

基于多波长频率编码的药液成分检测系统设计^{*}蒋力耀¹ 蔡玉琴¹ 朱永炳^{1,3} 徐 季² 陶 治²(1. 南京信息工程大学电子与信息工程学院 南京 210044; 2. 南京信息工程大学集成电路学院 南京 210044;
3. 治芯电子科技(连云港)有限公司 连云港 222042)

摘 要: 静脉用药的个体化治疗对药液成分的快速、精准检测提出了更高要求,尤其是在复杂基质下微量成分的识别仍面临挑战。本研究提出了一种基于频率编码与近红外光谱联用的多波长同步检测系统,在一定程度上克服了水在近红外区吸收造成的谱线重叠问题,同时弥补了单一波长激光在识别溶质种类及其浓度方面的局限性。该系统通过 850~1 550 nm 范围内八组 LD 激光器的独立频率编码,结合锁相放大算法进行信号解调,有效抑制了多波长之间的干扰,提高了信号准确性和响应速度。系统集成了高灵敏度的 InGaAs 阵列探测器,能够捕捉 C—N(1 380~1 430 nm)和 N—H(1 500~2 100 nm)的吸收特征。通过神经网络建立光谱与浓度的映射模型,检测时间缩短至 2 s,显著提升了效率。实验结果表明,在盐酸氨溴索(0.1~2 mg/mL)与比阿培南(10~30 mg/mL)溶液中,浓度检测误差控制在 $\leq 5\%$ ($n=20$),优于传统 HPLC 方法(5%~8%)。这一结果证明了该系统在药液成分快速检测及个体化用药监控中的潜力,具有广泛应用前景。

关键词: 频率编码;近红外光谱;药液成分检测;多波长同步检测

中图分类号: TN219 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1060

Design of pharmaceutical solution composition detection system
based on multi-wavelength frequency encodingJiang Liyao¹ Cai Yuqin¹ Zhu Yongbing^{1,3} Xu Ji² Tao Zhi²(1. School of Electronics and Information Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China;
2. School of Integrated Circuits, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China;
3. Zhixin Electronics Technology (Lianyungang) Co., Ltd., Lianyungang 222042, China)

Abstract: Individualized intravenous drug therapy imposes higher demands on the rapid and precise detection of drug components, especially as the identification of trace substances in complex matrices remains challenging. This study proposes a frequency-encoded, multi-wavelength detection system based on near-infrared spectroscopy, which mitigates water-induced spectral overlap and overcomes the limitations of single-wavelength lasers in solute identification and quantification. The system independently encodes eight groups of LD lasers within the range of 850 nm to 1 550 nm, and combines phase-locked amplifier algorithms for signal demodulation, effectively suppressing interference between wavelengths and improving signal accuracy and response speed. It integrates a high-sensitivity InGaAs array detector, capable of capturing the absorption features of C—N (1 380~1 430 nm) and N—H (1 500~2 100 nm). By establishing a spectral-to-concentration mapping model using neural networks, the detection time is reduced to less than 2 seconds, significantly improving efficiency. Experimental results show that in hydrochloride ambroxol (0.1~2 mg/mL) and biapenem (1~5 mg/mL) solutions, the concentration detection error is controlled at $\leq 5\%$ ($n=20$), outperforming traditional HPLC methods (5%~8%). These results demonstrate the system's potential in rapid drug component detection and individualized drug monitoring, with broad application prospects.

Keywords: frequency encoding; near-infrared spectroscopy; pharmaceutical solution composition detection; multi-wavelength synchronous detection

0 引 言

在医疗领域,绝大部分药物需要与固定浓度的葡萄糖、

氯化钠溶液混合,作为溶媒注射进人体以实现治疗目的。近年来为了保障患者的生命财产安全,各大医院纷纷建立了静脉药液配置中心^[1],以替代传统的护士站进行药物的

收稿日期:2025-04-24

^{*} 基金项目:国家重点研发计划课题(2022YFB4401301)、国家自然科学基金重大研究计划(92264103)、江苏省研究生实践创新计划(SJCX25_0504)
项目资助

统一配置和管理,并分发至各个患者身边。考虑到患者的病因、体质等因素,药物的浓度也会有所区别,因此,对药物浓度的审核成为了一道极其重要的工序^[2]。然而,目前的传统的高效液相色谱法 (high-performance liquid chromatograph, HPLC)^[3],检测设备昂贵^[4]且笨重,检测时间长达 10 多分钟,无法实现实时检测,分点式布局,检测误差范围在 5%~8%,导致药物的浓度审核大多依赖人工。而人工只能核对标签信息,无法准确测量药物的浓度。因此,医疗领域迫切需求一种准确、便捷、低成本且不会损坏药物成分的检测设备。

目前,近红外光谱技术 (near-infrared spectroscopy, NIRS) 凭借其非接触性、高灵敏度及快速响应等优势,在液体成分与浓度分析领域得到了广泛应用。2017 年,孔国利等^[5]采用可调谐二极管吸收光谱结合波长调制光谱设计了液体无损识别电子鼻系统用于检测液体的挥发气体。2019 年,王博^[6]提出了一种结合 MEMS 近红外传感器的检测仪用于液体肥组分检测。

但目前近红外光谱液体检测技术主要存在以下问题: 1)受制于水的近红外吸收,近红外光谱无法准确区分开被测物质近红外光谱吸收与水的吸收^[7]。2)药物中的溶质多有不同,单一波长的激光信号无法辨别出药物的种类以及浓度信息。

目前,频率编码技术 (frequency encoding technique, FET) 凭借其抗干扰能力强信道利用率高在通信领域使用的非常广泛。2019 年,杜军等^[8]通过频率编码技术设计实现了对空间和距离二维波束控制。2024 年,肖鄂生^[9]结合频率编码技术设计中波应急广播覆盖网方案。

针对近红外光谱液体检测技术的不足,本设计在扩展了多个波长的近红外信号并引入了通信系统中的频率编码技术,通过给不同波长的 LD 激光器调制独特频率的电流信号实现对不同波长激光信号的频率编码,实现对不同波长的有效区分。结合差分技术得到不同药物的光谱信息,通过比对不同波长下的光谱强度,实现药物溶液的种类以及浓度识别。

1 系统整体方案设计

1.1 近红外光谱检测药液成分原理

药物分子在吸收特定波长的激光后,会发生能级跃迁,其价电子从基态跃迁到激发态,由于不同药物分子共价键结构不同,导致其能级跃迁方式也并不同,直观表现为不同的药物分子具有不同的近红外吸收光谱^[10]。在本文中,检测的药物为比阿培南 (C₁₅H₁₈N₄O₄S) 以及盐酸氨溴索 (C₁₃H₁₉Br₂ClN₂O), 根据日本有机化合物光谱数据库 (spectral database for organic compounds, SDBS)^[11] 中的光谱数据显示,两种药物的特有共价键在近红外光谱^[12] 吸收的波长如表 1 所示。O—H 与 C—N 吸收波长有所重叠,为了避免检测信号重叠在波长选择时选用 1 410 nm 对

盐酸氨溴索中的 C—N 键进行测量,选择 1 550 nm 对比阿培南中的 N—H 键进行测量。

表 1 共价键的近红外吸收波长
Table 1 Near-infrared absorption wavelengths of covalent bonds

化学键	来源	吸收波长/nm
O—H	两者皆有	1 420~1 470
N—H	比阿培南	1 500~2 100
C—N	盐酸氨溴索	1 380~1 430
C—H	两者皆有	1 000~1 075

朗伯-比尔定律^[13]展示了光强衰减与介质吸收特性之间的关系,光强为 I_0 的入射光照射到光程为 L 的待测液体时,光强会由于药液分子的吸收作用会发生衰减,通过检测入射光的光强衰减程度,可以得到药物的种类与浓度信息,为了测得光强衰减程度,将入射光通过分光器分为两路,一路投射过药液样品,得到光强信号为 I_1 如式(1)所示。

$$I_1(t) = I_0 \cdot [1 + mu(t)] \cdot e^{-\alpha \cdot l}$$
 (1)

式中: I_0 为经由分光器的一束光强, α 为被测液体吸收系数, l 为光程长度, m 为光强调制系数, $u(t)$ 为光强调制信号。

另一路入射光经过光衰减器得到光强 I_2 如式(2)所示。

$$I_2(t) = n \cdot I_0 \cdot [1 + mu(t)]$$
 (2)

式中: n 为光纤衰减器衰减系数。

使用光电探测器将光信号转换为电流信号,并进行 I-V 转换转为电压信号,电压信号强度为:

$$u_1(t) = AI_1(t) = AI_0 \cdot [1 + mu(t)] \cdot e^{-\alpha \cdot l}$$
 (3)

$$u_2(t) = AI_2(t) = n \cdot AI_0 \cdot [1 + mu(t)]$$
 (4)

式中: $u_1(t)$ 、 $u_2(t)$ 分别为 I_1 和 $I_2(t)$ 经光电探测器电流信号转换后的电压信号, A 为 I-V 转换电路的转换倍数。

通过差分放大技术将 $u_1(t)$ 、 $u_2(t)$ 进行相减,得到光强衰减程度的电压信号,信号强度可表示为:

$$u(t) = u_2(t) - u_1(t) = AI_2(t) - AI_1(t) = AI_0 \cdot [1 + mu(t)][n - e^{-\alpha \cdot l}]$$
 (5)

1.2 药液检测系统整体设计

系统设计由两大核心部分组成:硬件设计与软件设计。硬件设计部分专注于构建激光器驱动系统、光谱传感器系统,并负责光路系统的整体搭建。而软件设计则涵盖了激光器驱动电路的控制逻辑、光谱传感器系统的操作设计,以及基于 LabView 的显示界面开发。系统设计框图如图 1 所示。激光驱动系统输出 8 个独特频率得信号与同一锯齿波信号进行叠加,每个独特频率得正弦波对一种波长的 LD 激光器进行驱动,通过光纤耦合器得到多波长混合信号,经过分光器,将混合信号分成两路一路为含有药物样品的药液信号,为了避免溶媒的吸光度对药液溶质的测量的影响,

另一路为不含药物的溶媒样品参考信号,两路信号通过光谱传感器系统进行做差以及解调,得到解调信号转换成数字信号并上传至上位机,以供进一步分析与处理。

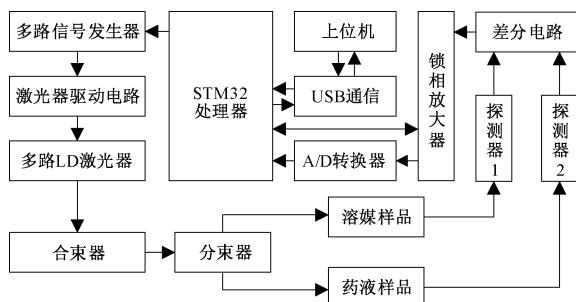


图1 药液检测系统框图

Fig. 1 Block diagram of the liquid medication detection system

2 系统设计

2.1 系统硬件设计

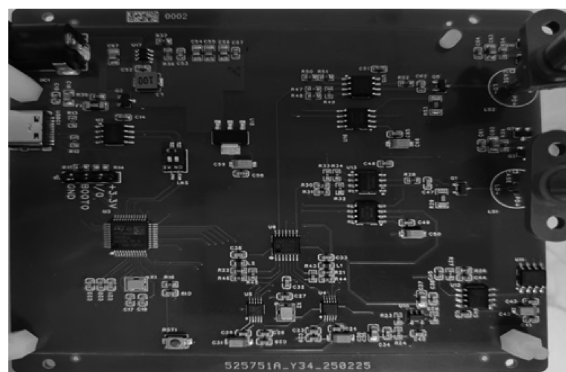
本系统的关键在于激光二极管(laser diode, LD)的驱动与激光信号的采集与信号处理。主要包括两部分:1)激光器的驱动电路,为激光器提供不同的驱动频率,保证不同波长的激光器的光强频率不同。2)探测器外围电路以及信号调理电路。

为了区分出不同药物的在不同波长下的吸收峰,系统使用多路LD激光器作为激光光源,通过对LD激光器的驱动电流等参数进行调制,实现LD激光器输出多种特定波段的近红外激光信号,为了保证LD激光器的使用寿命,使用3 Hz的锯齿波叠加不同频率的正弦波作为特定的驱动信号以驱动不同波段的LD激光器。系统采用频率区分不同波长的激光信号,电路实物图如图2(a)所示。

为了实现锯齿波信号的产生,选择了AD5541作为锯齿波发生器,AD5541是一款16位高精度数模转换器(digital-to-analog Converter, DAC),配合微控制器能够实现高精度的自定义波形,最小步进电压约为 $76\mu\text{V}$,线性度达到了 $\pm 0.5\text{ LSB}$,远超运放积分器的精度。为了使锯齿波信号更加平滑和连续,在AD5541输出端增加了低通滤波器(low-pass filter, LPF),以减少输出锯齿波的离散阶梯效应和低频噪声。具体电路如图2(b)所示。

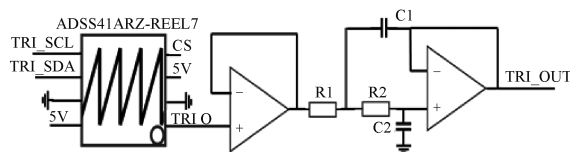
为了产生特定频率的正弦波信号,采用了直接频率发生器(direct digital synthesis, DDS)芯片,具体的芯片型号为AD9833,相较于传统的模拟振荡器或MCU直接波形输出,其优势在于频率分辨率达到 0.1 Hz 并且数字可编程,实现了动态频率调整,配合 25 MHz 的晶振能够输出最大频率达到 12 MHz 的正弦波。为了实现正弦波信号的幅值调制,在DDS之后连接了同相放大器以及电压跟随器,有效的提高了正弦波信号的幅度并减少了DDS因负载影响导致波形失真的可能性。具体电路如图2(c)所示。

为实现正弦波与锯齿波频率叠加,采用GS8092-SR运



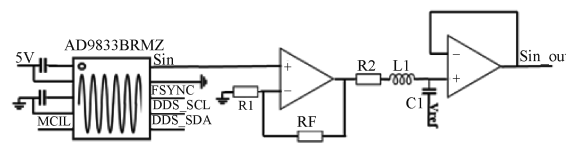
(a) 多光源激光器驱动电路实物

(a) The physical object of the multi-light-source laser driver circuit



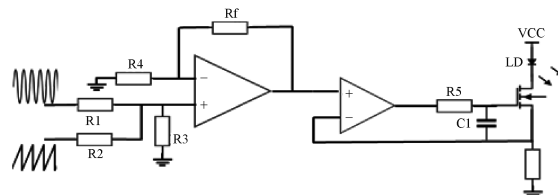
(b) 锯齿波发生电路以及低通滤波电路

(b) Sawtooth wave generator and low-pass filtering circuit



(c) 正弦波发生器以及其滤波电路

(c) Sine wave generator and its filtering circuit



(d) 加法器以及恒流源电路

(d) Adder and constant current source circuit

图2 多光源激光器驱动系统

Fig. 2 Multi-wavelength laser driver system

放制作的加法器电路,带宽达 350 MHz ,适合高速信号处理。为实现激光器的稳定驱动,采用运放与MOSFET组成的恒流源驱动LD激光器,通过调制信号加至限流电阻实现电流控制及频率调制,电路如图2(d),每路有两通道信号驱动,多路驱动则通过层叠多个电路实现。

为了使激光器的波长范围在符合药物吸收范围的同时避免水溶液的强吸收波长,在激光器的选择上选择了8个波长的激光器,波长分别是低波段的 $850, 940, 980, 1064\text{ nm}$ 和高波段的 $1370, 1410, 1470, 1550\text{ nm}$ 。通过多光源激光驱动系统输出的激光信号如图3与图4所示,图3为 $700\sim 1100\text{ nm}$ 的输出信号,图4为 $1350\sim 1650\text{ nm}$ 的输出信号。由此可知,光源激光驱动系统能够稳定输出激光信号。

为了能够采集到波长范围更广的光信号,采用了InGaAs传感器,并设计了相应的光谱采集电路,实物如

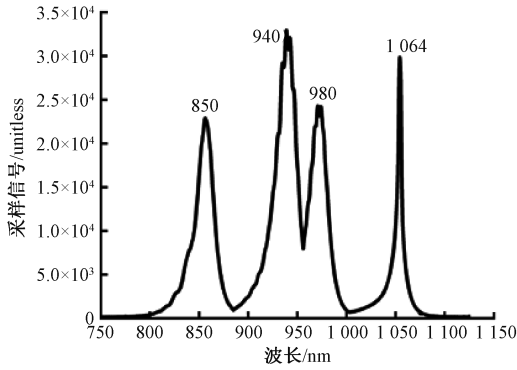


图 3 750~1100 nm 激光输出信号

Fig. 3 Output signal of laser (750~1100 nm range)

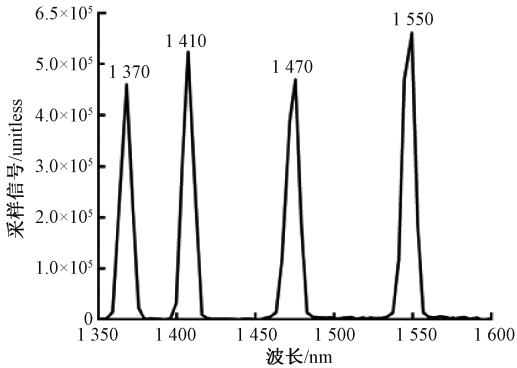


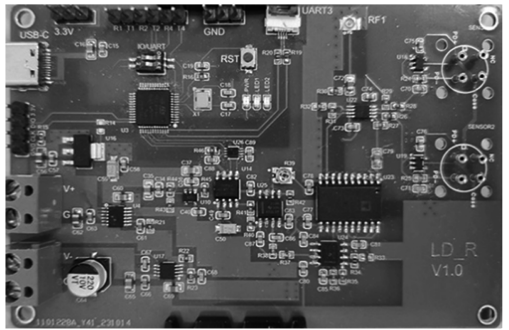
图 4 1350~1600 nm 激光信号

Fig. 4 Output signal of laser (1350~1600 nm range)

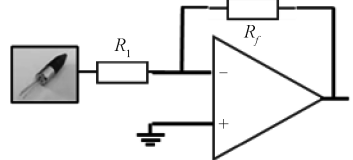
图 5(a)所示。InGaAs 探测器能够识别 800~1700 nm 波段的近红光信号,并输出相应的光电流。为了将光电流转换为更易处理的电压信号,采用了 TPH2501-TR 运放设计了跨阻放大器(transimpedance amplifier, TIA)电路^[14],将微弱的光电流信号转换为了电压信号,并放大了 10 000 倍。图 5(b)为两路光谱传感器接口以及 I-V 转换电路。为了区分不同药物的吸收波段,采用了差分电路,将溶媒一路的电压信号与透过药液的电压信号进行做差,提取出微弱的药物吸收波长信号。由于药物吸收波长信号中包含了 8 个波长信号,并拥有独特的信号频率作为识别,为了能够区分出不同波段的激光,在差分电路之后采用了 AD630 作为锁相放大器(lock-in amplifier, LIA)^[15],如图 5(c)所示。通过模拟开关选择输入与 8 个波长同频的参考信号,对光电流产生的信号进行区分,分辨出不同波段的光信号,实现对特定波长的红外激光信号的寻址以及滤波。同时锁相放大器的使用,使系统的信噪比低至-60 dB。经过锁相放大器的滤波之后采用模数转换器(analog-to-digital converter, ADC)将模拟信号转换为数字信号通过微控制器上传至 PC 进行数据分析。

2.2 系统软件设计

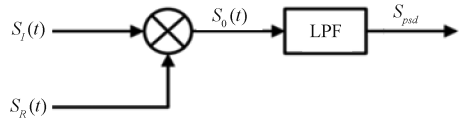
系统软件设计使用 Keil5 for ARM 进行系统设计,使用 C 语言进行编程,使用模块化编程设计。如图 6 所示,激



(a) 光谱采集电路
(a) Spectral acquisition circuit



(b) 光谱传感器以及 I-V 转换电路
(b) Spectral sensor and I-V conversion circuit



(c) 锁相放大器
(c) Lock-in amplifier

图 5 光谱采集电路

Fig. 5 Spectral acquisition circuit

光信号驱动电路软件设计其主要模块包含了采集模式选择模块、驱动频率设置模块、驱动电流设置、光源控制模块以及光谱采集模块和数据传输模块。为了实现数据的数字化读取使用 LabVIEW 实现数字波形展示以及数据读取。

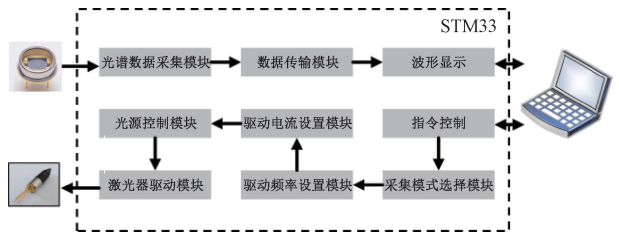


图 6 系统软件设计

Fig. 6 System software design

本系统使用一维卷积神经网络(1D convolutional neural network, 1D-CNN)设计校正模型用于处理数据集^[16],数据集共计 250 个数据点,采用 7 层网络建立模型,包括输入层、卷积层、最大池化层、全连接层和输出层,如图 7 所示。

其中分别使用 16 个和 64 个 3×1 大小的卷积核构建两层卷积层用于提取波段特性;使用 3×1 大小的 Max-pooling 获得模拟数据的局部最值;再使用一层由 64 个 3×1 大小的卷积核构建的卷积层进一步提取波段特征,获

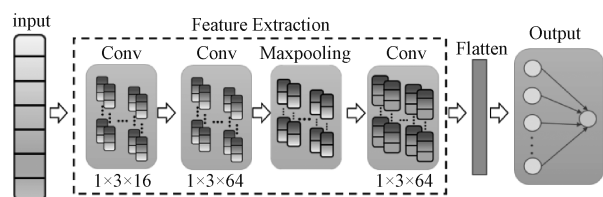


图7 模型构建流程图

Fig. 7 Model construction flowchart

取模拟数据的高维特征;得到64个特征向量连接到Flatten层,将卷积层提取的高维特征在Flatten层平铺展开,最后连接到输出节点,映射药物浓度。

3 实验与讨论

3.1 光谱信号测试

为了得到不同药液的光谱数据信息,配比了不同药液不同浓度的药物样品,对盐酸氨溴索、比阿培南两种药液进行配置,以9%氯化钠溶液为药液溶媒,以临床用药时注射常用浓度为基础,设置盐酸氨溴索浓度从5~100 mg/50 ml共20个样本,每个梯度之间相差5 mg/50 ml。设置比阿培南浓度从50~250 mg/50 ml共20个样本,每个梯度之间相差10 mg/50 ml。

为了实现药物浓度的区分,将激光驱动系统设置为单一波长进行药物识别,以盐酸氨溴索以及比阿培南进行溶液浓度测试实验,使用其最大吸收波长的LD激光器(盐酸氨溴索为1 410 nm,比阿培南为1 550 nm)作为测试信号进行测试,设置驱动信号为3 Hz锯齿波叠加2 kHz正弦波。测试盐酸氨溴索氯化钠溶液(YS-N)以及比阿培南氯化钠溶液(BA-N)在不同浓度下的解调信号,如图8所示,图中黑色信号溶媒样品的光信号转换成的电信号,灰色为经过药液样品的光信号转换成的电信号,两路信号强度进行差分操作,如图9所示,图9中的信号为两路信号经过差分电路相减得到的差分信号,差分信号经由锁相放大器之进行解调(施加4 kHz正交信号),提取出相对应的解调信号,如图10与图11所示。为了测量出不同浓度的药液的解调信号,系统测量了不同浓度的样品信号,图10为20~100 mg/50 ml的盐酸氨溴索氯化钠溶液(YS-N)各浓度在1 410 nm的解调信号,盐酸氨溴索(化学结构含特征性C—N键)在近红外光谱分析中,其分子内C—N键对1 380~1 430 nm波段光信号表现出特异性吸收响应。实验数据显示,溶液浓度梯度变化(0.4~2 mg/mL)与1 410 nm处差分信号强度呈显著线性相关性,随着药物浓度的增加,锁相放大器解调得到的差分信号的波峰以及波谷就更大,即药液中的化学键浓度越大,信号强度越大。图11为500~1 500 mg/50 ml的比阿培南氯化钠溶液(BA-N)。比阿培南氯化钠溶液分子结构中富含N—H官能团,该化学键对1 500~2 100 nm波段的近红外光谱具有特异性吸收特性。实验数据显示,在浓度梯度变化(10~30 mg/ml)与1 550 nm处

呈现显著的差分信号响应,且信号强度与溶液浓度呈线性相关性,整体特性与盐酸氨溴索溶液信号相似,随着药物浓度的提高,信号的强度随之增强。基于此特性,通过构建定量分析模型,可实现不同浓度比阿培南氯化钠溶液的高精度区分与定量检测。

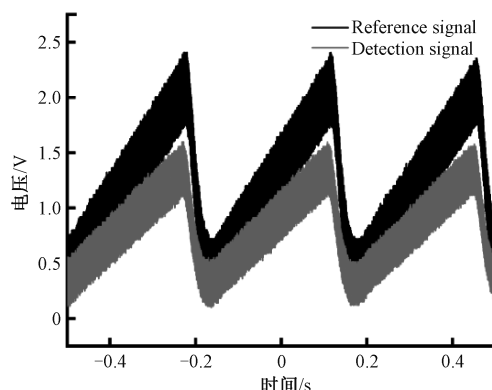


图8 测量信号与参考信号

Fig. 8 Measurement signal and reference signal

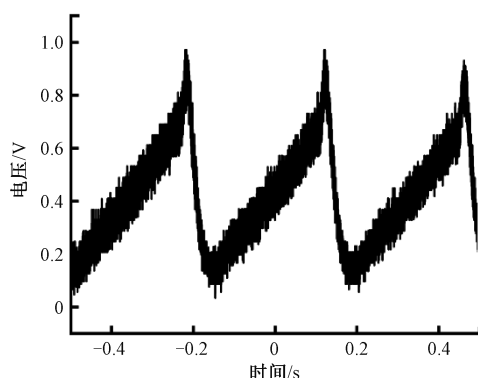


图9 测量信号与参考信号的差分信号

Fig. 9 Differential output of measured and reference signals

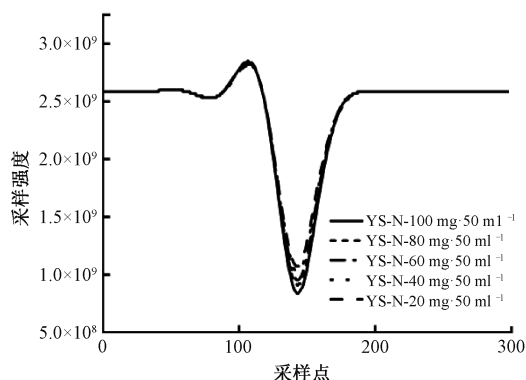


图10 盐酸氨溴索各浓度解调信号

Fig. 10 Demodulated signals for various concentrations of ambroxol hydrochloride

为了区分药液中所含的具体药物成分,本文采用了多波段光源同步输出的方式,并为每个波长的光信号调制不

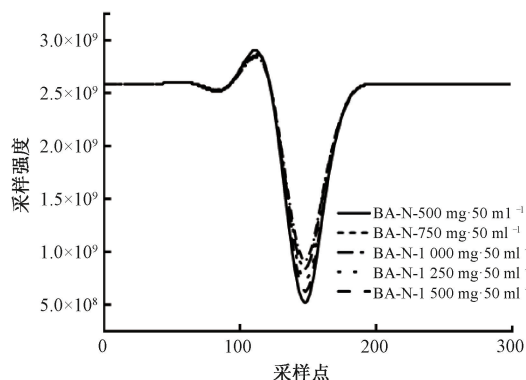


图 11 比阿培南各浓度解调信号

Fig. 11 Demodulated signals for various concentrations of biapenem

同频率,从而实现多通道信号的有效区分。具体频率设置为:850 nm~1 kHz、940 nm~2 kHz、980 nm~4 kHz、1 064 nm~8 kHz、1 370 nm~16 kHz、1 410 nm~32 kHz、1 470 nm~64 kHz、1 550 nm~128 kHz。每个波段信号均具有唯一的调制频率,使用光谱采集系统对各波段信号进行采集与解调,其采集结果如图 12 所示。其中,BA-N 表示比阿培南氯化钠溶液,YS-N 表示盐酸氨溴索氯化钠溶液。从图中可以看出,两组药液在多个波长段的吸收强度表现存在显著差异,盐酸氨溴索在 1 410 nm 附近的激光信号中展现出较强的吸收特性,而比阿培南则在 1 550 nm 处具有最显著的吸收峰。这一现象与其分子结构中的化学键有关:盐酸氨溴索中的 C—N 键在 1 380~1 430 nm 波段内对激光具有较强的吸收能力,而比阿培南所含的 N—H 键则在 1 500~2 100 nm 范围内表现出更高的吸收响应。这种差异为药物的光谱识别提供了理论基础。因此,若通过多次采集不同药物在多个波段的光谱信号,并基于这些数据构建数学模型,通过分析其最大吸收峰的位置和强度,即可实现对溶液中药物种类的快速、非破坏性识别。

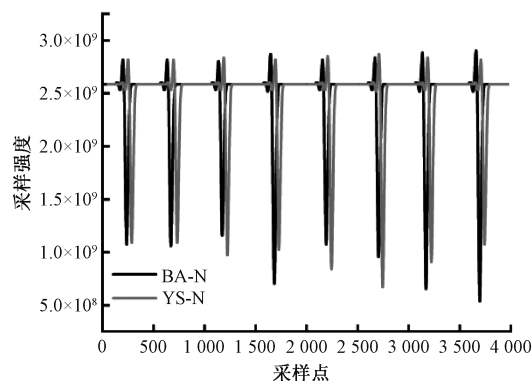


图 12 不同药物吸收波长对比

Fig. 12 Comparison of absorption wavelengths of different drugs

由液体检测的基本原理可知,液体对光线的吸收强度与其浓度之间通常呈较好的线性关系。为量化系统输出信号与药液浓度之间的定量关系,本研究对所选两种药物溶

液进行了浓度标定实验,拟合不同浓度下药液产生的谐波信号强度与浓度之间的函数关系。为排除背景干扰并提取药物的有效吸收成分,实验采用药物溶液的信号减去溶媒信号的差值后进行归一化处理,从而使不同浓度之间的幅值差异更具可比性与稳定性。横坐标以样品编号替代具体浓度,编号依药物浓度由低到高排列。对归一化后的幅值信号与样品编号进行线性拟合,得到两种药物溶液的拟合曲线。如图 13 与图 14 所示。图 13 和图 14 分别展示了盐酸氨溴索氯化钠溶液(YS-N)与比阿培南氯化钠溶液(BA-N)的拟合结果。通过图中可观察到,两者的拟合曲线斜率稳定、残差分布均匀,说明在本实验设置和浓度范围内,系统响应与药物浓度间具有良好的线性关系。

$$YS-N: y = 0.04683x + 0.01541, R^2 = 0.9599 \quad (6)$$

$$BA-N: y = 0.0564x - 0.20069, R^2 = 0.95703 \quad (7)$$

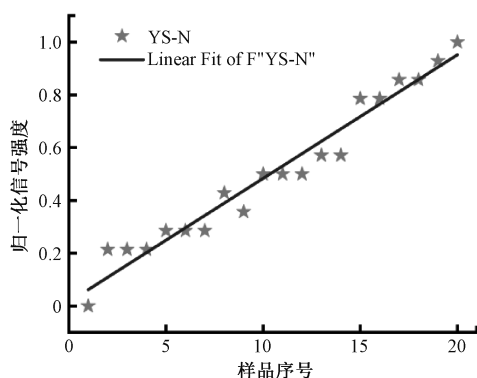


图 13 盐酸氨溴索溶液归一化线性拟合图

Fig. 13 Linear fitting of normalized ambraxol hydrochloride solution

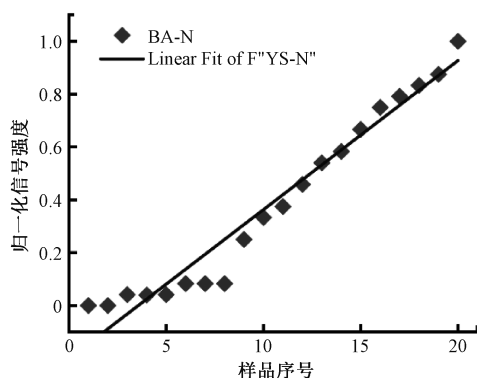


图 14 比阿培南溶液归一化线性拟合

Fig. 14 Linear fitting of normalized biapenem solution

3.2 系统稳定性测试

为验证系统长时间运行的稳定性,选用不同浓度的药液配置样本,每 30 min 提取一次数据,连续测量 24 h。测量结果如图 15 和图 16 所示。在图 15 中,盐酸氨溴索在 20 mg/50 ml 浓度下标准差最小,为 0.60596,但该浓度的

变异系数(CV)最高,约为3%。在图16中,比阿培南在1250 mg/50 ml时标准差最大为16.385,对应CV最大为1.3%。结果表明,经过24 h连续检测,系统运行稳定,药液浓度波动在合理范围内。

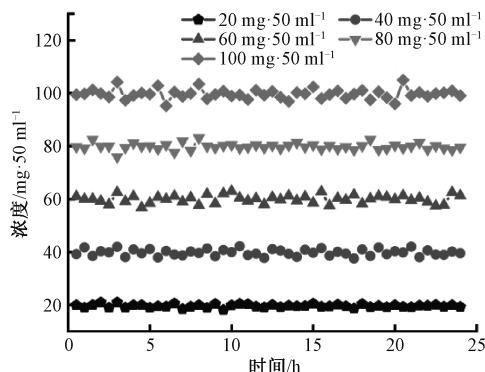


图15 盐酸氨溴索各浓度稳定性测试

Fig. 15 Stability testing of ambroxol hydrochloride solutions at various concentrations

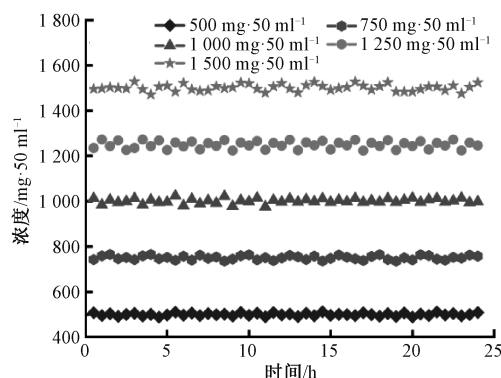


图16 比阿培南各浓度稳定性测试

Fig. 16 Stability testing of biapenem at various concentrations

4 结 论

本文提出了一种基于频率编码区分多波长激光信号的检测方法并设计了相应的药液成分和浓度的检测系统,成功探测到了光谱信息,准确区分出药物的成分以及浓度,准确率大于95%,检测时间小于2 s,优于传统的高效液相色谱仪检测的10~60 min,准确率也大于液相色谱仪的92%~95%。同时对药物溶液的光谱信息进行了线性拟合,得到了较好的拟合结果,证明了本系统在液体检测、药品生产以及医疗医药等领域具备极大的应用价值。

参考文献

[1] 林丽珍,莫灶娣,黄小茜,等. 静脉药物配置中心的建立在临床中的应用[J]. 热带医学杂志,2004(4):489-490.
LIN L ZH, MO Z D, HUANG X X, et al. Clinical application of the establishing of the venous transfusion medicine disposition centre [J]. Journal of Tropical

Medicine, 2004(4): 489-490.

- [2] 高稚婷,张锋英,王雷鸣,等. 万古霉素血药浓度监测的临床应用[J]. 中国感染与化疗杂志,2014,14(6): 526-531.
GAO ZH T, ZHANG F Y, WANG L M, et al. Application of therapeutic drug monitoring of vancomycin [J]. Chinese Journal of Infection and Chemotherapy, 2014, 14(6): 526-531.
- [3] 杨贤娜,邹剑成,梁诗敏,等. HPLC法测定水合氯醛糖浆剂的含量[J]. 临床合理用药,2023,16(19):151-154.
YANG X N, ZOU J CH, LIANG SH M, et al. Content determination of chloral hydrate syrup using HPLC [J]. Chinese Journal of Clinical Rational Drug Use, 2023, 16(19): 151-154.
- [4] 程道海,陆华,刘滔滔,等. 我国治疗药物监测的现状与展望[J]. 广西医科大学学报,2016,33(5): 910-913.
CHENG D H, LU H, LIU T T, et al. Current status and future perspectives of therapeutic drug monitoring in China [J]. Journal of Guangxi Medical University, 2016, 33(5): 910-913.
- [5] 孔国利,谷惠敏. 基于TDLAS-WMS的液体无损探测识别电子鼻系统[J]. 电子器件,2017,40(1):194-198.
KONG G L, GU H M. Electronic nose system for liquid nondestructive detection and identification based on TDLAS-WMS [J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2017, 40(1): 194-198.
- [6] 王博. 基于微型近红外光谱传感器的液体肥组分检测仪研制[J]. 仪器仪表用户,2019,26(6):6-10.
WANG B. Development of liquid fertilizer component detector based on micro-near infrared spectral senso [J]. Instrumentation Users, 2019, 26(6): 6-10.
- [7] 张志,张开飞,崔迎涛,等. 基于近红外光谱技术快速无损检测大豆含水量[J]. 光谱学与光谱分析,2018, 38(S1):63-64.
ZHANG ZH, ZHANG K F, CUI Y T, et al. Rapid nondestructive testing of soybean moisture content based on near infrared spectroscopy technique [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2018, 38(S1): 63-64.
- [8] 杜军,钟德星,高英鹏,等. 基于频率编码的频率分集阵列雷达技术研究[J]. 现代信息科技,2019,3(4):58-60.
DU J, ZHONG D X, GAO Y P, et al. Research on frequency diversity array radar technology based on frequency coding [J]. Modern Information Technology, 2019, 3(4): 58-60.
- [9] 肖鄂生. 基于FSK可变载频AM技术的中波应急广播覆盖网方案研究[J]. 电视技术,2024,48(11):159-163.
XIAO E SH. Research on medium wave emergency

- broadcast coverage network based on FSK variable carrier AM technology[J]. Video Engineering, 2024, 48(11):159-163.
- [10] 陆利敏,施斌,唐天宇,等. 基于密度泛函理论的肾上腺素分子的光谱分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2022, 42(1):248-252.
- LU L M, SHI B, TANG T Y, et al. Spectral analysis of epinephrine molecule based on density functional theory[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2022, 42(1): 248-252.
- [11] 杨梦亚,杨睿,林发利,等. 医疗废水处理前后溶解性有机物的光谱特征分析[J]. 环境化学, 2022, 41(12): 4106-4117.
- YANG M Y, YANG R, LIN F L, et al. Spectral characteristics of dissolved organic matter in medical wastewater before and after treatment [J]. Environmental Chemistry, 2022, 41(12): 4106-4117.
- [12] 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.
- SUN CH L, JI ZH, ZHONG W T. 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.
- [13] 王中慧,周慧,任列香,等. 大学分析化学教科书中朗伯-比尔定律及其推导[J]. 化学教育(中英文), 2023, 44(24): 116-122.
- WANG ZH H, ZHOU H, REN L X, et al. Lambert-Beer Law and its derivation in college textbooks of analytical chemistry[J]. Chinese Journal of Chemical Education, 2023, 44(24):116-122.
- [14] 白利慧,刘利峰,王成勇. 红外探测器中一种电容式反馈跨阻放大器的设计[J]. 电子器件, 2024, 47(1): 62-68.
- BAI L H, LIU L F, WANG CH Y. A new method for designing capacitive feedbacktransresistance amplifier for infrared detector[J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2024, 47(1): 62-68.
- [15] 谢勋兰,夏庆康. 基于锁相放大器的微弱信号检测方法研究与仿真分析[J]. 电子制作, 2024, 32(19): 39-42.
- XIE X L, XIA Q K. Research and simulation analysis of lock-in amplifier-based weak signal detection methods[J]. Practical Electronics, 2024, 32(19): 39-42.
- [16] 李鹏,杨山山,徐文校,等. 基于改进 CEEMD 和多域特征融合的 1D-CNN 降电量级识别算法[J]. 电子测量技术, 2022, 45(17):134-143.
- LI P, YANG SH SH, XU W J, et al. Hail magnitude recognition algorithm based on improved CEEMD and 1D-CNN of multi-domain feature fusion[J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45(17):134-143.

作者简介

蒋力耀, 硕士研究生, 主要研究方向激光光谱识别系统、电路与系统。

E-mail: 202312490408@nuist.edu.cn

陶治(通信作者), 副教授, 主要研究方向为微纳光电传感集成芯片设计与制造、激光光谱传感系统电路系统设计与制造、射频模拟集成电路设计。

E-mail: 003135@nuist.edu.cn