thirukrishna 提出了 OREA 算法, 旨在改善 WSN 中的能量耗散与数据传输速率, 并通过与随机选择、同构选择等现有方法在业务负载和分组投递率等 QoS 指标上的对比来评估其性能。

四、研究方法

本文把 WBAN 中的温升与 QoS 偏低问题视为一个多目标优化问题, 并给出相应的解决方案。为此, 本文采用灰狼优化 (GWO) 算法, 通过在传感器节点间均匀分配负载来降低温升、延长网络寿命。因此, 本研究旨在通过高效处理多跳通信来提升 WBAN 的性能, 在保持低温升的同时实现可靠且 QoS 感知的数据传输。所提出的方法借助 GWO, 以多目标优化的思路应对 WBAN 中的温升与 QoS 问题, 明确了在温度管理与网络寿命之间取得平衡这一目标, 并通过在传感器节点间公平分配负载来实现。所作假设符合实际, 为最优温度—QoS 感知路由协议 (OTQRP) 的实现确立了清晰的框架, 其中区分了关键数据与常规数据两种传输模式, 以兼顾效率与温升。该方法通过高效处理多跳通信, 为提升 WBAN 性能提供了可能。

(一) 假设

实现 OTQRP 时作如下假设:

- (1) 网络中每个传感器节点位置固定, 与汇聚节点通信, 且发射功率与通信半径固定。
- (2) 汇聚节点拥有充足资源以持续供电, 且启动后即可获知邻近节点的位置。
- (3) 关键数据以单跳通信直接发往目的节点, 常规数据则采用多跳通信, 转发节点依据温升所处的阶段来选择。

(二) 所提方法

OTQRP 采用受灰狼捕猎行为启发的 GWO 算法来选择用于数据汇聚与传输的最优簇头节点, 见算法 1。该分簇路由技术包含分簇、簇头选择和数据传输三个阶段, 并循环往复。因此, 所提模型的整体工作过程可分为三步, 如图 2 所示。

(1) 节点部署与参数初始化: 在此阶段, 为每位 WBAN 用户部署 N 个节点, 从而支持 WBAN 间与 WBAN 内两种通信。在 WBAN 内部存在用于协调数据的汇聚节点 (即簇头); 类似地, WBAN 之间存在协调节点, 负责把数据协调至更高层级。WBAN 内部的传感器节点被视为不可充电、异构且无法改变拓扑, 并采用全双工传输模式。

(2) 目标函数确定: WBAN 中的传感器节点会升高周围组织的温度并缩短网络寿命。所提出的 OTQRP 算法在路由初始化时会同时考虑温度以及时延、能量影响等 QoS 参数。



Figure 2 Working Steps of Proposed Methodology

图 2 所提方法的工作步骤

Algorithm 1 Routing based on GWO

算法 1 基于 GWO 的路由

步骤	内容
1	初始化迭代计数器 t 与灰狼种群 X_i ($i = 1, 2, \dots, n$)
2	计算每头狼的适应度: $X\alpha$ = 最优狼; $X\beta$ = 次优狼; $X\delta$ = 第三优狼
3	while (t 小于 Max_iterations)
4	依据适应度函数选出 $X\alpha$ 、 $X\beta$ 和 $X\delta$
5	按 $X(t+1) = (X\alpha + X\beta + X\delta)/3$ 更新最新的狼群位置
6	end for; 更新参数
7	用 F_{obj} 计算全部狼的总适应度
8	更新 $X\alpha$ 、 $X\beta$ 、 $X\delta$
9	用适应度最好的狼替换适应度最差的狼
10	$t = t + 1$
11	end while
12	返回 $X\alpha$

五、结果与讨论

本文分析了面向 WBAN 的各类路由协议，它们采用不同策略优化复杂度、时延和能量效率等性能指标。以下从多个维度对这些协议作出评述，重点讨论其设计中固有的权衡，以及未来改进 WBAN 路由协议的可能方向。贝叶斯网络、ATPC 和基于树的路由等协议着力应对人体姿态的动态特性，但往往以牺牲能量效率或增加时延为代价。EGP 与 RIP 协议依据温度变化调整路由，力图维持运行效率；RIP 复杂度高却能量效率也高，这表明精巧的算法有可能有效地管理资源，尽管可能带来更高的系统开销。自适应阈值路由协议和基于模糊逻辑的多跳网络则强调对网络运行的整体把握，把各层的考量统一起来。基于簇的协议包括采用蝴蝶优化、蚁群优化等优化算法的协议以及分层分簇方案，它们试图通过结构化的网络组织来管理能耗与时延，在平衡这两项指标上取得的成效各不相同。采用 PSO、CCWM 和 DHO 的协议侧重 QoS，在运行需求与性能之间取得平衡；其中 CCWM 尤其说明，低复杂度并不妨碍在能量效率与时延管理上取得高性能。

所提出的 OTQRP（混合协议）的引入是一项重要进展，据称克服了上述方法中的诸多局限。它兼具低复杂度、低时延与高能量效率，看来能够有效调和性能指标之间的矛盾，是一种颇具前景的方案。该协议的混合思路把温度敏感性与 QoS 考量结合起来，为满足 WBAN 的需求——尤其是在能量和高效数据传输方面——提示了一条新的路径。

六、结论与未来工作

WBAN 是 WSN 的一个子集，具有自身独特的属性，并因资源约束和应用侧重而适用范围有限。本文介绍了当前围绕下一跳选择方法展开的各类 WBAN 路由设计，这些方法同时涉及优化与 QoS 保障。研究者已提出多种路由算法与技术，以应对能量效率、网络寿命、安全性和数据可靠性等方面的挑战。本文在讨论了各种技术之后，提出了一种面向 WBAN 的理想的热感知与 QoS 感知路由协议，即 OTQRP，并展示了它相对已

有工作的效率优势。未来, 本工作将与拥塞控制机制及安全机制相结合。

参考文献

- [1] 陆建华. 6G通信超宽带传输技术. 电子学报, 2025, 50(03): 513-522.
- [2] 周秉根. 风电叶片复合材料成型工艺. 复合材料学报, 2022, 39(03): 1067-1078.
- [3] 李爱群. 老旧建筑抗震加固改造技术. 工程力学, 2025, 39(04): 1-10.
- [4] Gao L, Zhang G, Yu B, et al. Wearable human motion posture capture and medical health monitoring based on wireless sensor networks. Measurement, 2020, 166: 108252.
- [5] 刘吉臻. 新能源火电耦合调峰系统. 动力工程学报, 2022, 42(04): 265-273.
- [6] 张友军. 船舶动力系统减振降噪技术. 船舶工程, 2024, 44(03): 1-7.
- [7] Sun Y. Human daily activity detect system optimization method using Bayesian network based on wireless sensor network. Advances in Intelligent and Soft Computing, 2011, 104: 721-725.
- [8] 杨孟飞. 星载计算机容错设计技术. 中国空间科学技术, 2022, 42(02): 1-8.
- [9] 王树国. 机器人关节驱动器高精度控制. 机器人, 2022, 44(02): 1-8.
- [10] 郝吉明. 工业烟气多污染物协同治理. 中国环境科学, 2025, 42(04): 1501-1508.
- [11] 肖立业. 超导输电线路工程化关键问题. 电工电能新技术, 2022, 41(02): 1-10.
- [12] 朱合华. 城市地下管网数字孪生建模. 地下空间与工程学报, 2022, 18(02): 369-378.