

面向人体生理信号监测的无线个域网的研究^{*}

吴怡之¹ 丁永生^{1,2} 许红安³ 肖婷¹

(东华大学信息科学与技术学院 上海 201620)¹

(数字化纺织服装技术教育部工程研究中心 上海 201620)²

(华东师范大学信息科学与技术学院 上海 200062)³

摘要 针对医疗保健领域人体生理监护需要,提出基于 IEEE 802.15.4 的人体生理信号监测无线个域网(Physiological Monitoring-Wireless Personal Area Network, PM-WPAN),在人体范围内采集、传输各种基本生理信号。该低速、低复杂度无线网络具有高可靠性、低成本和低功耗的特点。设计了 PM-WPAN 传感节点部署、工作频段、拓扑结构、媒体访问模式等相关网络通信机制。通过网络仿真对其吞吐量、延迟和丢包等性能进行了研究,证明该 PM-WPAN 能够满足生理监护需要。

关键词 无线个域网, IEEE 802.15.4, 人体生理监测, 网络性能

Study on Physiological Monitoring-oriented Wireless Personal Area Network

WU Yi-Zhi¹ DING Yong-Sheng^{1,2} XU Hong-An³ XIAO Ting¹

(College of Information Sciences and Technology, Donghua University, Shanghai 201620)¹

(Engineering Research Center of Digitized Textile & Fashion Technology, Ministry of Education, Donghua University, Shanghai 201620)²

(College of Information Sciences and Technology, East China Normal University, Shanghai 200062)³

Abstract To meet the requirements of personal physiological signal transmissions, we proposed an IEEE802.15.4 based physiological monitoring-wireless personal area network (PM-WPAN) to collect and transmit various vital signals. This low data rate and low complex wireless network has high reliability, low cost and low power consumption. We discuss its nodes distribution, operating frequency bands, network topology, medium access modes etc. Simulations on network performances, such as throughput, delay, packet losing rate, show that the PM-WPAN can satisfy the requirements of physiological monitoring.

Keywords WPAN, IEEE 802.15.4, Physiological monitoring system, Network performance

1 引言

医疗保健领域需要把患者的各种重要生理信息进行及时、准确地监测和传输,并进行处理、分析,以便帮助医护人员对患者病情进行诊断、监控。在现有系统中,信号的传输大多通过有线方式,影响病人的正常活动,难以长时间全面地监测,并使病人感到紧张、不自然,从而导致所检测到的数据不准确。使用无线短距离传输网络可以克服上述问题,该领域已逐渐成为研究热点^[1,2]。

从 2003 年底标准确立,低速低功耗无线个域网协议 IEEE 802.15.4 就引起普遍关注^[3,4],并以惊人的速度在无线传感器网络领域得以发展。在国外,很多机构纷纷开展了面向人体生理信号监测的无线个域网的研究^[5,6],但国内还鲜见于报端。开展该领域的研究,对促进我国数字医疗技术的发展具有重要意义。

在分析人体基本生理信号采集传输需求的基础上,本文设计了基于 IEEE 802.15.4 的人体生理信号监测无线个域网(Physiological Monitoring-Wireless Personal Area Network, PM-WPAN),确定了其节点部署、网络工作频段、拓扑结构和

媒体访问模式等相关网络通信机制。基于网络仿真平台 NS2,进行了网络的模拟运行,对丢包率、延迟和吞吐量等网络性能进行了评价,证明其可行性。

2 人体生理信号监测需求及其网络拓扑结构

2.1 人体基本生理数据采集传输要求

为正确地进行医学监护,需要获取人体的几种常用的基本生理数据。PM-WPAN 需要对各种人体信号的传输需求以及传感器的具体放置位置有明确了解。以下是人体基本生理传感器的测量原理及技术要求:①心电图(ECG)是心肌产生电位变化的体表记录。信号获取方法常用的有两种:四肢放上电极夹子的标准导连和胸电极检测的胸导心电图。为了不影响人体活动,宜选用胸导联方式。②心率(HR)为心脏每分钟跳动的次数。检测心电图时,根据 R 波间期时间测量可以计算出病人的每分钟心率值。③呼吸/呼吸率(RESPIR)定义为肺部每分钟呼气和吸气的总周期数。体表心电图测量时,作为一种监护参数的副产品,呼吸曲线和每分钟呼吸次数可以通过检测的体表阻抗变化计算出来。④体温(TEMP)定义为人体腋下皮肤的温度值。⑤血压(BP)即血液在血管内流

^{*} 本文得到国家自然科学基金重点项目(60534020)、国家自然科学基金(60474037)、教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-04-415)资助。
吴怡之 讲师,博士研究生,从事可穿戴系统、信息融合与智能计算等研究;丁永生 博士,教授,博士生导师,从事智能系统、网络智能、DNA 计算、人工免疫系统、生物网络结构、数字化纺织服装等研究。

动时对血管壁的侧压力。⑥血氧饱和度(SPO₂)为动脉中氧合血红蛋白(HbO₂)与氧合血红蛋白和非氧合血红蛋白(Hb)之和的百分比值。血氧饱和度的测定是由发光管和光电检测仪构成的传感器来测定。⑦脉搏是动脉血管随心脏舒缩而周期性搏动,通常采用光电容积式传感器测量,可以和测量氧饱和度使用同一个传感器。

根据以上分析,得到人体基本生理信号采集传输相关参数^[7],如表1所示。

表1 生理信号采集传输参数表

监测项目	位置	采集频率	数据速率
心电图/心率/呼吸率	胸部	0.05~100Hz	48kbps
体温	腋窝	0.1Hz	0.05 kbps
血压	手臂	50Hz	8kbps
血氧饱和度/脉搏	手指	0.1~50Hz	8kbps

2.2 人体生理信号监测的网络拓扑结构

系统中各传感器负责采集人体生理数据,传感设备之间相对独立,不需要相互通信。网络需要一个中心协调器,合理控制与管理传感器,收集传感器设备采集的数据,并将所有数据发送到终端,进行数据处理。这些系统功能特性与 IEEE 802.15.4 协议提供的星型网络结构特性十分符合,因此网络采用星型拓扑结构。结合人体基本生理信号采集传输要求,得到 PM-WPAN 拓扑结构,如图1所示。

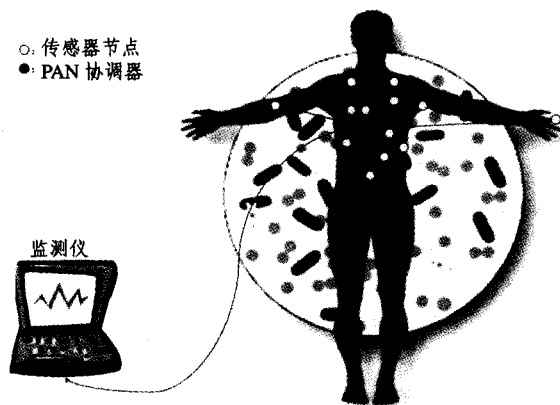


图1 PM-WPAN 拓扑结构示意图

3 基于 IEEE802.15.4 的人体生理信号监测无线个域网的设计

监测人体生理指标的传感器分布于人体的各个部位,信号传输系统以无线传输方式,满足信号的处理频率和精度,准确、实时、可靠而高效地将采集到的生理数据传输给数据处理终端。PM-WPAN 系统设计需要解决系统工作频段、网络拓扑结构、设备功能设定、系统的 MAC 机制等问题。

3.1 IEEE802.15.4 协议

低速率个域网 LR-WPAN(Low Rate-Wireless Personal Area Networks)协议 IEEE802.15.4^[3]支持简单的低功耗设备 0~10m 的范围内传输数据。该协议详细规范了物理层(Physical Layer, PHY)与媒体接入层(Medium Access Control, MAC)。IEEE 802.15.4 定义了 2.4GHz 物理层和 868/915MHz 物理层标准,分别提供 250kb/s、20kb/s 和 40kb/s 的传输速率。协议规定有两类不同的设备:全功能设备(full-function device, FFD)和简化功能设备(reduced-function device, RFD)。一个 FFD 设备能够和多个 RFD 设备或其他

FFD 设备直接通信,但一个 RFD 设备只能与一个 FFD 设备直接通信。根据应用需求,LR-WPAN 可以采用星型拓扑结构或对等网络拓扑结构。IEEE 802.15.4 标准规定了两种媒体访问机制,按是否使用时隙,分为无时隙 CSMA-CA(Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance 载波侦听多点接入/冲突避免)和时隙 CSMA-CA。后者采用网络协调器定义的超帧(Superframe)同步网络内数据传输。超帧分为活动部分和休眠部分。活动部分被分成 16 个相等大小的时隙,并由以下三部分组成:信标(Beacon)、竞争接入时期(Contention Access Period, CAP)、时分接入时期(Contention-Free Period, CFP)。信标由协调器发送,描述超帧并标识超帧的起始和结束。CAP 将紧接着信标开始,任何设备都可以在 CSMA-CA 机制下和其他设备进行竞争。

3.2 系统工作频段

IEEE 802.15.4 提供了三个工作频段。2.4GHz 是世界通用 ISM 频段,通过采用高阶调制技术能够提供 250kb/s 的传输速率,有助于获得更高的吞吐量、更小的通信时延和更短的工作周期,从而更加省电。根据生理监测信号的带宽要求,将本系统的工作频段定在 2.4GHz。

3.3 系统功能设备

基于星型拓扑结构的 PM-WPAN 设备由数个 RFD 和一个个域网协调器 PANCoor(PAN Coordinator)构成。生理信号采集传感器节点作为 RFD,使用最小限度的资源和内存容量,负责采集一个或多个生理传感器数据,并将数据发送到 PANCoor。传感器节点采用嵌入式系统开发技术,由微控制器控制信号检测模块和 IEEE 802.15.4 无线收发模块进行数据的采集和发送。

PANCoor 负责协调整个 PM-WPAN 的运行,收集各个传感器节点发送的数据。根据需要,对收集的数据进行在线分析处理,使用远程无线通信网络将数据发送至远程医学工作站或存储到大容量存储设备中。PANCoor 可采用 PDA、手机或其他可穿戴计算设备,并需要增加一个扩展接口与 IEEE 802.15.4 无线模块连接。

3.4 系统 MAC 机制

为了节省能耗,便于同步控制设备节点,PM-WPAN 采用信标使能的时隙 CSMA-CA,由 PANCoor 发送信标控制 RFD 节点发送数据。为了有效使用竞争机制,每个设备在开始发送数据或发现信道忙时,都应等待随机的退避周期,再尝试发送。并按照时隙 CSMA-CA 规定,设备的第一个退避周期的起始边界要和超帧时隙的起始边界对齐。

4 人体生理监测无线个域网性能评估

在网络仿真平台 NS2 的 IEEE 802.15.4 网络模拟协议类基础上,通过编写脚本程序,实现 PM-WPAN 的模拟运行,并对网络平均延迟、丢包率和吞吐量等网络性能进行统计分析,确定网络性能与传输负荷、节点数等参数的关系,为系统的实际应用提供相关依据。

在模拟网络场景设计中,根据 3.1 节人体生理传感器分布,合理均衡地布置了若干无线传输节点。每个传输节点负责采集传输邻近的一个或多个传感信号,发送到星型网络中的 PANCoor。在网络运行阶段,各个设备传输节点按照一定的帧长和发送间隔将数据包按照 IEEE 802.15.4 协议发送到中心节点。

4.1 网络吞吐量分析

由于无线通信本身的数据传输丢失以及 MAC 冲突,网络的吞吐量将小于实际的网络负荷。吞吐量和网络许多参数设置有

关,本节主要研究其与网络通信负荷以及节点数量的关系。

根据模拟运行数据,绘制网络吞吐量统计图。从图 2 可以看出,开始时随着负载的不断增大,网络吞吐量逐渐加大,但到了网络负载大约为 198.4kb/s 时,达到最高点,继续增加网络负载,吞吐量有所下降。因此在节点较少的网络中,负载流量 198.4kb/s 为系统的最佳负载流量。工作节点的数量也对网络吞吐量有很大影响,在网络负载流量小于 79.36kb/s 时,不同工作节点数量配置下,网络吞吐量上升的幅度几乎一样,但之后,随着节点数量的增大,由于 CSMA/CA 机制下的碰撞增多,网络吞吐量上升的幅度反而减小。图 3 显示了在相同网络负载的情况下,随着工作节点的增多,网络吞吐量相应减少的情况,在 13 个节点以下,两者基本成线性减少关系。图 4 绘制了网络吞吐量随时间的变化曲线,反映了网络动态传输性能。从图中可以观察到:随着网络工作节点的增加,吞吐量波动幅度加剧,这是因为负载流量的增加使网络中发送的数据包数量不断增加,但由于竞争机制等原因,更多的数据帧会在传输过程中丢失而导致网络丢包率增加,同时帧的丢失也是随机的,因此网络吞吐量表现出更大的波动和不稳定性。

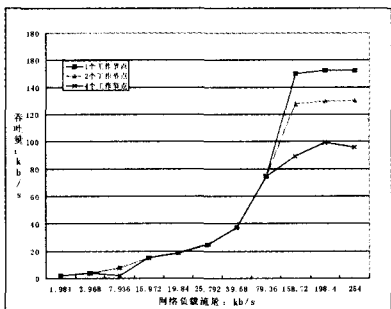


图 2 吞吐量变化图

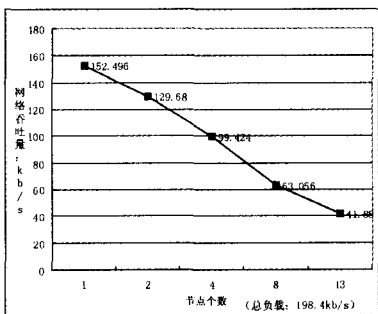


图 3 吞吐量随工作节点的变化曲线

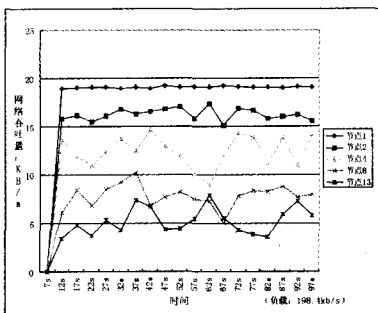


图 4 网络吞吐量动态变化图

根据以上仿真结果和本文 3.1 节的分析可以看出,PM-WPAN 可以满足基本生理信号传输吞吐量的需要,而且网络中节点数量不宜太大,可以采用多个传感器共用一个无线节

点的方法,以获得较高的网络吞吐量。

4.2 网络丢包率分析

无线传输固有的不稳定性以及信道竞争带来的碰撞都会导致数据的丢失。设定不同的工作节点的个数和不同的网络负载流量,进行网络模拟,通过统计 trace 文件记录的数据报发送和接收情况,进行数据包丢失的统计,绘制网络丢包率曲线,如图 5 和 6 所示。

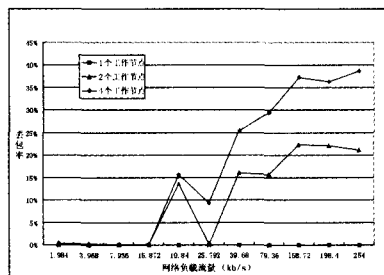


图 5 不同负载下丢包率统计

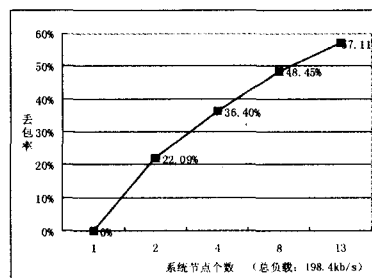


图 6 不同节点下丢包率统计

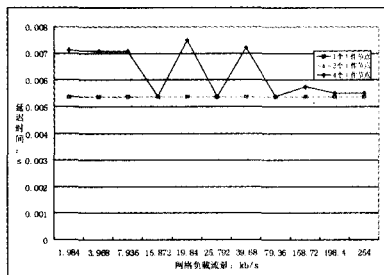


图 7 不同负载下的平均延迟时间

从图 5 中可以看出,当只有一个节点时,由于不考虑无线信道本身的传输不稳定,即使在负载接近网络最大容量时,丢包率依然为零。随着负载流量的增加,四个节点明显比两个节点网络丢包率增加快。为了进一步了解在这一流量下丢包率与系统工作节点之间的关系,在保持总负载流量不变的情况下,继续增加多个工作节点的观察系统的丢包率情况,如图 6 所示。可以看到在一定的网络负载流量(198.4kb/s)下,工作节点的增加使得系统丢包率基本成线性上升。

根据以上分析,在多个节点和较高网络负载的情况下,丢包不可避免。但在连续的生理监控应用中,允许一定的间歇式的数据丢失,因此 PM-WPAN 具有可行性。同时,减少网络节点数量可以大大降低丢包率。

4.3 网络延迟分析

IEEE802.15.4 时隙 CSMA-CA 机制规定,在节点媒体争用过程中,当节点每次退避周期结束,进行信道检测,如果信道空闲,则发送数据,如果媒体竞争失败(信道忙),即进入下一次退避周期。如果退避次数超过协议所规定的最大退避次

(下转第 57 页)

$$\left(1 - \frac{\binom{m-m_i}{m_A-m_i}}{\binom{m}{m_A}}\right) \overline{b_{up2}} + \sum_{i \in \xi_3} p_{uc}^{(A)} \left(1 - \frac{\binom{m-m_i}{m_A-m_i}}{\binom{m}{m_A}}\right) \overline{b_{up3}}$$

$$\frac{D_{up} n_p (1 - p_{uc}^{(A)}) + n_p - D_{up}}{n_p^2}$$

$$\left(-1 \frac{\binom{m-m_i}{m_A-m_i}}{\binom{m}{m_A}}\right) \overline{b_{up3}}$$

$$B_{p-d-2} = \sum_{i \in \eta_1} (1 - p_x^{(A)}) \overline{b_{up1}} + \sum_{i \in \eta_2} (1 - p_x^{(A)}) \overline{b_{up2}} + \sum_{i \in \eta_3} (1 - p_x^{(A)}) \overline{b_{up3}}$$

$$= \sum_{i \in \eta_1} \left(1 - \frac{D_{up} n_s (1 - p_x^{(A)}) + n_s - D_{up}}{n_s^2}\right) \overline{b_{up1}} + \sum_{i \in \eta_2} \left(1 - \frac{D_{up} n_s (1 - p_x^{(A)}) + n_s - D_{up}}{n_s^2}\right) \overline{b_{up2}} + \sum_{i \in \eta_3} \left(1 - \frac{D_{up} n_s (1 - p_x^{(A)}) + n_s - D_{up}}{n_s^2}\right) \overline{b_{up3}}$$

3.2.2 在域 j 出口的下载带宽

$$B_{s-d-j} = B_{s-d-j-1} + B_{s-d-j-2}$$

$$\text{其中, } B_{s-d-j-1} = \sum_{\gamma=1}^{N_{m-j}} \sum_{i \in \xi_2} p_{up}^{(\gamma)} \overline{b_{up2}} + \sum_{\gamma=1}^{N_{m-j}} \sum_{i \in \xi_3} p_{up}^{(\gamma)} \overline{b_{up3}}$$

$$B_{s-d-j-2} = \sum_{\gamma=1}^{N_{m-j}} \sum_{i \in \eta_2} (1 - p_x^{(\gamma)}) \overline{b_{up2}} + \sum_{\gamma=1}^{N_{m-j}} \sum_{i \in \eta_3} (1 - p_x^{(\gamma)}) \overline{b_{up3}}$$

3.2.3 在路由器出口的下载带宽

(上接第 54 页)

数,节点将以竞争失败结束本次发送。由于节点退避时间和数据发送的随机性,数据包发送延迟时间是不确定的。为了统计网络中各节点的平均延迟时间,现将网络中不同网络负载情况下系统工作节点的平均延迟数据统计绘制成延迟曲线,如图 7 所示。图 7 表明,在不同的网络实际负载流量下,网络的平均延迟时间小于 8ms,低于协议规定的延迟标准:15~30ms。因此,PM-WPAN 的数据延迟性能完全满足生理监护的需要。

结束语 由于无线生理监测系统可以在不影响被测者工作生活的情况下,全面准确地监测人体自然状态下的生理信号参数,提高医学诊断的准确性,而日益受到人们的重视。基于 IEEE802.15.4 的低速率个域网由于其本身在传输范围、功耗、传输速率和价格等方面的性能,非常适合用来构建人体生理监测系统的无线传输网络。本文探讨了基本人体生理传感器的数据传输特性和放置部位,由此设计了无线传输网络工作频段、拓扑结构、节点功能及传输机制。人体生理监测需要稳定可靠的网络传输,为了确切地提高网络效率,把握网络性能,通过网络仿真实验,对网络吞吐量、丢包率和传输平均延迟时间等性能进行了评估,从而对实际系统的开发和设计起指导作用。

参考文献

1 Townsend K, Haslett J W, Tsang T, et al. Recent advances and

$$B_{r-d} = B_{r-d-1} + B_{r-d-2}$$

$$\text{其中, } B_{r-d-1} = \sum_{\gamma=1}^{N_m} \sum_{i \in \xi_3} p_{up}^{(\gamma)} \overline{b_{up3}}$$

$$B_{r-d-2} = \sum_{\gamma=1}^{N_m} \sum_{i \in \eta_3} (1 - p_x^{(\gamma)}) \overline{b_{up3}}$$

结论 随着 BT 类型的 P2P 软件的不断广泛使用, BT 流量占用了大量的带宽资源,研究 BT 的带宽模型就显得相当重要。本文对 BT 网络中的 Peer 行为进行了细致的分析,并建立了相关的文件片段模型、感兴趣与阻塞模型,对邻居 Peer 之间的感兴趣概率、阻塞概率以及上传的发生概率做了分析。利用这些模型及概率表达式,推导出 BT 的带宽模型。

参考文献

1 Parker A. The true picture of Peer-to-Peer file sharing[EB/OL]. 2004. <http://www.cachelogic.com>

2 Saroiu S, Gummadi P K, Gribble S D. A Measurement Study of Peer-to-Peer File Sharing Systems. Multimedia Computing and Networking 2002 (MMCN '02)

3 Sen S, Wang J. Analyzing Peer-to-Peer Traffic Across Large Networks. ACM / IEEE Transactions on Networking, 2004, 12(2): 137~150

4 李江涛, 雷振明. P2P 网络性能测度及监测系统模型[J]. 北京邮电大学学报, 2006, 29(3): 17~21

5 Cohen B. BitTorrent Protocol Specification [EB/OL]. <http://www.bittorrent.com/protocol.html>

future trends in low power wireless systems for medical applications. In: 5th IEEE Int. Workshop on System-on-Chip for Real-Time Applications, Banff, Alberta, June 2004. 476~481

2 Ooi P, Culjak G, Lawrence E. Wireless and wearable overview: stages of growth theory in medical technology applications. In: Proceedings of the International Conference on Mobile Business (ICMB'05), July 2005. 528~536

3 IEEE 802.15.4, Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs). New York, NY: IEEE, October 2003

4 Lee J S. An experiment on performance study of IEEE 802.15.4 wireless networks. In: Proc. IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, Catania, Italy, Sept. 2005, 2: 451~458

5 Golmie N, Cypher D, Rébala O. Performance analysis of low rate wireless technologies for medical applications. Computer Communications, 2005, 28(10): 1255~1275

6 Timmons N F, Scanlon W G. Analysis of the performance of IEEE 802.15.4 for medical sensor body area networking. In: Proc. IEEE Int Conf Sensor and Ad Hoc Communications and Networks (secon'04), Santa Clara, CA, October 2004. 16~24

7 Jaleleddine S M S, Hutchens C G, Strattan R D, et al. ECG data compression techniques - A unified approach. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 1990, 37(4): 329~343