

## Design of Wearable Dynamic Sleeping Respiration Monitoring System \*

WU Dan<sup>1,2</sup>, XU Xiaowen<sup>1</sup>, WANG Lei<sup>2\*</sup>, JIN Xingliang<sup>1</sup>

(1. School of Info-physics and Geomatics Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;  
2. Shenzhen Institute of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen Guangdong 518055, China)

**Abstract:** This paper presents a wearable device for continuous monitoring of respiratory signal. The system took advantages of a proven respiratory inductive plethysmograph (RIP) technology and a wireless body sensor networks (BSN) development platform. The textile RIP sensor was integrated into a suit and comfortably worn around thorax or abdomen for monitoring respiration during sleep. An intelligent signal processing algorithm was implemented for extracting the dynamic respiration and motion information. In-situ experiments from ten healthy subjects suggested that this system worked as intended and measured accurately. Due to the high reliability and low cost of this system it is believed to meet the future demands on home-based monitoring for diagnosis of sleep disorder-related diseases.

**Key words:** sleeping respiration monitoring; home healthy; wearable; RIP; BSN

**EEACC:** E7230J

## 穿戴式动态睡眠呼吸监测系统的设计 \*

吴 丹<sup>1,2</sup>, 徐效文<sup>1</sup>, 王 磊<sup>2\*</sup>, 金星亮<sup>1</sup>

(1. 中南大学信息物理工程学院, 长沙 410083; 2. 中科院深圳先进技术研究院, 广东 深圳 518055)

**摘 要:** 本系统基于数字呼吸感应体积描记技术 (RIP) 和人体传感网络 (BSN) 开发平台, 将织物传感器整合到衣物中, 设计了穿戴式的睡眠呼吸监测系统, 可以实现实时胸、腹呼吸监测。系统中的信号处理算法可以对信号质量进行评估, 并提取出动态呼吸率和运动等信息。通过对 10 位测试者进行整夜的睡眠呼吸监测实验, 并且和 Biopac 生理记录仪的结果进行对比分析, 证明了本系统测量准确、工作稳定。由于其成本低, 未来可以应用于家庭中进行睡眠呼吸疾病的监测。

**关键词:** 睡眠呼吸监测; 家庭保健; 穿戴式; 呼吸感应体积描记技术 (RIP); 人体传感网络 (BSN)

**中图分类号:** TP212.3; TP212.9      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1004-1699(2010)03-0322-04

近年来, 随着人们健康意识和保健要求的增强, 可以广泛应用于家庭的新型监护设备受到越来越多的关注<sup>[1]</sup>。同时穿戴式技术<sup>[1]</sup>和人体传感网络<sup>[2]</sup>的飞速发展, 为这种家庭中的慢性疾病监测与诊断提供了一个良好的实现平台。病人可以在家中进行长时的监测, 不仅减少了因在医院治疗而带来的巨大心理压力和传感器电极、导线带来的活动不便, 而且达到了慢性疾病早诊断早治疗的目的。

呼吸是生理监测中的一个重要参数, 能够对其进行非接触、动态的监测, 在睡眠疾病诊断、临床监护、心血管系统的反馈调节等各个研究领域都有其重要的研究价值<sup>[3]</sup>。到目前为止, 对睡眠呼吸监测的常见方法有压力法<sup>[3]</sup>和温感法<sup>[4]</sup>。压力法因其

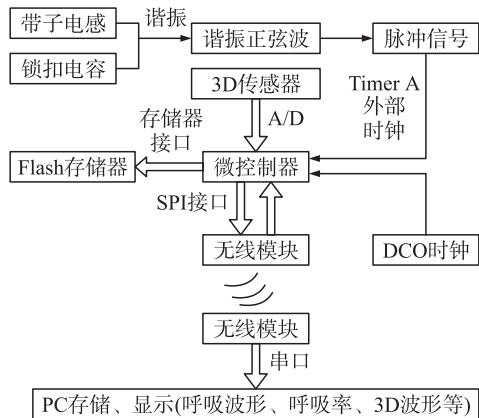
灵敏度过高而容易受各种因素的干扰, 而温感法利用放置在口腔或鼻腔处的温度传感器来获取呼吸信号, 由于传感器要和人体皮肤接触往往会给病人带来不适。除此之外, 其他间接的呼吸监测方法, 如多普勒雷达测呼吸<sup>[5]</sup>和 ECG 提取呼吸信号<sup>[6]</sup>, 都需要先用特定的传感器监测其他参数, 而且在测量精度上还难以满足要求。

呼吸感应体积描记技术 (RIP)<sup>[7]</sup>具有良好的测量精度, 本文将这种技术用数字化方法来实现<sup>[8]</sup>, 并且与人体传感网络节点相结合, 设计了无线动态监测呼吸的穿戴式仪器。相对于传统的 RIP<sup>[7]</sup>来说, 数字 RIP 抗干扰能力强, 硬件设计大大简化, 它可以监测睡眠中的呼吸的节律、呼吸模式及呼吸深

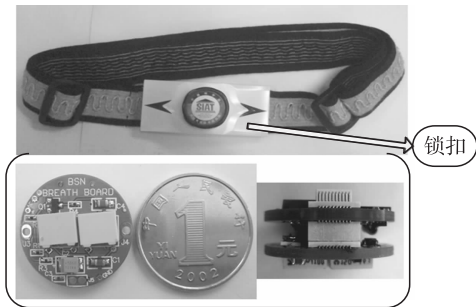
度等,也可以用于呼吸反馈来调节心血管参数。

### 1 系统

本系统包括可缝在衣物上或作为腰带的传感带子、内含堆叠式电路模块的锁扣,以及进行无线数据接收和 PC 机通信的基站等。图 1 描述了整个系统的原理框图和带子的连接图及内部的电路模块。



(a)系统的原理框图



(b)带子连接图及内部的电路模块

图 1

对于长时监测生理信号,能够设计一种不影响人体正常活动,无负担,无不适感的传感器就显得尤为重要<sup>[9]</sup>。本文中传感器是缝入到弹性织物带子(或缝在上衣上)中的一根缠绕成“U”型的导线。导线本身具有很强的伸缩性,重复使用不会变形。这条传感带子,随着人体呼吸时胸腹腔容积的变化而自然拉伸收缩,导线的电感也会随之改变,具有较高的敏感性,可以描记出可靠的呼吸曲线。图 2 反映了带子拉伸与电感变化之间的关系,表现出了良好的线性特性,每拉伸 1 厘米,带子电感变化约为 6.6 nH, ( $R^2 = 0.96$ ),初始状态下电感的大小的是 2.9  $\mu$ H。

呼吸传感器板包括 DC/DC 升压电路、谐振电路和波形转换电路三个部分。低功耗的 DC/DC 电源转换芯片 (TPS61040) 用于电路中进行升压,为谐振电路提供电源。带子中的电感与锁扣中的电容构成

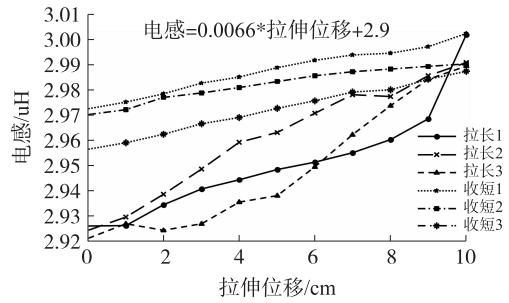


图 2 带子拉伸长度与电感变化之间的关系

带子缓慢拉伸到 10 cm 长度然后再收缩回去,每变化 1 cm 记录一次数值,重复实验 3 次,表明了带子本身存在一定的滞回特性

了一个电容反馈式的 LC 谐振电路,为了减少温度漂移,提高谐振稳定性,本设计选用的是 TPC 校正电容,其具有较小的容差和很好的温度特性,适用于谐振电路。随着呼吸过程中胸腹腔容积的变化,谐振频率和谐振电压均会发生变化,如公式

$$f_0 \approx \frac{1}{2\pi \sqrt{L \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}}}$$

电路中两个电容的等效电容约为 60 nF,与变化的电感产生中心谐振频率在 380 kHz 的正弦波。波形转换电路 (LM393) 将谐振的正弦波转换为方波,送入单片机,计算正弦波的频率,再将频率信号转化为呼吸信号。

同时,我们开发了 BSN 节点板<sup>[10]</sup>,它与呼吸传感器板具有相同的直径 23 mm,并且通过一个 20 脚的插件堆叠在一起,作为一个整体放置在中心锁扣中。BSN 节点板上采用超低功耗的微处理器 (MSP430F2418) 进行数据采集、处理、存储和无线发送。在供电方面,采用 3.3 V 的锂电池。

在信号处理方面,本系统建立了一个对信号质量评判的机制,对于受运动伪迹和无线传输丢包影响的数据进行选择性的舍弃。这样可以极大减少信号处理时间也可以保证有用信号的完整性。经过信号质量的评判后,我们可以根据原始信号提取出呼吸率等一些有用参数。

### 2 结果

为了验证硬件平台的稳定性和可靠性,我们做了一系列的测试实验,证明了系统各部分工作正常,并且无线传输相当可靠。表 1 列出了硬件模块的一些重要参数。

表 1 硬件模块的相关参数列表

参数	数值
PCB 大小(直径)	23 mm
最大功耗	140 mW
无线传输距离	20 m
带子中静态电流	0.025 $\mu$ A
频率测量精度	6 Hz
谐振中心频率	380 kHz
无拉伸状态带子电感	2.9 $\mu$ H
带子电阻	2.9 $\Omega$
带子电容	60 nF

为了验证整套系统的性能,我们对 10 名测试者(24  $\pm$  2 岁)进行了睡眠期的在体呼吸实验。测试者在胸部或者腹部同时戴着本文设计的传感带子和作为参考的呼吸传感器,躺在床上正常休息进行测试。我们对每位测试者采集了至少 5 h 的实验数据。

在实验过程中,我们采用 Biopac 公司的 TD201 型压电原理的呼吸传感器作为参考,同时利用 Biopac 公司的 MP150 型生理记录仪进行数据采集。图 3 描绘了通过 RIP 技术和 Biopac 压电原理两种方法得到的呼吸信号计算的呼吸率的对比曲线的一部分。采用下面公式计算出的相对平均误差  $\alpha$  约为 15 %。

$$\alpha = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L \frac{|R_i - B_i|}{B_i}$$

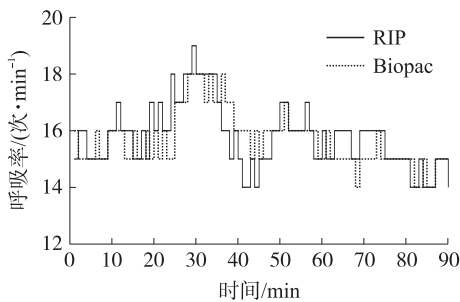


图 3 两种方法采集的呼吸数据比较

图 4 描述了原始的呼吸信号以及处理结果。利用一维小波包来实现信号的去噪,呼吸曲线更加平滑,高频部分得到了有效的滤除。

图 5 记录了 6 小时的动态呼吸率监测结果。受干扰严重的数据省去了进一步的信号处理而直接被筛除。

图 6 中灰色柱状表示了每位测试者通过阈值判断出的有效数据占其全部数据的百分比,图中的虚线所示数值 82.7 % 表示 10 位测试者中有用数据所占的百分比的平均值,数据的有效利用率完全可以满足呼吸监测的要求。

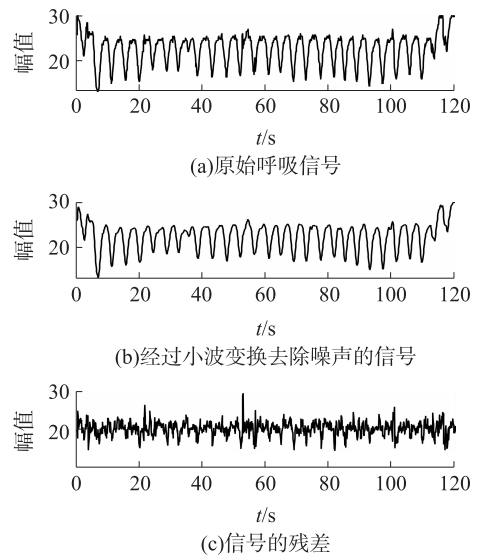


图 4 信号处理过程

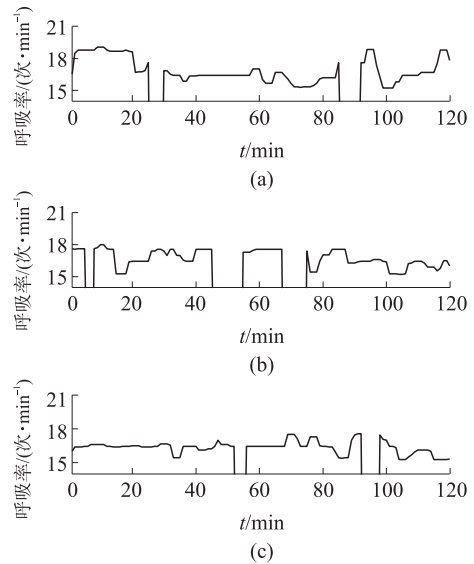


图 5 一位测试者睡眠期 6 h 的呼吸率变化曲线  
每个小图是 2 h 的数据,质量差的数据已经根据评判规则进行筛除

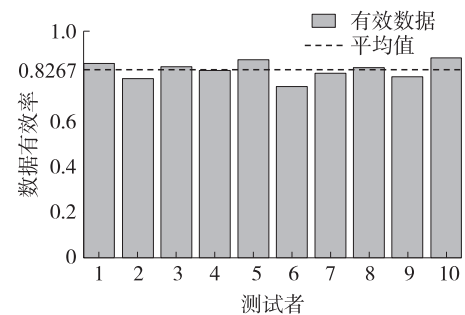


图 6 对十位测试者进行整夜监测的有效数据的百分比

### 3 结论

本文提出了可用于动态睡眠呼吸监测的穿戴式系统。此系统采用高敏感性的 RIP 织物传感器进行

信号的采集,人体传感网络节点中的单片机进行数字计频,相对于传统的模拟电路调幅检波的方法具有较高的精度和抗干扰能力,硬件上大大简化。在体实验的结果也证明了系统工作正常,性能良好。

本系统可以在不影响正常睡眠和生活的前提下,用于睡眠中的呼吸监测,具有操作简单、低负荷的特点,对睡眠紊乱、阻塞性睡眠呼吸暂停等疾病<sup>[11]</sup>有一定的监视作用,可以广泛应用于未来家庭的健康保健。今后,我们将主要针对具有睡眠呼吸疾病的病人进行在体实验和研究,并且在电路和信号处理的算法上进行改进。

### 参考文献:

- [1] 滕晓菲,张元亨. 移动医疗:穿戴式医疗仪器的发展趋势[J]. 中国医疗器械杂志,2006,30(5):330-340.
- [2] Yang G Z. Body Sensor Networks[M]. Springer, 2006: 22-24.
- [3] 席涛,杨国胜,汤池. 呼吸信号检测技术的研究进展[J]. 医疗卫生装备,2004(12):26-29.
- [4] 彭思,陈淑铃,宋爱国,等. 用于呼吸暂停综合症的呼吸监测系统研制[J]. 传感技术学报,2008,21(8):1325-1328.
- [5] Lohman B, Boric-Lubecke O, Lubecke V M, et al. A Digital Signal Processor for Doppler Radar Sensing of Vital Signs[J]. IEEE Engineering in Medicine and Biology, September/October 2002: 161-164.
- [6] Bowers E J, Murray A, Langley P. Respiratory Rate Derived from Principal Component Analysis of Single Lead Electrocardiogram [J]. Computers in Cardiology, 2008(35): 437-440.
- [7] 张政波,俞梦孙,李若新,等. 背心式呼吸感应体积描记系统设计[J]. 航天医学与医学工程,2006,19(5):377-381.
- [8] 张政波,王卫东,吴昊,等. 全数字呼吸感应体积描记技术[J]. 中国医疗器械杂志,2007,31(3):179-181.
- [9] Yang C M, Huang W T, Yang T L, et al. Textiles Digital Sensors for Detecting Breathing Frequency[C]//Proceeding of the 5th International Workshop on Wearable and implantable BSN, HK-SAR, China, Jun 2008: 276-279.
- [10] Wang B, Wang L, Huang B Y, et al. A Body Sensor Networks Development Platform for Pervasive Healthcare[C]//Proceeding of the 3rd International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering, Beijing, 2009: 1-4.
- [11] 叶志前,郑涛,裘利坚. 睡眠监护技术的发展[J]. 国外医学生物医学工程分册,2003,26(6):244-248.



吴丹(1984-),女,中南大学硕士生,中科院深圳先进技术研究院客座研究生,主要研究方向为穿戴式智能仪器设计与信号处理,jessie26-100@163.com;



徐效文(1978-),男,博士,中南大学副教授,主要研究方向为光电检测与成像、生物医学信号检测与处理,xuxiaowencn@163.com;



王磊(1973-),男,博士,中科院深圳先进技术研究院副研究员,主要研究方向为人体传感器网络,低功耗医学集成电路芯片设计,wang.lei@siat.ac.cn;



金星亮(1985-),男,中南大学在读硕士研究生,主要研究方向为传感器与智能仪器,jinxingliang8888@163.com。