

doi: 10.3788/gzxb20154411.1123002

正交相关的双光束分光光度计控制系统

易映萍¹, 王玮¹, 俎立峰²

(1 上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200000)

(2 许继集团有限公司, 河南 许昌 461000)

摘 要:采用一套光电转换系统并增加一个正交信号发生器,设计了正交相关的双光束分光光度计.光电转换系统包括一个光电二极管、一个信号滤波放大和一个 AD 转换;正交信号发生器是一个部分直通的旋转圆盘,每一个周期它将参考信号和样品信号以正交相关的编码形式同时投射到光电转换系统上,转换得到的复合信号除了参考信号和样品信号,还包括光电二极管的暗电流信号.主控制系统按照三个信号各自的编码将它们分别分离并还原出来供后续分析计算用.由于正交相关的双光束分光光度计只采用一套光电转换系统且正交信号发生器每一个旋转周期都可以检测参考信号、样品信号、暗电流信号,避免了由于转换器件个体差异和检测时间的不同而产生的测量误差.实验验证了正交相关的双光束分光光度计在稳定性和测量精度上具有一定的优势.

关键词:正交相关的双光束分光光度计;正交信号发生器;光电转换系统;正交编码;FPGA;参考信号;样品信号;暗电流信号

中图分类号:TH744

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2015)11-1123002-7

Orthogonal Double Beam Spectrophotometer Control System

YI Ying-ping¹, WANG Wei¹, ZU Li-feng²

(1 University of Shanghai for Science and Technology, School of Optical-Electrical and Computer Engineering, Shanghai 200000, China)

(2 XUJI Group Corporation CO., LTD. Xuchang, Henan 461000, China)

Abstract: To reduce the test error, the orthogonal double beam spectrophotometer was designed. The orthogonal double beam spectrophotometer uses one photoelectric conversion system which includes one photodiode, one filtration and amplification, one AD conversion and adds a producer of orthogonal signal which is a rotatable disk and non-opaque somewhere. In each cycle the reference signal and sample signal get through the producer of orthogonal signal and project to the photoelectric conversion system. In this way, the signals collected by the photoelectric conversion system in each cycle are composite and consist of the reference signal, sample signal and dark current signal, each of which will be separated by the master control system of FPGA as each code and restored for the following calculation and analysis. Since the error caused by the differences of photoelectric transducer and collecting time is avoided theoretically, the measurement accuracy of double beam spectrophotometer can be improved through taking one photoelectric conversion system and adding a producer of orthogonal signal. The experimental results show that the orthogonal double beam spectrophotometer has advantages in stability and accuracy.

Key words: Orthogonal double beam spectrophotometer; Producer of orthogonal signal; Photodiode; Photoelectric conversion system; Orthogonal encoding; FPGA; Reference signal; Sample signal; Dark current signal

OCIS Codes: 230.0230; 230.0250; 230.1360; 230.3750

基金项目:国家高技术研究发展计划(No. 2012AA050206)和沪江基金(Nos. C14002, B14002/D14002)资助

第一作者:易映萍(1967-),女,副教授,硕士,主要研究方向为电力电子. Email: yyp@usst.edu.cn

通讯作者:王玮(1988-),女,硕士研究生,主要研究方向为光电技术. Email: verenaww@163.com

收稿日期:2015-04-21;录用日期:2015-09-23

0 引言

双光束分光光度计广泛应用在工业分析领域^[1],尤其是在医疗卫生、石油化工等领域^[2-3]有着巨大的贡献。

传统双光束分光光度计采用两套光电转换系统,其器件虽然采用相同的型号,但是很难避免由于转换器件个体差异而引起的误差^[4-5].光电二极管的暗电流受温度影响较大,而传统的双光束分光光度计只是在初始化校准时检测一次暗电流信号^[6-7],而在后续参考信号和样品信号的检测中无法检测暗电流信号,因此参考信号、样品信号、暗电流信号在不同时刻进行检测,因外界温度变化也会产生测量误差。

本文设计的正交相关的双光束分光光度计,它只采用一套光电转换系统,包括一个光电二极管、一个信号滤波放大、一个 AD 转换,能够有效地抵消不同器件随温度或时间的变化而产生的非理想特性偏移,例如温漂或老化,因此可以避免由于转换器件个体差异而引起的误差.正交相关的双光束分光光度计增加一个部分直通的旋转的正交信号发生器,使得参考光束和样品光束按照正交序列的方式通过各自的人射位置。

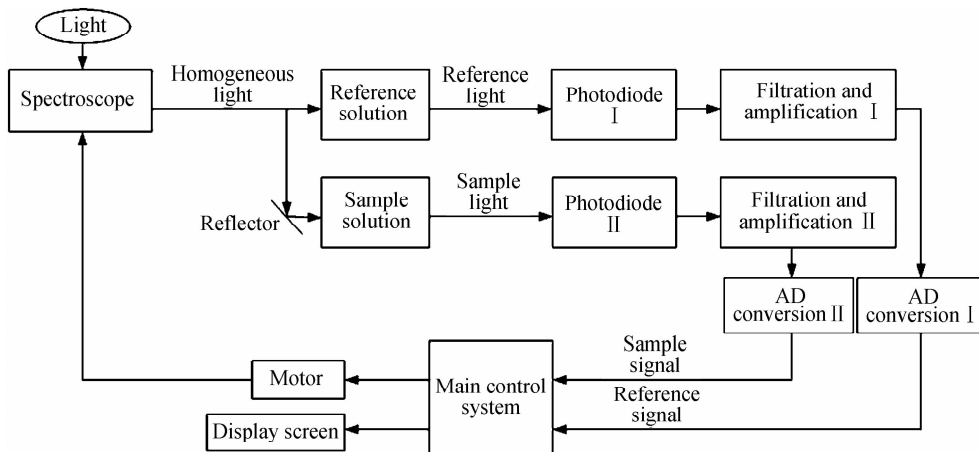


图 1 传统双光束分光光度计原理

Fig. 1 Schematic diagram of the traditional double beam spectrophotometer

正交相关的双光束分光光度计是在传统双光束分光光度计上做的改进,如图 2 所示.正交相关的双光束分光光度计开机初始化之后即开启光源,复合光通过分光系统分离出两束相同的单色光,分别入射到参考比色皿和样品比色皿.之后参考光束入射到正交信号发生器的参考光束入射点(入射点半径为 $K \cdot d$);样品光束入射到样品光束入射点(入射点半径为 d).之后它们同时射到同一套光电转换系统上,依次经过光电二极管、信号滤波放大、AD 转换,输出信号为复合信号 R ,它被输送到主控制系统 FPGA。

有的位置参考光束和样品光束都不通过,此时可以检测到暗电流信号,所以正交信号发生器的每个周期都可以检测到参考信号、样品信号、暗电流信号.其中正交信号发生器是通过正交编码(非周期时分)来区分参考信号、样品信号、暗电流信号,并非按时间来区分,因此保证了三个信号是互不干扰,且对一些周期性的噪声具有抑制作用。

1 正交相关的双光束分光光度计原理

如图 1 所示,传统双光束分光光度计开机初始化之后先检测暗电流信号,之后开启光源,复合光通过分光系统分离出两束相同的单色光,其中参考光束通过参考比色皿,样品光束通过样品比色皿,分别入射到各自的光电转换系统上^[8-9].之后,分别将两个光信号转换成可以检测的电信号.通过对比分析这两个电信号的大小,进而可以分析出两束光的强弱,从而可以计算出被测溶液光的吸收度或透射率^[10-11].其缺点是采用两套光电转换系统,转换器件个体差异会产生测量误差;参考信号、样品信号、暗电流信号在不同时刻进行检测,因外界温度变化也会产生测量误差。

主控制系统 FPGA 根据三个信号的不同编码从复合信号 R 中还原出参考信号、样品信号、暗电流信号,控制系统 FPGA 根据还原出来的三个信号计算出光的吸收度或透射率,并通过显示系统输出计算结果。

其中正交信号发生器采用 Walsh 码组,它是一种同步正交码,具有良好的自相关性和处处为零的互相关性^[12].如图 3 所示,产生高阶码组的规则是将次低级码组放入前三个矩阵位置,将次低级码组的反组放入右下矩阵^[13].图 4 列举了 H_0 、 H_2 、 H_4 的情况,它们行与行之间是正交相关的。

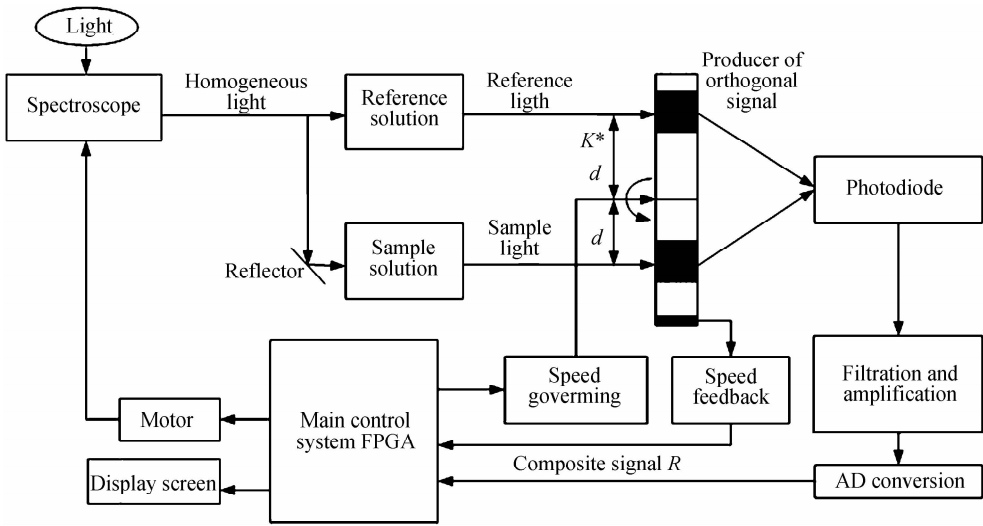


图2 正交相关的双光束分光光度计原理

Fig. 2 Schematic diagram of the orthogonal double beam spectrophotometer

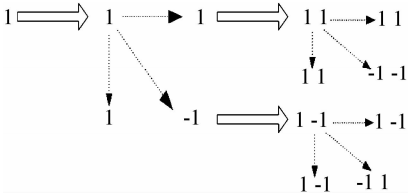


图3 Walsh 码组产生规则

Fig. 3 Generation rule of Walsh codes

$$H_0 = [1] \quad H_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \quad H_4 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \end{bmatrix}$$

图4 $H_0 H_2 H_4$ 码组

Fig. 4 Codes of $H_0 H_2 H_4$

将正交信号发生器等分成 16 份,也可以分成其它份数,只要保证两个序列正交即可.根据 Walsh 码组的产生规则,得到 H_{16} 码组.随机选取 16 阶码组 H_{16} 的第 5 行和第 16 行作为本文正交信号序列编码

$$\begin{cases} H_{16}^5 = [1 & 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1] \\ H_{16}^{16} = [1 & -1 & -1 & 1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 & -1 & 1] \end{cases} \quad (1)$$

可以得到 $H_{16}^5 \times H_{16}^{16} = 0$,即 H_{16}^5 和 H_{16}^{16} 是正交相关的.

在二进制中,若规定 1 代表 1,0 代表 -1,设定参考信号序列 A 对应 H_{16} 的第 5 行,样品信号序列 B 对应 H_{16} 的第 16 行,则 A 和 B 为

$$\begin{cases} A = [1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0] \\ B = [1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1] \end{cases} \quad (2)$$

M 表示 A 和 B 序列对应位置码元相同的个数,则 $M=8$; N 表示 A 和 B 对应位置码元不相同的个数,则 $N=8$. A 和 B 的相关性为^[14]

$$\rho(A, B) = \frac{M - N}{M + N} = 0 \quad (3)$$

即 A 和 B 是正交相关的.

如图 5 所示,光束只能从阴影处通过正交信号发生器,参考光束和样品光束入射位置是固定的,电机带动正交信号发生器顺时针旋转,其最外环开有一个小口作为转速反馈点,在每一个旋转周期都会将其转速情况反馈给主控制系统 FPGA,其根据反馈信号可以实时的控制正交信号发生器的转速.

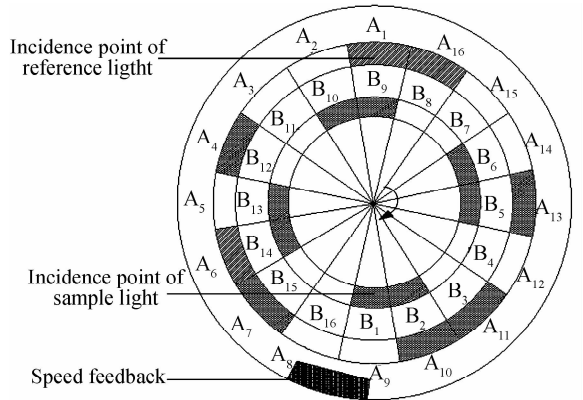


图5 正交信号发生器

Fig. 5 Producer of orthogonal signal

正交信号发生器可以通过光束的位置定义为 1,不可以通过的位置定义为 0.其中 A_1 到 A_{16} 为参考光束入射情况, B_1 到 B_{16} 为样品光束入射情况.参考光束和样品光束都不通过的地方,可以检测到暗电流,采用相同的定义方式,检测到暗电流的位置定义为 1,检测不到的位置定义为 0.则暗电流信号序列 C 为:

$$C = [0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0] \quad (4)$$

说明在每一个周期可以检测四次暗电流信号.理论上暗电流是一个常数,常数与 A 和 B 序列都是正交的,所以 A, B, C 是互不影响的.

综上所述,正交相关的双光束分光光度计可以避免由于转换器件个体差异而引起的误差.正交信号发

生器的每个周期内都可以检测到参考信号、样品信号、暗电流信号,保证了三个信号检测时间的一致性。

2 正交相关的双光束分光光度计采集分析系统

如图 6 所示,参考光束和样品光束通过正交信号发生器之后,两个光束以正交编码序列投射到同一套光电转换系统上,依次通过光电二极管、信号滤波放大

器、AD 转换器,将光信号换转为电信号. 转换得到的电信号就是复合信号 R ,之后主控制系统 FPGA 根据采集的数据和转速反馈信息进行同步校验,检验采集的数据是否为一个周期的量. 若不匹配说明正交信号发生器的转速出现了偏差,因此需要重新调整正交信号发生器的转速并重新测量,该次采集的数据被舍弃. 若校验成功说明采集的数据是有效的,则将采集到的复合信号 R 存储下来供后续分析使用。

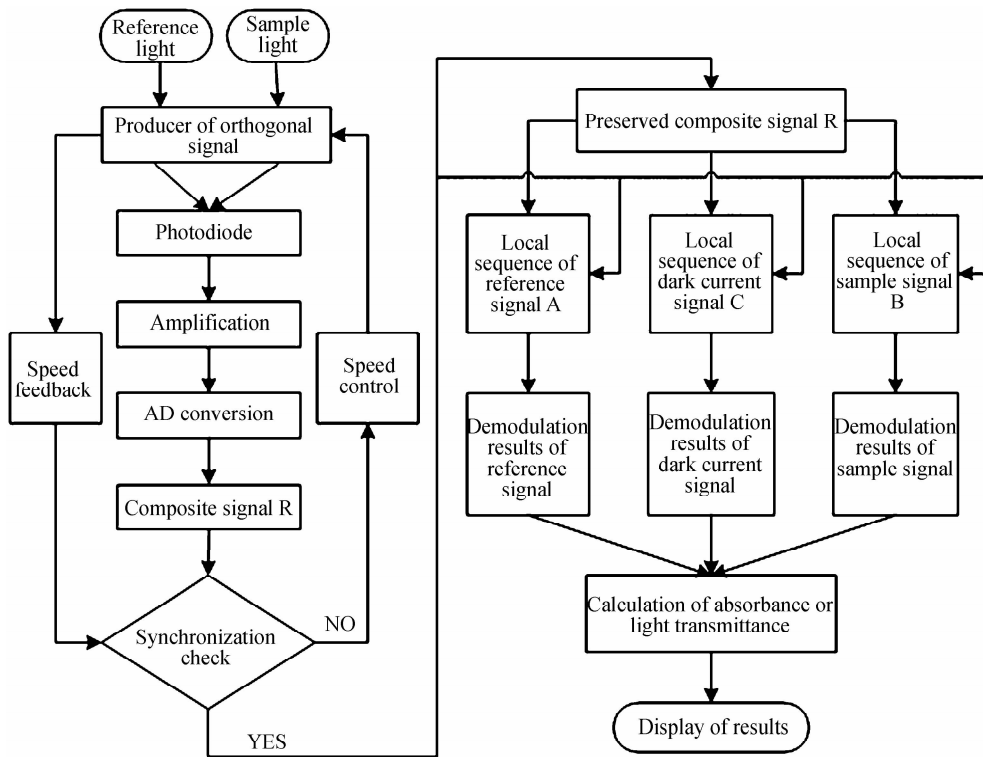


图 6 数据采集分析系统流程

Fig. 6 Flow-chart of data collection and analysis system

主控制系统 FPGA 采用预定编码序列即参考信号本地序列 a、样品信号本地序列 b、暗电流信号本地序列 c 来进行解调. 例如对参考信号进行解调,若有参考光束通过则把该复合信号的值保留,若没有参考光束通过,则舍弃该值,所以可以在 A 序列是 1 的位置定义 a 为 1(即保留该值),在 A 序列为 0 的位置定义 a 为 0(即舍弃该值). 其实 A 和 a 定义方式是一致的,因此 A 和 a 的序列应该是完全相同的,区别是用在了不同的时刻、作用不同. A 是在开始时刻将光信号进行编码,经过中间传输过程之后,后续 a 是将信号进行分离并还原. 为了保证将参考信号毫无失真的还原出来,必须保证 A 和 a 是一致的,所以数据同步检验成功之后,需要及时更新 a 的序列. 样品信号解调,暗电流信号解调采用相同的定义方式,则 a、b、c 为

$$\begin{cases} \mathbf{a}=[1\ 0\ 0\ 1\ 0\ 1\ 1\ 1\ 0\ 0\ 1\ 1\ 0\ 1\ 0\ 0\ 1] \\ \mathbf{b}=[1\ 1\ 0\ 0\ 1\ 1\ 1\ 0\ 0\ 1\ 1\ 0\ 0\ 1\ 1\ 0\ 0] \\ \mathbf{c}=[0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 1\ 0] \end{cases} \quad (5)$$

复合信号 R 是正交信号发生器每旋转一周所采集

的量,说明复合信号 R 包括 16 个时刻的值,每一个时刻都对应各自的编码. 在进行解调的时候,根据编码情况来对每一个时刻的值进行取舍,最后将该周期内的结果累加即可. 解调公式为

$$\begin{cases} S_A = \sum_1^{16} R[i] \times a[i] \\ S_B = \sum_1^{16} R[i] \times b[i] \\ S_C = \sum_1^{16} R[i] \times c[i] \end{cases} \quad (6)$$

式中 R 为一个周期采集的复合信号,一共包括 16 个值, S_A 、 S_B 、 S_C 分别表示该周期解调出来的参考信号值、样品信号值、暗电流信号值. 解调出来的参考信号值 S_A 、样品信号值 S_B 都包括暗电流信号值 S_C ,需先将暗电流信号值 S_C 先减掉,得到实际参考信号 I_o 和样品信号 I_i , I_o 和 I_i

$$\begin{cases} I_o = S_A - S_C \\ I_i = S_B - S_C \end{cases} \quad (7)$$

根据朗伯-比尔定律可以得到光的吸收度 A 或光

的透射率 T 为

$$\begin{cases} A = \log \frac{I_0}{I_t} = \log \frac{1}{T} = -\log T \\ T = \frac{I_t}{I_0} \end{cases} \quad (8)$$

3 Matlab/Simulink 仿真

本文采用 Matlab/Simulink 来仿真分析传统的双光束分光光度计和正交相关的双光束分光光度计^[15], 将两种算法进行对比分析。

3.1 传统双光束分光光度计仿真系统

如图 7 所示, Light 模拟单光束光强为 1, 参考光束和样品光束的光强都为 0.5. 设样品光束通过样品比色皿被吸收掉 0.2, 透射率 $Gain = 0.8$, 暗电流值为 0.01, Sine Wave 是振幅为 0.001 频率为 50 Hz 的正弦波暗电流干扰信号, 即暗电流的波动率为 10%. Add₁ 和 Add₂ 模拟两个光电二极管. 设定信号放大倍数为 2. 其中 Dark Light Test 是初始化的时候测量的暗电流值, 设定为 0.01. 之后将数据代入公式计算光的透射率 T 并输出显示。

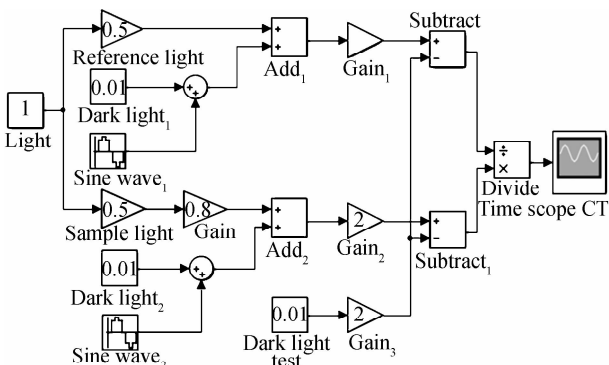


图 7 传统的双光束分光光度计仿真图

Fig. 7 Simulation of the traditional double beam spectrophotometer

如图 8 所示, 透射率 T 的范围是 0.797~0.803, 与之前设定的透射率 0.8 相比, 相对误差是 0.37%. 由于暗电流的波动率为 10%, 所以导致输出结果在一定范围内波动. 输出结果呈现正弦波动主要是因为加入

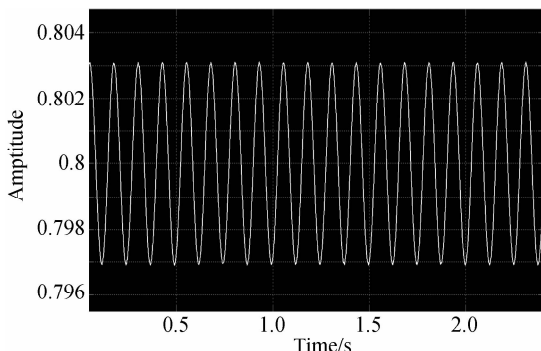


图 8 传统的双光束分光光度计仿真结果

Fig. 8 Simulation results of the traditional double beam spectrophotometer

的暗电流干扰信号是正弦信号, 所以透射率的波动主要是由两个暗电流波动引起的。

3.2 正交相关的双光束分光光度计仿真系统

如图 9 所示, 光路仿真设置与传统双光束分光光度计相似. 不同点是参考信号乘以序列 A, 这样得到的信号是经过编码的参考信号. 同理样品信号乘以序列 B 之后得到的是经过编码的样品信号。

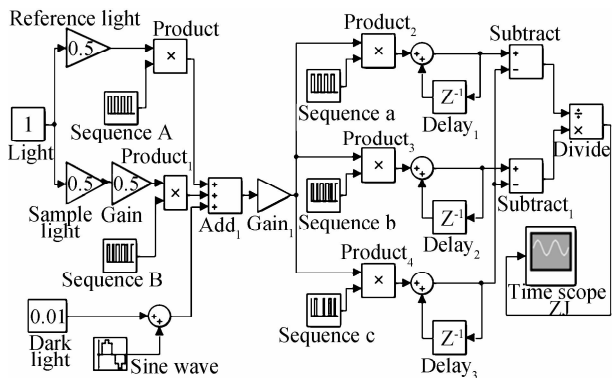


图 9 正交相关的双光束分光光度计仿真图

Fig. 9 Simulation of the orthogonal double beam spectrophotometer

将采集到的复合信号分别与本地序列 a、b、c 做乘积, 分别分离并还原出参考信号、样品信号、暗电流信号. 每个分离还原出来的值经过延时 (Delay) 并累加起来, 得到它们各自的总和, 将数据代入式 (8) 计算出透射率 T 并输出显示。

主控制系统 FPGA 可以实时高效地处理数据, 其机器周期至少是 50 MHz, 并行处理能力强, 且平均滤波阶数高, 数据处理速度快, 使正交相关的双光束分光光度计的透射率能够很快稳定在一个恒定值上, 见图 10. 输出透射率 $T = 0.7999$, 相对误差为 0.013%. 比较可得, 传统双光束分光光度计相对误差是正交相关的双光束分光光度计的 28 倍. 在整个仿真过程中加入暗电流 Sine Wave 的干扰没有影响到最后的输出结果, 因此正交相关的双光束分光光度计测量结果更加稳定。

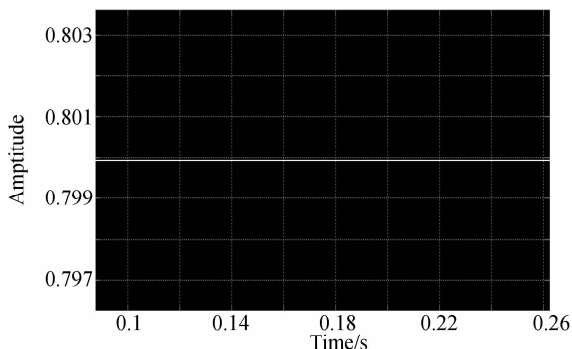


图 10 正交相关的双光束分光光度计仿真结果

Fig. 10 Simulation results of the orthogonal double beam spectrophotometer

仿真过程中设暗电流波动是正弦信号,正负误差被抵消,使得传统双光束分光光度计透射率平均值是0.8。但在实际情况中,暗电流波动是无法预料的,并不像仿真结果那么理想,精度会有所下降,而正交相关的双光束分光光度计的透射率平均值一直为0.799 9,其测量精度更高。

对比分析可知,正交相关的双光束分光光度计测量结果与理论值相吻合,提高了仪器的稳定性和测量精度,说明该算法是可行的。

4 实验验证

选用 Altera Cyclone144C8 为主控制系统^[16],西门子 BPW21 光电二极管为光电转换器件,ADS1255 为模数转换器件。如图 11 所示,盒子内部为模拟光源部分,工作时将盒子完全密封以防止外面的光透进去。传统双光束分光光度计主要包括一个电源板、两个光电转换板、两个 AD 转换板和一个 FPGA 板。通过控制激光器的电压来控制光强度,模拟光源。参考光束电压为 5V,样品光束电压为 4V,其他参数与仿真设定一致。在传统双光束分光光度计中,采用两套光电转换系统和两个 AD 转换板分别将参考信号和样品信号转换为电信号输送给 FPGA。



图 11 传统双光束分光光度计整体结构
Fig. 11 Construction of the traditional double beam spectrophotometer

FPGA 对采集的信号进行分析计算并通过串口输出,图 12 为串口采集到的 100 个分析结果,该结果是样品信号与参考信号之比,平均值为 74%,数据结果波动较大,与理论值 80%相距较远。



图 12 传统的双光束分光光度计的输出结果
Fig. 12 Results of the traditional double beam spectrophotometer

图 13 为正交信号发生器的硬件电路图,与传统的不同之处就是增加了一个正交信号发生器,只采用一个光电转换器件和一个 AD 转换器件。其中正交信号发生器用步进电机控制其转速。设参考光束电压为 5V,样品光束电压为 4V。通过正交信号发生器将参考

光束和样品光束按照不同的编码形式输送到光电转换系统上,再经过 AD 转换器件将复合信号输送到主控芯片 FPGA。

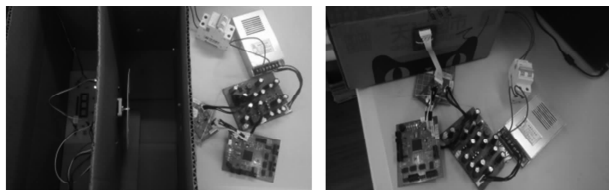


图 13 正交相关的双光束分光光度计整体结构
Fig. 13 Construction of the orthogonal double beam spectrophotometer

FPGA 对采集的数据进行分析计算,并将结果通过串口输出显示。图 14 为串口采集到的 100 个转换结果,该结果是样品信号与参考信号之比,其平均值为 78%,正交信号发生器采集到的数据波动较小,接近理论值 80%。



图 14 传统的双光束分光光度计的输出结果
Fig. 14 Results of the orthogonal double beam spectrophotometer

由实验对比分析可知,正交相关的双光束分光光度计在稳定性和精度上比传统双光束分光光度计有优势。

5 结论

综上所述,传统的双光束分光光度计由于采用两套光电转换系统、信号采集时间不一致等原因,导致测量结果波动性较强、精度低。而正交相关的双光束分光光度计仅使用一套光电转换系统,并增加一个正交信号发生器,且每一个正交信号发生器的周期都可以采集参考信号、样品信号、暗电流信号,避免了由于转换器件个体差异和检测时间的不同而产生的测量误差,提高了仪器的稳定性和测量精度。

参考文献

[1] HUANG Mei-zhen, NI Yi, LING Feng, *et al.* Development of high speed UV-Vis spectrophotometer [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2005, **25**(6):938-941
黄梅珍,倪一,林峰,等. 高速紫外-可见分光光度计的研制[J]. *光谱学与光谱分析*, 2005, **25**(6): 938-941.
[2] de LIMA K M G . A portable photometer based on LED for the determination of aromatic hydrocarbons in water [J]. *Microchemical Journal*, 2012, **103**:62-67.
[3] ZHAO Heng, WANG Yan-wu, An improved design of spectrophotometer with double beam [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011: 6-22.
赵恒,王燕舞. 一种改进型双光束分光光度计的设计[D]. 武

- 汉:华中科技大学硕士论文,2011:6-22.
- [4] WANG Feng, SUN Hong-wei, FAN Shi-fu, *et al.* Design of a portable UV-Vis spectrophotometer [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2006, **26**(4): 779-783.
万峰,孙宏伟,范世福,等.便携式紫外-可见分光光度计的设计[J]. *光谱学与光谱分析*, 2006, **26**(4): 779-783.
- [5] HUO Jian-wei, MA Hai-tao, WANG Li-qiu, *et al.* Spectrophotometer for full-auto-biochemical analyser [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2003, **11**(5): 457-460.
霍建伟,马海涛,王立秋,等.全自动生化分析医用分光光度计[J]. *光学精密工程*, 2003, **11**(5): 457-460.
- [6] REN Zhong, LIU Guo-dong, HUANG Zhen, *et al.* Spectrophotometer for bio-chemical analyser based on automatic adjustment of CCD integration time [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(5):586-591.
任重,刘国栋,黄振,等.基于 CCD 积分时间自动调节的生化分析仪用分光光度计的研究[J]. *光子学报*, 2013, **42**(5):586-591.
- [7] SHI Man-man, HUANG Mei-zheng. Design of a mini fast scanning near infrared spectrophotometer [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2011: 7-12.
施嫚嫚,黄梅珍.小型快速扫描近红外分光光度计的研制[D].上海:上海交通大学硕士学位论文,2011:7-12.
- [8] DING Zhi-qun, LIU Wen-qing, LI Hing-bin, *et al.* Single chip computer based implementation of data acquisition for Infra-violet Visible Light Spectrometer [J]. *Process Automation Instrumentation*, 2005, **26**(9): 37-39.
丁志群,刘文清,李宏斌,等.紫外可见分光光度计数据采集的单片机实现[J]. *自动化仪表*, 2005, **26**(9): 37-39.
- [9] ZARATE N, OLMOS-PéREZ R, REIS B F. Turbidimetric determination of sulfate in rain water employing a LED Based photometer and multicommutated flow analysis system with in-line preconcentration [J]. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 2011, **22**: 1009 - 1014.
- [10] LIU Jian-peng, TANG Yi. Design method of optical system of improved Czerny-Turner imaging spectrometer [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **32**(3):1-7.
刘健鹏,唐义,等.改进型 Czerny-Turner 成像光谱仪光学系统设计方法[J]. *光子学报*, 2012, **32**(3):1-7.
- [11] JIN Rui-ying, CHEN Zhi-ming. Photoelectric characteristics of SiC1-x Gex /SiC heterojunction diode [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(2):205-208.
靳瑞英,陈治明. SiC1-x Gex /SiC 异质结光电二极管特性的研究[J]. *光子学报*, 2005, **34**(2):205-208.
- [12] JI Jian-hua, TIAN Jing-jing, MO Hao-ran, *et al.* A new family of two-dimensional optical orthogonal codes and its performance analysis [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2007, **34**(5):. 667-670.
吉建华,田晶晶,莫浩然,等.一种新的二维光正交码及其性能分析[J]. *中国激光*, 2007, **34**(5):667-670.
- [13] FU Xiao-mei, YU Jin-long, WANG Wen-rui, *et al.* The characteristics of two-dimension optical orthogonal code encoding OCDMA communication with bragg grating arrays [J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2005, **16**(12):1460-1462.
付晓梅,于晋龙,王文睿,等.二维光正交码编码光码分多址系统研究[J]. *光电子·激光*, 2005, **16**(12):1460-1462.
- [14] KNUTSEN P M, AHISSAR E. Orthogonal coding of object location[J]. *Trends in Neurosciences*, 2008, **32**(2): 101-109.
- [15] 张立科. MATLAB7.0 从入门到精通[M]. 2版.北京:人民邮电出版社,2010:248-307.
- [16] XIN Wen-hui, LI Shi-shun, HUA Deng-xin, *et al.* Design of a high-speed data acquisition system based on FPGA for laser Radar [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(8):967-971.
辛文辉,李仕春,华灯鑫,等.基于 FPGA 的激光雷达高速数据采集系统设计[J]. *光子学报*, 2012, **41**(8):967-971.