

文章编号:1001-5078(2024)10-1607-06

· 光电技术与系统 ·

高采样率近红外光谱成像系统的调制解调方法

刘明翰, 李春光, 赵勇健, 王馨莹, 王建伟, 闫伟
(苏州大学 机电工程学院, 江苏 苏州 215131)

摘要:为解决目前在国内外便携式近红外光谱成像系统(fNIRS)检测设备便携性差与采样率低的问题。提出了基于FPGA的近红外光谱成像系统调制解调方法。首先,基于FPGA实现光源驱动信号的“频分-时分复用”调制,单光源多波长之间进行频分,多光源之间进行时分,提高采样频率(频分)的同时兼顾系统体积(时分)大小;其次,基于FPGA实现探测信号的嵌入式数字解调与数字滤波,以便于直接基于嵌入式系统解算血氧信号并进行嵌入式应用。相比于当前的便携式脑血氧采集设备,基于FPGA实现嵌入式近红外光谱成像系统的设计与开发,提高采样率的同时,降低对FPGA的要求,减小体积增加便携性,基于FPGA的信号解调为实现嵌入式应用奠定重要基础,有望适用于更多的应用场景。

关键词:近红外脑功能成像;高采样率;调制解调;嵌入式

中图分类号:TN247;TP391.41 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2024.10.015

Modulation and demodulation method of functional near-infrared spectroscopy system with high sampling rate

LIU Ming-han, LI Chun-guang, ZHAO Yong-jian, WANG Xin-ying, WANG Jian-wei, YAN Wei
(School of Mechanical and Electric Engineering, Soochow University, Suzhou 215131, China)

Abstract: In order to solve the current problem of poor portability and low sampling rate of wearable functional near-infrared spectroscopy (fNIRS) detection equipment at home and abroad, a modulation and demodulation method of fNIRS based on FPGA is proposed in this paper. Firstly, the "frequency division-time division multiplexing" modulation of the light source driving signal is realized based on FPGA, and the frequency division is carried out between multiple wavelengths of a single light source, and the time division is carried out between multiple light sources, so as to improve the sampling frequency (frequency division) while taking into account the size of the system volume (time division). Secondly, the embedded digital demodulation and digital filtering of the detection signal is realized based on FPGA, so as to facilitate the interpretation of the blood oxygen signal and embedded application directly based on the embedded system. Compared with the current portable cerebral oximetry acquisition equipment, the design and development of FPGA-based embedded near-infrared spectroscopic imaging system improves the sampling rate, decreases the requirements for FPGAs, and reduces the size to increase portability. FPGA-based signal demodulation lays an important foundation for the implementation of embedded applications and is expected to be suitable for more application scenarios.

Keywords: near infrared imaging; high sampling rate; modulation and demodulation; embedded

基金项目:国家自然科学基金面上项目(No. 62073228)资助。

作者简介:刘明翰(1998-),男,硕士研究生,研究方向为脑成像系统研发与疲劳信号识别。E-mail: Z1171405435@163.com

通讯作者:李春光(1982-),女,教授,研究方向为人体意图解码与脑成像系统研发。E-mail: lichunguang@suda.edu.cn

收稿日期:2023-12-14; **修订日期:**2024-01-09

1 引言

功能近红外光谱用于测量人脑功能活动测量穿过脑组织的近红外光^[1],并测量皮层表层中氧(HbO)和脱氧血红蛋白(HbR)浓度的变化^[2]。HbO和HbR是大脑活动中的主要反映脑组织代谢与血流动力学特征的主要发色团,它们具有不同的近红外光吸收系数。基于近红外光谱对生物组织具有低吸水性和高扩散的特性,通过使用光源和探测器应用近红外光谱技术测量光信号的变化,可以实现对生理信号的采集^[3]。

近年来,近红外光谱技术已成为脑成像的重要工具^[4],除了室内常用的固定式大型fNIRS设备,很多可穿戴和无光纤型近红外脑成像系统也逐步发展起来。但是系统的采样率和轻小便携性仍然是一个主要存在难以解决的问题^[5-8]。通常以测量通道数量少、对头部特定部位的限制或专注于测量环境为代价^[9-12]。最近几年,研究者们重点研究如何增加fNIRS系统的采样密度与采样频率,以及如何实现设备的小型化以及多场景下的适用性^[13-16]。

此外,在国家药监局官方网站上能查到的可用于临床的便携式近红外光谱成像系统极少。而现有用于临床、基于近红外光谱原理的脑血氧无创监测设备多为非便携的近红外光谱成像技术,当前处于研发阶段的便携式近红外设备存在通道数少、采样率低、可覆盖范围小等问题^[17]。

造成这一现象的主要原因是,在保证便携的前提下提高采样频率或通道数,必然会引入频分调制技术,而频分的解调需要复杂的解调电路,大大增加了系统的体积。因此在信号调制解调方面实现优化与改进,基于“频分-时分复用”调制与嵌入式数字解调与数字滤波提高了设备便携性、通道数以及采样频率。

本文基于近红外光谱技术,针对系统信号的调制与解调以及电路安排做出优化。构建一种基于“频分-时分复用”的调制方式,对LED进行调制,基于FPGA的解调方案,实现嵌入式数字解调与数字滤波,有效提高设备便携性、通道数以及采样频率。

2 总体方案

基于FPGA对光源进行“频分-时分复用”调制,单光源多波长之间进行频分,多光源之间进行时分。通过FPGA对接收到的信号进行数字锁相解调。并设计了4个光源和4个信号接收,光源采用三波长的

光源。验证了该调制解调对fNIRS的便携性、采样率的提高。该调制解调的总体框图如图1所示。

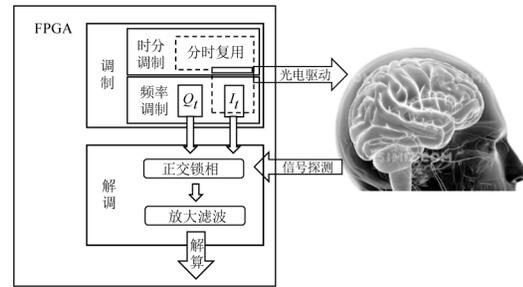


图1 调制解调总体框图

Fig. 1 General block diagram of modulation and demodulation

“频分-时分复用”的调制方式,大幅度减小了系统的采样周期。高速率ADC与FPGA对信号进行数字解调,保证了在高采样频率下实时解调信号。

3 信号调制原理及工程实现

3.1 调制原理

调制部分通过FPGA控制DAC(ADV7123)与多路开关(MAX4634)对光源进行调制,实现单光源多波长之间的频分、以及多光源之间的时分。由于所用的为正交锁相解调,因此在调制的频分部分需要输出正交的调制信号 I_i 和 Q_i 。其中 I_i 用于光源调制与锁相解调, Q_i 仅用于锁相解调。其中时分调制通过多路开关芯片的模拟电路实现,频分通过FPGA数字调制。本节将重点介绍FPGA控制部分。

光源的频率调制信号 $I_n(t)$,信号的如下:

$$I_n(t) = \cos(2\pi f_c t) + A \quad (1)$$

式中, n 为第 n 个波长; f_c 为载波频率; A 为基线数值。

光源的时分调制如图2整体时序图所示,每个光源点亮1.5 ms,待0.5 ms后,另一光源点亮1.5 ms,共4个光源点位。

调制后的整体时序图如图2所示。其对光源的调制部分实现框图如图3所示。

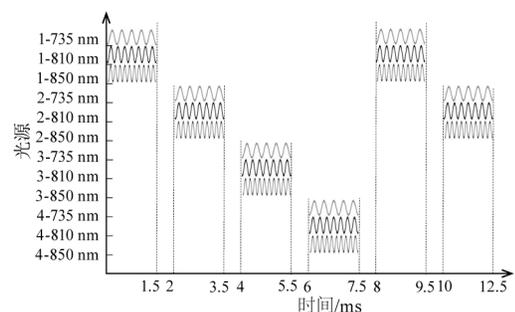


图2 整体时序图

Fig. 2 Integral sequence diagram

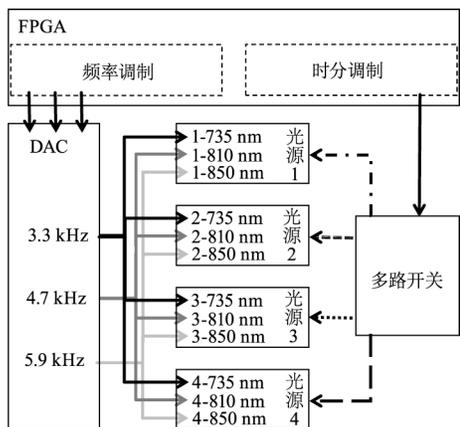


图3 光源调制部分实现框图

Fig. 3 Light source modulation part implements a block diagram

图3中, n 为3,分别对应光源波长735 nm,810 nm、850 nm。1-735 nm表示为光源点位1的735 nm 波长。

3.2 信号调制电路设计

设计要求整个输出频率为 3.3 kHz, 4.7 kHz, 5.9 kHz 的三波长调制信号。采用 FPGA 调制生成:

首先在 FPGA 内编写 DDS 模块用于相位与频率调制;然后分别输出 3 个频率的信号 I_i 与 Q_i , 作为参考信号与正交信号用于信号的锁相解调;最后信号 I_i 加上给定的信号基线 A 用于驱动光源, 保证经过头颅衰减的信号完整。具体参数如下:

- (1) FPGA 的系统时钟为 50 MHz;
- (2) 输入基线 A 即 $FZ_level = 3'b111$;
- (3) I_i, Q_i 的位宽为 7 位;
- (4) 输出的驱动信号位宽为 10 位, 1~3 位为调制基线 A , 4~10 位为调制信号 I_i 。
- (5) f_{c1} 为 3.3 kHz, 调制 735 nm 波长信号; f_{c2} 为 4.7 kHz, 调制 810 nm 波长信号; f_{c3} 为 5.9 kHz, 调制 850 nm 波长信号。

(6) 在编写的 DDS 模块中,用于相位控制的 ROM 表宽度为 9 位,用于频率控制的 ROM 表深度为 32 位。DDS 模块调制具体工程实现 RTL 图,如图4所示。3 波长光源信号的频率调制具体工程实现 RTL 图,如图5所示。

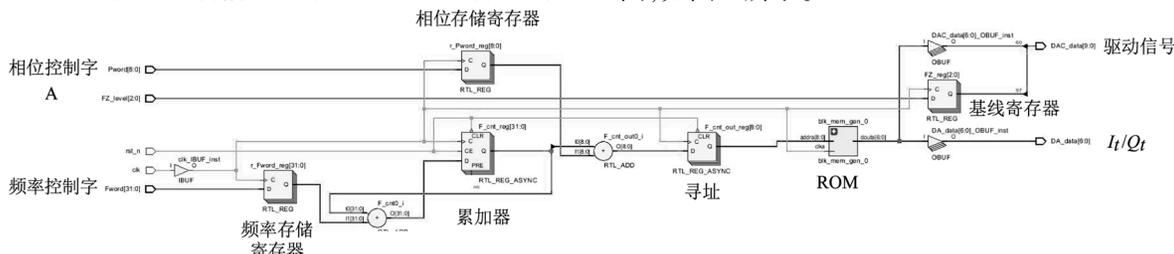


图4 DDS 模块 FPGA 实现的 RTL 图

Fig. 4 RTL diagram of FPGA implementation of DDS module

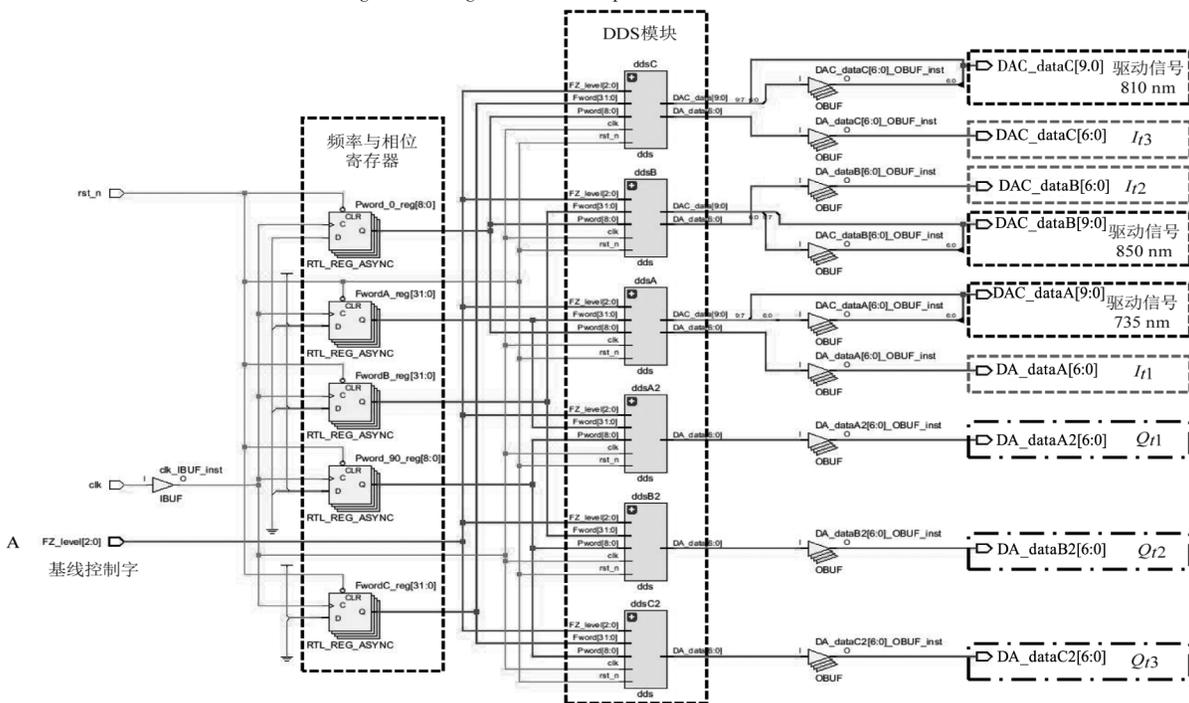


图5 频率调制环路 FPGA 实现的 RTL 图

Fig. 5 RTL diagram of frequency modulation loop FPGA implementation

3.3 时分调制的工程实现

光源时分调制模块将各个光源点依次点亮,其整个周期的时间影响整个系统的采样频率。每个光源点亮的时间也与各通道的滤波建立时间相关。为保证解调部分能够采集到足够多的波形信号,同时考量整体的采样率尽可能高,因此在每个光源点亮的时候,设定有 10 个周期左右的波形。并基于此进行了光源调制时分设计。通过 FPGA 对多路开关 MAX4634 进行配置,实现时分调制。

通过对 MAX4634 的 A1, A0, EN 输入相应的控制信号,实现对光源的时分控制。基于解调部分的滤波器的建立时间与多个波形信号,将每次光源点亮的时间为 1.5 ms,光源点灭的时间为 0.5 ms(如图 2)。四个光源点依次点亮,每个光源点工作时,均有三波长的信号同时发出。本设计的系统采样频率为 100 Hz,大幅度提高了便携式系统的采样率。

3.4 频分调制的工程实现

通过 FPGA 输出频率为 3.3 kHz、4.7 kHz 和 5.9 kHz 的正弦数字信号驱动 DAC,实现三个波长 LED 的频分调制。

首先将对正弦波进行量化编码,并存储在 ROM 查找表中;然后输入频率控制字,在时钟 f_{clk} 的驱动下,通过改变频率控制字来改变输出信号的频率 f_{out} 。其中的 3.3 kHz 频率控制字为 32'd283468;4.7 kHz 频率控制字为 32'd395137;5.9 kHz 频率控制字为 32'd506806;最后写入相位控制字,在时钟的驱动下,对相位编码的逐级累加,最终作为 ROM 查找表的地址来寻址数据。调制信号的相位控制字为 9'd0,正交信号的相位控制字为 9'd128,为后面正交锁相解调做准备。生成的仿真信号如图 6 所示。

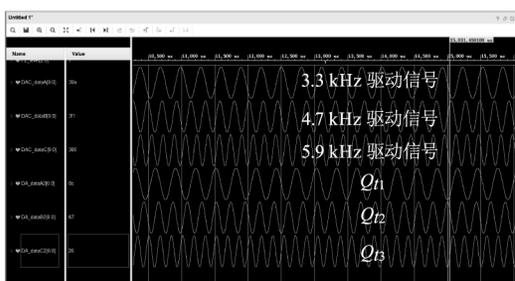


图 6 频率调制仿真波形图

Fig. 6 Frequency modulation simulation waveform diagram

4 信号解调原理与工程实现

4.1 解调原理

调制的光信号通过透镜,被光电探测器

(OPT101)接收到后,通过高速率 ADC(AD7389-4)将电信号转为数字信号传输至 FPGA 中,于 FPGA 内对信号进行解调。其整体框图如图 7 所示。

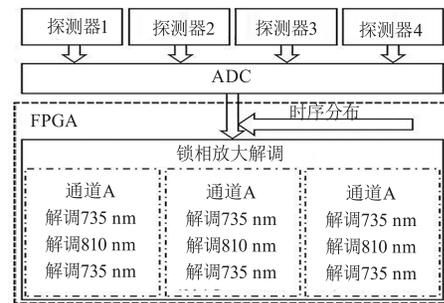


图 7 信号解调框图

Fig. 7 Signal demodulation block diagram

其中锁相放大解调是一种相敏检测技术,能够在特定的参考频率和相位下隔离一段信号。目前,锁相检测已成功的应用于低频光热检测系统^[18],其中在 FPGA 中实现的多个通道允许对具有多个不同频率的目标信号进行实时的分析。针对便携式脉搏血氧仪应用^[19]研究中,其中单个 CMOS 芯片设计有集成锁相检测,以达到非常低的功耗。在文献[20]中还研究了基于 FPGA 的 LIA 系统的优势,该研究重点强调了 FPGA 在同时完成多个数字任务方面的灵活性所带来的紧凑性和低成本实施。

锁相解调流程如图 8 所示。被采集的信号作为输入信号,并将其乘以生成的调制信号和与之正交的参考信号,获得参考通道信号和正交通道信号。再分别经过低通滤波,采用适当的数字滤波器,以抑制噪声和不需要的频率成分。然后将每通道滤波后的信号平方并相加,最后计算平方根。通过数字正交锁相检测,既可以将不同频率调制出的信号分离开,又大幅度减少了硬件电路的使用,是便携式近红外系统保证高性能的优化方案。

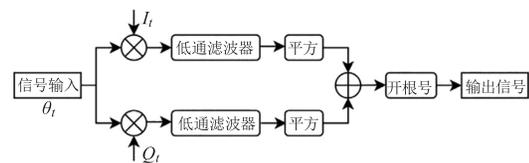


图 8 锁相解调流程图

Fig. 8 Phase lock demodulation flow chart

输入信号为 $\theta(t)$, 信号的表示如下:

$$\theta(t) = I_1(t) + I_2(t) + \dots + I_n(t) + \mu(t) \quad (2)$$

其中, $I_n(t)$ 为不同波长的光源信号; $\mu(t)$ 为其他噪声。经过锁相解调后,可以从 $\theta(t)$ 中准确地提取出 $I_n(t)$ 信号。

4.2 信号解调环路设计

由于调制的为三波长光源,即 $n = 3$ 。经过头颅被探测到的光信号作为输入。具体参数设置如下:

- (1)低通滤波采样频率为 100 kHz;
- (2)FPGA 系统时钟为 50 MHz;
- (3)输出信号为直流部分位宽 16 位;
- (4)输入信号 $\theta(t)$ 为 16 位。

信号解调实现 RTL 图如图 9 所示,在 FPGA 中调用了乘法器 IP 核与低通滤波 IP 核。

4.3 信号解调的工程实现

基于光源的调制方案与探头布局对解调部分

进行 9 路解调通道设计(在任意时刻,最多有 3 个探测器接收有效数据)。每路解调通道先通过乘法器将输入信号乘以生成的调制信号和与之正交的参考信号,获得参考通道信号和正交通道信号,然后,在分别通过低通滤波器,锁相解调的关键组成部分是低通滤波器的设计和实现方式。由于要检测的为直流分量,滤波器的截止频率设置为 100 Hz。使用 MATLAB 滤波器设计器工具,其仿真如图 10 所示,具有 100 Hz 的截止频率。使用 40 阶等纹波滤波器配置,抽头系数用有符号 16 位整数表示。

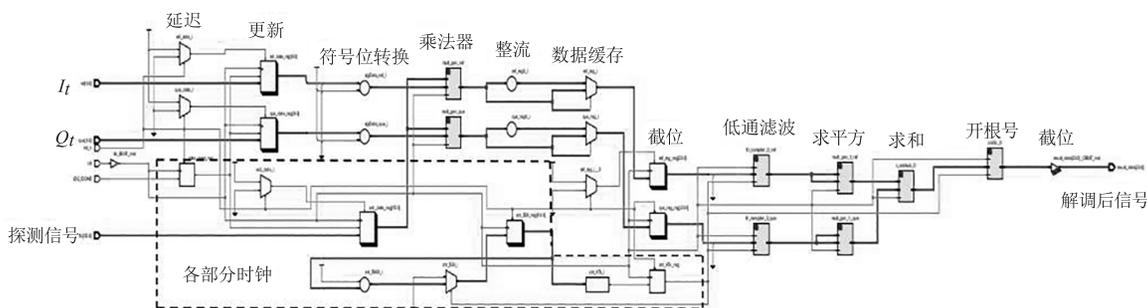


图 9 解调环路 FPGA 实现的 RTL 图

Fig. 9 RTL diagram of demodulation loop FPGA implementation

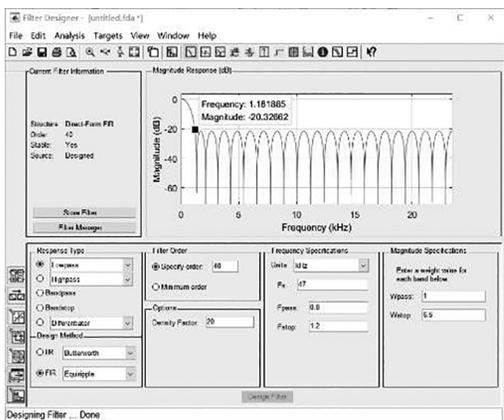


图 10 滤波器设计

Fig. 10 Filter design

将抽头系数等输入 FPGA 中的滤波器 IP 核,需要注意的是,前级 ADC 的采样频率应与滤波的采样频率一致。锁相检测的输出如图 11 所示,经过 0.68 ms 后可输出平稳数值,这是由于低通滤波器的配置导致,经过仿真验证,基于 FPGA 的锁相解调,解调出各通道信号。

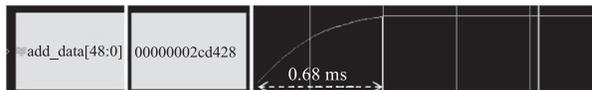


图 11 锁相检测输出结果

Fig. 11 Phase lock detection output result

采用 FPGA 进行数据解调,减少了下位机与上位机的数据传输量与 PC 端的数据处理量,减少了由数据传输带来的误差。为了使采样频率更高,需减少滤波器建立时间,增加解调速度,可从以下方面进行优化:增加调制频率之间的相距,使需要滤除的信号频率远高于直流,进而可调高数字滤波器的截止频率,以减少滤波器建立时间。解调速度的增加,可以减少每个光源点亮的时间,进而减小采样周期,使采样频率进一步提高。

5 结论

在本文中,提出了一种调制解调的方法与高集成度的探头设计。采用“频分-时分复用”调制并使用数字锁相检测的解调方式,能有效的提高系统采样率、通道数以及便携性。其中数字锁相的解调方式使近红外光谱不在依赖硬件电路进行滤波与放大,减少了大量的滤波与放大电路,极大地保证了便携性,使开发人员有更多的精力去基于“频分-时分复用”的调制方式来增加采样频率。有效的提高了设备的综合性能,有广阔的应用前景。

参考文献:

[1] Ferrari M, Quaresima V. A brief review on the history of human functional near-infrared spectroscopy (fNIRS) de-

- velopment and fields of application [J]. *Neuroimage*, 2012, 63(2):921-935.
- [2] Chiarelli AM, Maclin EL, Low KA, et al. Combining energy and Laplacian regularization to accurately retrieve the depth of brain activity of diffuse optical tomographic data [J]. *Biomed Opt*, 2016, 21(3):36008.
- [3] Gratton Gabriele, Chiarelli Antonio M, Fabiani Monica. From brain to blood vessels and back: a noninvasive optical imaging approach [J]. *Neurophotonics*, 2017, 4(3):031208.
- [4] X Huang, J Tang, J Luo, et al. Wearable functional near-infrared spectroscopy (fNIRS) system for obstructive sleep apnea assessment [J]. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 2023, 31:1837-1846.
- [5] Wei Menglin, Yan Rongguo, Mei Zhusong. Research on the brain blood oxygen monitoring device based on near infrared spectroscopy [J]. *Software Guide*, 2023, 22(9):96-102. (in Chinese)
魏梦林, 严荣国, 梅竹松, 等. 基于近红外光谱技术的脑血氧监测装置研究 [J]. *软件导刊*, 2023, 22(9):96-102.
- [6] Sun Changlong, Ji Zhong, Zhong Wentao. Research on non-invasive monitoring system based on cerebral blood oxygen on near infrared spectroscopy [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2022, 36(4):136-144. (in Chinese)
孙长龙, 季忠, 钟文韬. 基于近红外光谱的脑血氧无创监测系统研究 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2022, 36(4):136-144.
- [7] Cheng Xiangping. Design and implementation of near-infrared brain tissue blood oxygenation detection system based on optical frequency division multiplexing [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2019:1-30. (in Chinese)
程湘平. 基于光频分复用的近红外脑组织血氧检测系统设计与实现 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2019:1-30.
- [8] Liu Weiqing, Xxing Lidong, Yao Liuye. Design of portable EEG and blood oxygen synchronous acquisition system [J]. *Chinese Journal of Medical Instrumentation*, 2021, 45(3):280-283. (in Chinese)
刘伟清, 邢丽冬, 姚柳叶, 等. 一种便携式脑电与血氧同步采集系统设计 [J]. *中国医疗器械杂志*, 2021, 45(3):280-283.
- [9] Ji H, Xu Z, Wang M, et al. A flexible optoelectronic device for continuous cerebral blood flow monitoring [J]. *Biosensors (Basel)*. 2022; 12(11):944.
- [10] G Wang, et al. The Diagnosis of major depressive disorder through wearable fNIRS by using wavelet transform and parallel-CNN feature fusion [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2023, 72:1-11.
- [11] Arivudaiyanambi J, Mohan S, Cherian SM, et al. Design of a wearable four-channel near-infrared spectroscopy system for the measurement of brain hemodynamic responses [J]. *Biomed Tech (Berl)*. 2021, 66(1):1-9.
- [12] Kiguchi M, Atsumori H, Fukasaku I, et al. Note: wearable near-infrared spectroscopy imager for haired region [J]. *Rev Sci Instrum*, 2012; 83(5):056101.
- [13] Zhao H, Cooper RJ. Review of recent progress toward a fiberless, whole-scalp diffuse optical tomography system [J]. *Neurophotonics*, 2018; 5(1):011012.
- [14] Chiarelli A M, Zappasodi F, Di Pompeo F, et al. Simultaneous functional near-infrared spectroscopy and electroencephalography for monitoring of human brain activity and oxygenation: a review [J]. *Neurophotonics*, 2017; 4(4):041411.
- [15] Keles H O, Cengiz C, Demiral I, et al. High density optical neuroimaging predicts surgeons' subjective experience and skill levels [J]. *PLoS One*, 2021; 16(2):e0247117.
- [16] Peters S, Lim S B, Louie D R, et al. Passive, yet not inactive: robotic exoskeleton walking increases cortical activation dependent on task [J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2020; 17(1):107.
- [17] Miu Hhui. Noninvasive tissue oxygen saturation detection system based on continuous wave near infrared spectroscopy [D]. Tianjin: Tianjin University, 2007. (in Chinese)
缪辉. 基于近红外连续波的无创组织体血氧检测系统 [D]. 天津: 天津大学, 2007.
- [18] Cheng J, Xu Y, Wu L, Wang G. A Digital lock-in amplifier for use at temperatures of up to 200 °C [J]. *Sensors (Basel)*, 2016, 16(11):1899.
- [19] He D, Morgan S P, Trachanis D, et al. A single-chip CMOS pulse oximeter with on-chip lock-in detection [J]. *Sensors (Basel)*, 2015, 15(7):17076-17088.
- [20] Macias-Bobadilla G, Rodríguez-Reséndiz J, Mota-Valtierra G, et al. Dual-phase lock-in amplifier based on FPGA for low-frequencies experiments [J]. *Sensors (Basel)*, 2016, 16(3):379.