

耳塞式光学心率测量

Christoph Kämmerer
ADI公司现场应用工程师

传感器技术的进步改变了人们诊断其生命体征和健康的方式与地点。便携式非侵入测量技术可以在我们的日常生活中进行快速简单的测量。不过，尽管这种诊断技术在健身行业中已经非常流行，但其精度有限，这个问题直到最近才被解决。

健身追踪器可以测量心率和生命体征以帮助用户设定日常锻炼活动。健身追踪器通常内置运动传感器，可以检测运动模式以帮助区分步行、跑步与游泳，因此它也可以用作计步器。为在日常生活中提供舒适和便利，测量通常在手腕上进行，因为传感器可以放置在手表、珠宝和腕带等配饰中。但是，此位置对测量质量而言并非最佳。心率检测会受到运动伪像的限制而难以进行，因为肌肉质量相对较大，会限制与动脉的接触。

相比之下，耳朵更适合进行光学心率测量。耳垂已被医学专家用于测量血氧水平。但到目前为止，这尚未在消费者层面上得到充分利用，因为基于耳朵的测量设备受空间限制，并且功耗非常高，需要大电池。但随着高集成度、更低功耗芯片的推出，ADI公司已开发出解决这些问题的解决方案。现在可以将有效运作的生命体征测量器件集成到典型的入耳式耳机中。响应度的改进开辟了全新的应用领域和可能性。本文介绍并评估了该系统。

基础测量方法是光学性的。测量使用来自最多三个LED的短脉冲信号。LED电流最高可达370 mA，最小脉冲宽度为1 μ s。LED的最佳波长根据测量位置和测量方法来选择。手腕上只能测量表面动脉，故而选择绿光，耳朵则不同，可以使用红外光，从而获得更大的穿透深度和更高的SNR。光电二极管（其探测面积与其响应度直接相关）用于测量反射光。因此，它会同时测量信号和背景噪声。下游模拟前端提供更高的SNR。它用作信号滤波器，将检测到的电流转换为电压，进而转换为数字形式。除反射测量外，算法还包括用于通过加速度计滤除运动伪像的校正。

组成测量系统的器件说明如下。ADI公司的ADPD144RI芯片用作模拟前端，它还集成了光电二极管和LED。测量由三轴加速度计提供支持，该三轴加速度计不仅用于识别步态和运动，还用于去除伪像。本例中使用ADXL362。整个过程由ADuCM3029微控制器控制，该微控制器用作各种传感器的接口并包含算法。



图1. 集成光学传感器和加速度计的测试系统，刻度尺用于比较。

图1显示了该测试系统，常规耳塞中同时容纳了光学传感器和加速度计。已采取措施将ADC采样率限制在100 Hz并最小化LED强度，以尽可能降低功耗。

为了对系统特性进行表征，针对不同的运动模式考虑了五种不同的场景。评估仅使用光学信号，这样就能知道脉冲测量不准确性出现在哪些场景中，以及何时需要加速度计数据来提高脉冲测量的精度。场景涵盖以下运动顺序：

- ▶ 站着不动
- ▶ 站着不动并咀嚼
- ▶ 在办公桌前工作
- ▶ 步行
- ▶ 跑步和跳跃

测试场景1

站着不动

图2为幅度与采样速率的关系图，显示了原始数据的频谱。随着时间推移，脉搏可通过峰值来识别。在没有运动的情况下，信号非常清晰，心率可通过峰值位置和已知的采样速率来确定。

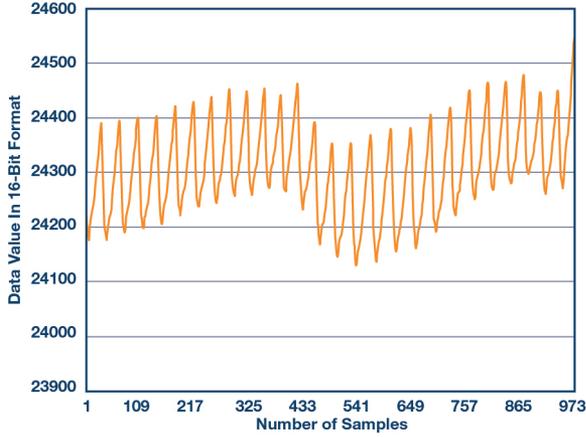


图2. 测量幅度过采样率以提供有关心率的信息

光学传感器用两种LED颜色——红外和红光——记录心率，每种颜色有四个通道。这样就可以通过两种不同颜色的通道来区分测量，并且可以选择更稳健的版本。各种通道的信号如图3A所示。利用六个通道可以识别出非常明确的信号，同时两个通道饱和。为了获得更强和更稳健的信号，算法会添加相应的不饱和通道并计算心率。图3B显示了红光通道（顶部）和红外通道（底部）的心率，同时借助色标显示了测量的置信度。图中还给出了心率的倍数，由此可以通过采样速率和置信度指示来区分原始信号（虚线）。

总之，在没有运动的情况下，信号很强且没有阻碍噪声，因此算法能以高可信度确定心率。来自红外通道的信号强于来自红光通道的信号。

测试场景2

站着不动并咀嚼

场景2引入了额外的咀嚼动作。记录的频谱如图4所示。与测试场景1不同，这里可以清楚地看到运动伪像，其在信号中表现为跳跃。它们在通道总和中也变得清晰，不再表现出如此明显的速率。然而，算法还是能够在没有运动传感器额外帮助的情况下以高置信度正确地确定心率。有意思的是，红外信号强度再次大于红光通道的信号强度。

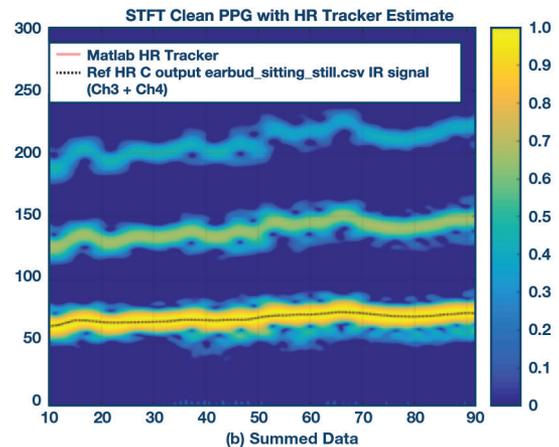
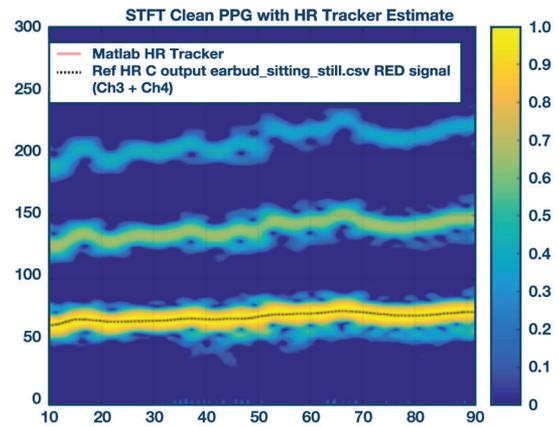


图3. 红色区域（顶部）显示站着不动情况的四通道测量，而红外区域（底部）显示原始数据和加总数据。心率（黑线）可以由算法通过加总数据确定，色标指示置信度。

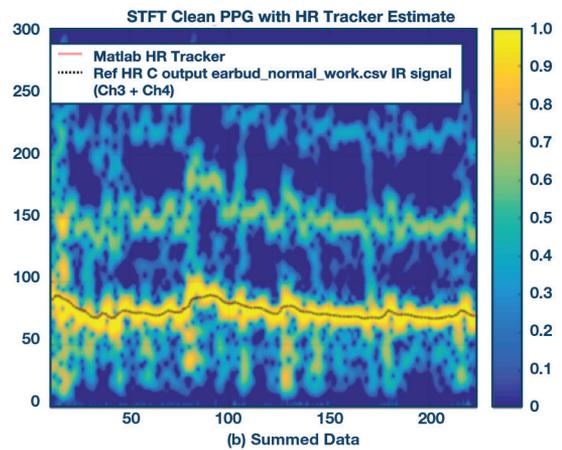
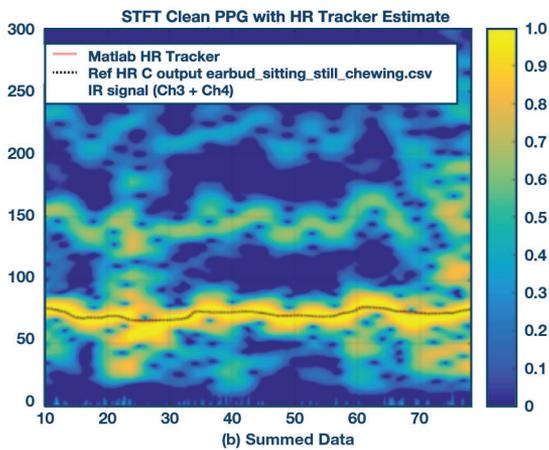
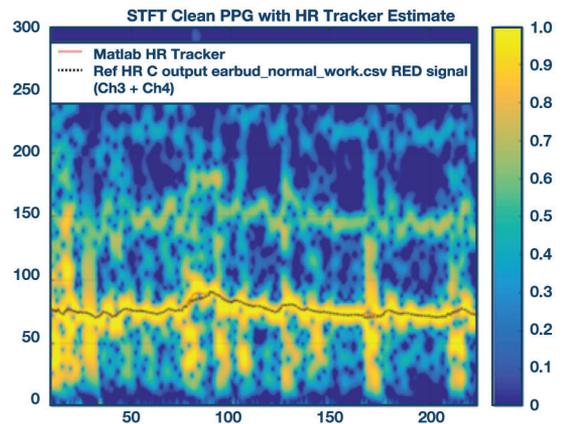
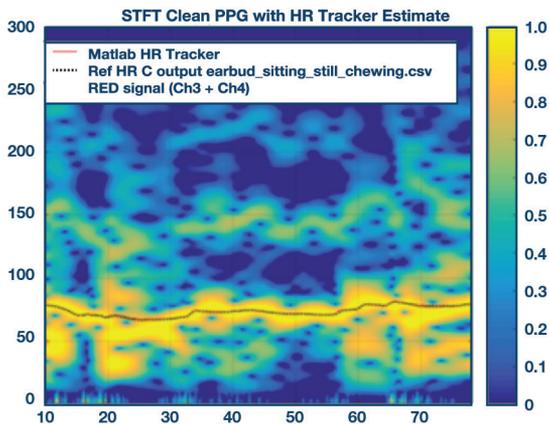
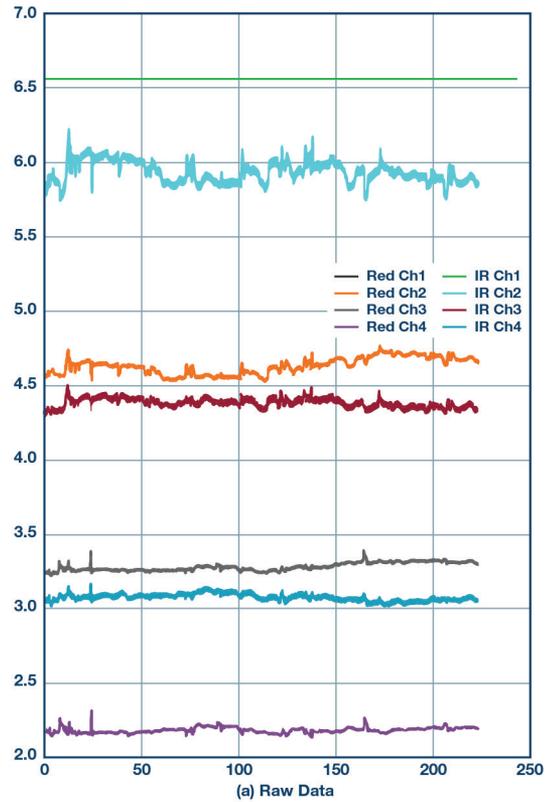
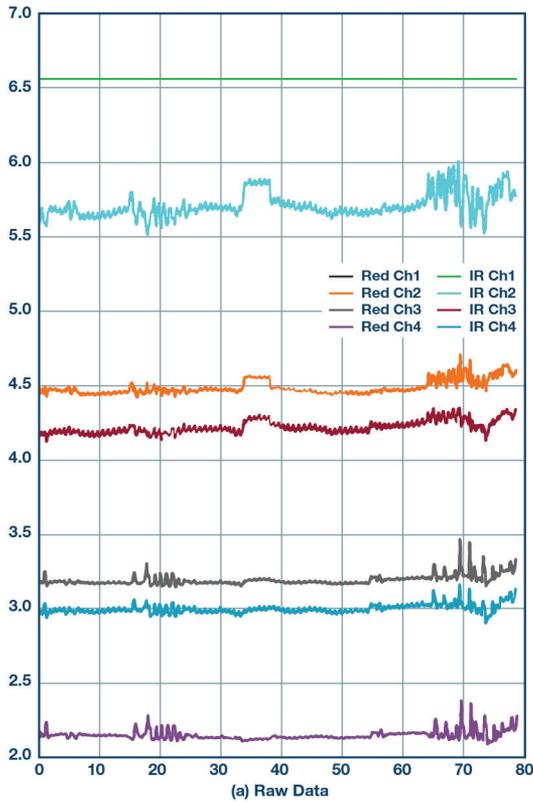


图4. 红色区域 (顶部) 显示站着不动并咀嚼情况的四通道测量, 而红外区域 (底部) 显示原始数据和加总数据。心率 (黑线) 可以由算法通过加总数据确定, 色标指示置信度。心率可以在没有加速度计的情况下予以确定。

图5. 红色区域 (顶部) 显示在办公桌前工作情况的四通道测量, 而红外区域 (底部) 显示原始数据和加总数据。心率 (黑线) 可以由算法通过加总数据确定, 色标指示置信度。心率可以在没有加速度计的情况下予以确定。

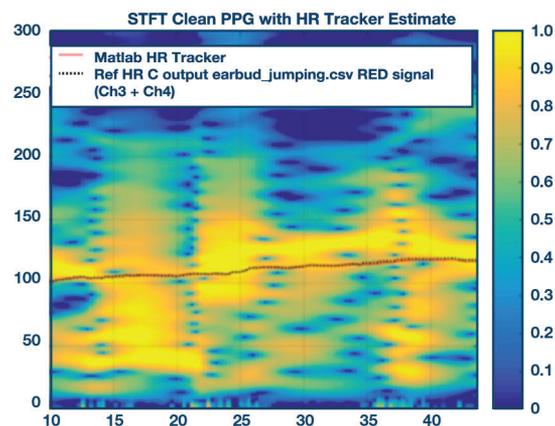
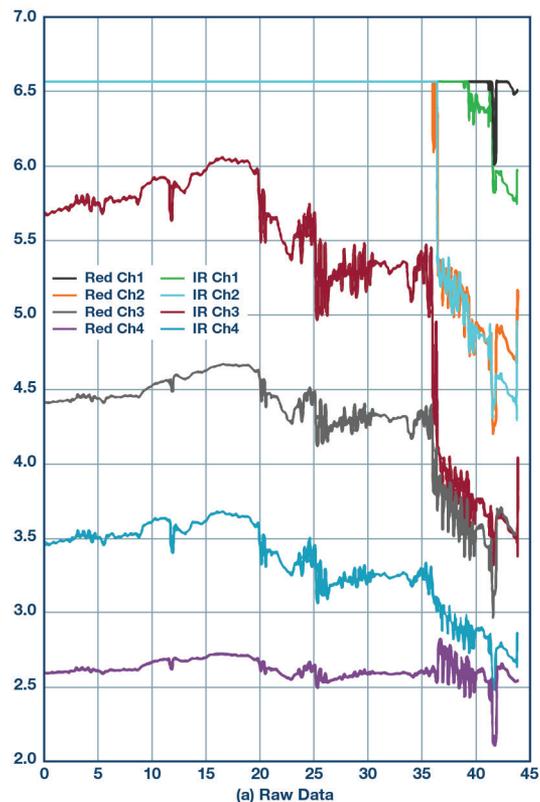
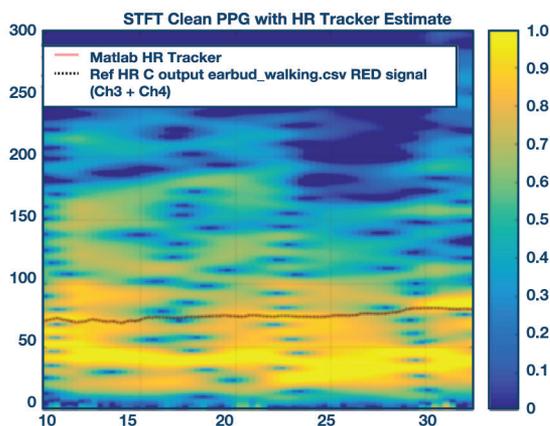
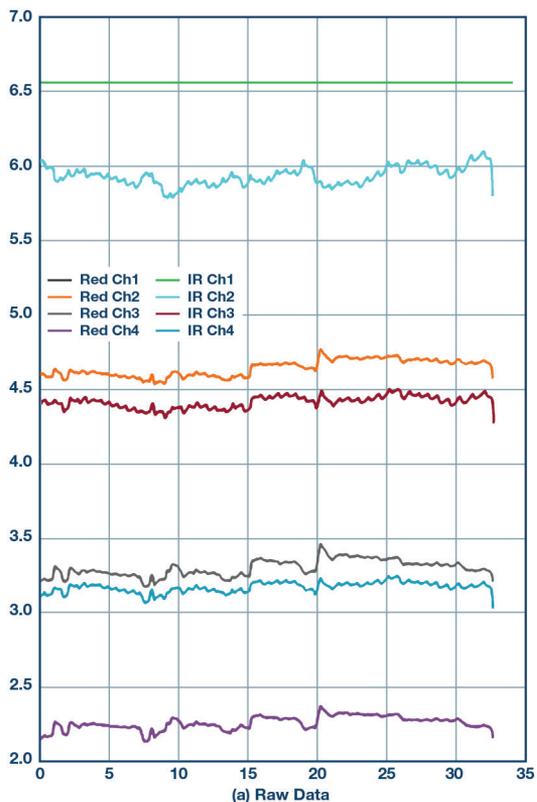


图6. 红色区域（顶部）显示步行情况的四通道测量，而红外区域（底部）显示原始数据和加总数据。心率（黑线）可以由算法通过加总数据确定，色标指示置信度。对于红外情况，心率可以在没有加速度计的情况下予以确定。

图7. 红色区域（顶部）显示跑跳情况的四通道测量，而红外区域（底部）显示原始数据和加总数据。心率（黑线）可以由算法通过加总数据确定，色标指示置信度。没有加速度计很难确定心率。

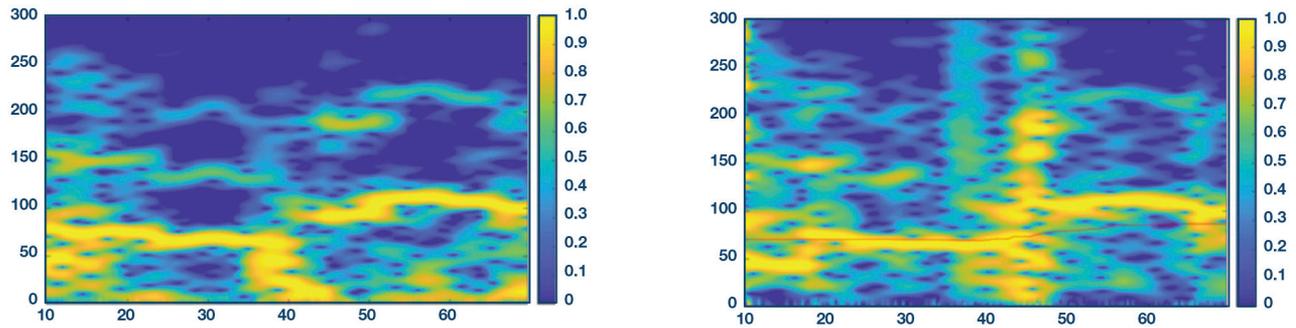


图8. 无加速度计数据(左)和有加速度计数据(右)的加权频谱比较。利用加速度计可以重建用户的心率。

测试场景3

在办公桌前工作

场景3中测试了另一种日常情况。测试人员坐在桌子前进行一些正常工作以及相关的动作。与场景2类似,可以检测到运动伪像,由此算法可以识别两个通道中的心率。从图5中可以看出,红外信号在这里同样占主导地位。

测试场景4

步行

先前的场景关注的是静止测量情况,但在本场景中,测试人员以低速(大约每分钟50步)沿一个方向均匀移动。如图6所示,PPG信号中混合了心率与步伐,各种声道的总和显示的信号非常模糊。虽然在红光信号场中无法计算明确的心率,但算法在红外信号中找到一个拟合的心率。然而,由于波动很大和矩阵的置信度很低,来自加速度计的附加运动数据将非常有用,特别是因为到目前为止,测量仅在较低步行速度下进行。

测试场景5

跑步和跳跃

场景5不是测量均匀运动,而是短跑和跳跃以一定的间隔交替进行。现在可以非常清楚地识别运动伪像,算法很难隔离出正确的心率,如图7所示。需要运动传感器提供支持似乎是不可避免的。

为了更好地评估对运动传感器的需求,场景5测试了使用和不使用加速度计两种情况下的测量技术。图8显示了无校正加速度计数据(左)和有校正加速度计数据(右)的加权频谱的比较。在识别心率时可以看到信号明显改善,如果没有加速度计的支持,这是不可能的。

从测试案例中可以得出结论,在大多数情况下,心率可以利用耳塞中集成的传感器非常精确地加以确定。在局部或慢速平移

运动的情况下,心率甚至可以在不使用加速度计数据的情况下加以确定。然而,在突然和快速运动的极限情况下,与运动校正数据进行比较也能释读数据。在所有情况下,红外信号均强于红光信号。

与手腕测量相比,耳朵中的信号更强,因此测量精度可以达到更高水平。此外,使用红光或红外光可以测量血氧水平。

结论

总之,功能测试系统也已证明,耳朵测量非常有前途。测量装置也可以通过更好的机械集成来改进,并加以扩展来实现额外的测量。这样,加速度计还可用于跌倒检测和步态识别,从而为客户创造更多价值。

作者简介

自2015年2月至今,Christoph Kämmerer一直在德国ADI公司任职。他于2014年毕业于埃尔朗根-纽伦堡大学,获得物理学硕士学位。第二年,他曾在利默里克市ADI公司担任工艺开发实习生。2016年12月完成现场应用工程师培训生项目后,他正式成为ADI公司员工,专门研究新兴应用领域。联系方式:christoph.kaemmerer@analog.com。

在线支持社区



访问ADI在线支持社区,中文技术论坛
与ADI技术专家互动。提出您的棘手设计问题、浏览常见问题解答,或参与讨论。

请访问ez.analog.com/cn

全球总部
One Technology Way
P.O. Box 9106, Norwood, MA
02062-9106 U.S.A.
Tel: (1 781) 329 4700
Fax: (1 781) 461 3113

大中华区总部
上海市浦东新区张江高科技园区
祖冲之路2290号展想广场5楼
邮编:201203
电话:(86 21) 2320 8000
传真:(86 21) 2320 8222

深圳分公司
深圳市福田中心区
益田路与福华三路交汇处
深圳国际商会中心
4205-4210室
邮编:518048
电话:(86 755) 8202 3200
传真:(86 755) 8202 3222

北京分公司
北京市海淀区西小口路66号
中关村东升科技园
B-6号楼A座一层
邮编:100191
电话:(86 10) 5987 1000
传真:(86 10) 6298 3574

武汉分公司
湖北省武汉市东湖高新区
珞瑜路889号光谷国际广场
写字楼B座2403-2405室
邮编:430073
电话:(86 27) 8715 9968
传真:(86 27) 8715 9931

©2019 Analog Devices, Inc. All rights reserved. Trademarks and registered trademarks are the property of their respective owners. Ahead of What's Possible is a trademark of Analog Devices. TA21072sc-4/19



analog.com/cn

ANALOG DEVICES
超越一切可能™