

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2106345

用于太赫兹时域光谱系统的锁定放大电路*

何 徽¹ 钟森城¹ 李 江¹ 温伟峰¹ 张朝惠² 初文怡² 管玉超²

(1. 中国工程物理研究院 流体物理研究所 绵阳 621900; 2. 青岛青源峰达太赫兹科技有限公司 青岛 266100)

摘要: 针对日前商用锁定放大器在太赫兹光谱测量中存在的功能冗余、体积庞大、价格昂贵等问题,设计了一种精简的锁定放大电路。该电路采用基于 ARM Cortex-M3 内核的 STM32 微控制器产生相对相位可编程控制的斩波信号和参考信号,结合平衡调制/解调器 AD630 实现锁定放大功能。基于诺顿等效定理提出了一种电流输入型锁定放大器测试系统,实现电流输入型锁定放大器的性能评估。经测试,设计的锁定放大电路最大相对误差仅 0.56%,动态范围达到 84.2 dB。测试结果表明,该锁定放大电路满足太赫兹时域光谱系统中的应用需求。该锁定放大电路尺寸仅 85×85 mm²,可通过串口指令编程控制参考信号相位、锁定放大增益和积分时间,并完成数据采集,便于系统集成应用。

关键词: 太赫兹时域光谱;锁定放大器;参数程控;系统集成

中图分类号: TN710 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1010

Lock-in amplifier for THz-TDS system

He Hui¹ Zhong Sencheng¹ Li Jiang¹ Wen Weifeng¹ Zhang Zhaohui² Chu Wenyi² Guan Yuchao²

(1. Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China;

2. Qingdao Quenda Terahertz Technology Co., Ltd., Qingdao 266100, China)

Abstract: In present terahertz spectrum measurement, the commercial lock-in amplifier for signal detection has disadvantages such as function redundancy, bulky size and high price. A simplified lock-in amplifier circuit was designed in view of these disadvantages. The circuit uses a STM32 controller based on ARM Cortex-M3 generating chopper signal and reference signal with programmable relative phase, driving a balanced modulator/demodulator to realize lock-in amplification. A test system for current mode lock-in amplifiers was proposed based on the Norton's theorem to evaluate the performance of the designed lock-in amplifier. Test results show that the maximum relative error of designed lock-in amplifier is only 0.56%, and the dynamic range reaches up to 84.2 dB, which means that the designed circuit meets the requirement in THz-TDS system. The size of the designed lock-in amplifier circuit is only 85×85 mm². Through a RS232 port, the reference signal phase, system gain and time constant can be programmed and the data acquisition can also be completed, which is convenient for integration and application for THz-TDS system.

Keywords: THz-TDS; lock-in amplifier; parameter programming; system integration

0 引 言

在太赫兹时域光谱系统中,光电导天线接收太赫兹回波信号输出的电流极为微弱,通常在纳安量级,利用锁定放大器进行信号检测是提升光谱信噪比的一种常用方法。目前商用的锁定放大器功能冗余、体积庞大、价格昂贵,不利于系统集成^[1-3]。为实现太赫兹时域光谱系统的仪器化、小型化,需要研制体积小、使用简单、动态范围大、参数可编程设置的锁定放大器。太赫兹时域光谱仪中采用的锁定放大

器需要对光电导天线返回的弱电流信号进行检测,因此多为电流放大型,而微弱电流信号发生器较为少见,通常采用微弱电压信号作为输入对锁定放大器进行测试(要求锁定放大器支持电压输入模式)^[2-6],如何产生微弱电流信号以单独对电流型锁定放大器进行性能评估,也是太赫兹时域光谱仪和锁定放大器研制工作中需要解决的问题^[7]。

针对上述问题,本文在对锁定放大技术原理,及其在太赫兹时域光谱仪中的应用场景分析的基础上,提出了一种精简的锁定放大电路结构。采用基于 ARM Cortex-M3 内

收稿日期:2021-04-09

* 基金项目:国家重点研发计划(2020YFA0714001)资助

核的 STM32 微控制器作为主控,产生相对相位可编程控制的斩波信号和相敏检测参考信号,结合有源滤波电路及模拟开关实现锁定放大增益和积分时间的可编程控制,并控制模数转换器完成采集电压的数字化。基于诺顿等效定理提出了一种电流型锁定放大器测试系统,用锁定放大器输出的斩波信号同步信号发生器,信号发生器输出方波电压经 $10\text{ M}\Omega$ 电阻输入锁定放大器,可等效为微弱电流输入信号,实现电流型锁定放大器的性能评估。

本文研制的锁定放大电路尺寸仅 $85\times 85\text{ mm}^2$,最大相对误差仅 0.56% ,动态范围达到 84.2 dB ,其参考信号相位、锁定放大增益和积分时间均可通过串口指令编程控制,并且可通过串口完成数据采集,便于系统集成。

1 锁定放大器基本原理

锁定放大器通常用于检测直流或慢变信号,先将待测信号调制为交流信号,对交流信号进行放大,经过相敏检测和低通滤波后还原得到放大后的待测信号。锁定放大器避免直接对直流或慢变信号进行放大,因此可有效避免 $1/f$ 噪声和直流放大器的直流漂移对检测结果的不利影响^[8-11]。其通过位于输出端的低通滤波器实现窄带化过程,可极大地滤除宽带噪声,改善信噪比。

锁定放大器的基本原理如图 1 所示。在利用锁定放大器检测信号之前必须对待测信号进行调制。设待测信号 V_s 为直流或慢变信号,被载波 $\cos(\omega_0 t)$ 调制后的锁定放大器输入信号为:

$$x_i(t) = V_s \cos(\omega_0 t) \quad (1)$$

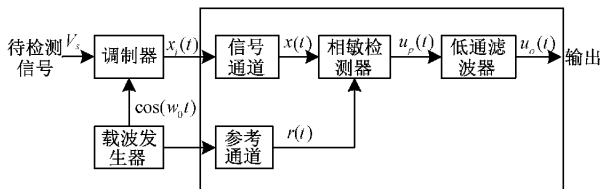


图 1 锁定放大器基本原理

在锁定放大器内部,信号通道对输入信号进行放大、滤波。设信号通道在频率 ω_0 处的增益为 α ,相移为 θ_1 ,则信号通道的输出信号为:

$$x(t) = \alpha V_s \cos(\omega_0 t + \theta_1) \quad (2)$$

输入的参考信号频率和待测信号的调制频率相同,参考通道可对参考信号的幅度和相位进行调整,设参考通道输出为:

$$r(t) = V_r \cos(\omega_0 t + \theta_2) \quad (3)$$

相敏检测器通常是一个乘法器,其输出信号为:

$$u_p(t) = 0.5\alpha V_s V_r \cos(\theta_1 - \theta_2) + 0.5\alpha V_s V_r \cos(2\omega_0 t + \theta_1 + \theta_2) \quad (4)$$

经过低通滤波器后,上式中的和频分量被滤除,输出信号为:

$$u_o(t) = 0.5\alpha V_s V_r \cos(\theta_1 - \theta_2) \quad (5)$$

由上可知,锁定放大器的输出正比于待测信号,同时正比于被测调制信号与参考信号的相位差的余弦函数。当 $\theta_1 - \theta_2 = 0$ 时,输出信号最大。

2 电路设计

2.1 总体方案

根据锁定放大器的基本原理和太赫兹时域光谱仪对信号采集的需求,按照精简原则设计锁定放大电路。在太赫兹时域光谱仪中,斩波信号可由仪器自身产生,但其必须和锁定放大器的参考信号同源^[12],因此可将图 1 中的载波信号发生器纳入锁定放大器内部,由锁定放大器内部的主控制器顺带实现,省去了图 1 中的参考通道,实现了斩波信号和本地参考信号同源且相位可编程控制,避免了设计数字移相器的麻烦^[13-16];光电导天线输出的信号为微弱电流信号,因此信号通道前级采用具有 I-V 转换功能的跨阻放大器;为方便仪器集成,采用 ADC 电路直接将检测到的电压数字化,随后由主控制器上传;为适应不同的输入信号强度,在多个增益环节加入增益编程控制功能;为灵活满足不同用户对采集时间和信噪比的权衡取舍,在低通滤波器环节加入带宽编程控制功能,使积分时间程控可调。

设计的锁定放大电路结构如图 2 所示。跨阻放大器来自光电导天线的电流信号转换为电压信号并提供增益;带通滤波器的中心频率与斩波信号相同;相敏检测器利用本地参考信号将有用信号检出,但其输出信号中混有斩波频率 2 倍频分量;低通滤波器滤除 2 倍频分量,得到恢复后的待测信号,并对其幅度进行调节;模数转换器在主控制器的控制下将待测信号数字化;主控制器输出二路方波信号,一路作为斩波信号输出,另一路作为本地参考信号;主控制器通过 RS232 接口接收来自计算机的命令,对其输出的二路方波信号之间的相对相位进行设置;主控制器还根据接收到的命令对跨阻放大器的增益、低通滤波器的增益和带宽进行设置;主控制器的另一项工作是产生模数转换器工作时序,采集数字化后的数据,并通过 RS232 接口上传至计算机。

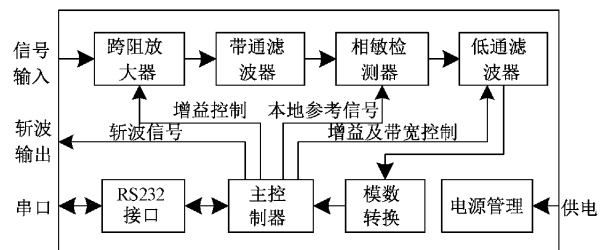


图 2 设计的锁定放大器电路结构

2.2 相位可编程载波信号发生电路

将载波信号发生电路纳入锁定放大器内部,省去了设计数字移相器的麻烦,这是针对锁定放大器在太赫兹时域光谱系统中的应用所作的精简设计。

载波信号发生电路需要产生二路相对相位可编程控制的方波信号,其中一路作为斩波信号输出,另一路作为本地参考信号提供给相敏检测器。为了尽量减小电路板尺寸和功耗,避开了使用 CPLD 或 FPGA 等可编程逻辑器件的方案,而利用主控制器中的锁相环、定时器等外设实现载波信号产生及相位编程控制。

主控制器采用意法半导体公司的 STM32 系列微控制器,为了实现相位可编程控制的二路方波输出,按图 3 所示配置其内部的锁相环、定时器及时钟链路。采用高稳定度的 8 MHz 外部晶振,通过锁相环倍频,AHB 和 APB1 预分频器分频后,送入定时器 TIM2,在 TIM2 内部经过预分频后驱动 CNT 计数器,计数值和比较寄存器比较后输出方波信号。通过编程设置比较寄存器的值可实现斩波信号和参考信号的相对相位控制。

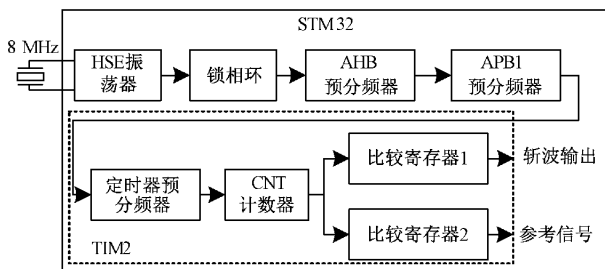


图 3 载波信号发生电路原理

2.3 相敏检测电路

相敏检测采用 ADI 公司的高精度平衡调制/解调器 AD630 实现。AD630 内部包含两个增益相同的放大器,分别配置为同相放大和反相放大,其内部还有一个电子开关,在输入参考信号的控制下将输出配置为同相放大输出和反相放大输出。当参考信号占空比为 50% 时,AD630 的输出等效于将输入信号乘以幅度为 ± 1 、相位与参考信号相同的方波,因此具有相敏检测功能。该方案具有电路简单、成本低、运行速度快,以及动态范围大等优点。图 4 所示为相敏检测器在相位失配和相位匹配时的输出波形对比。

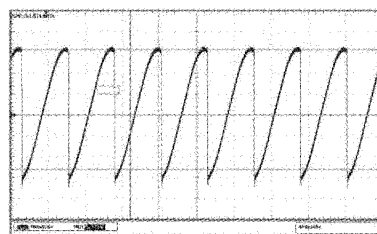
3 实验测试

3.1 测试系统

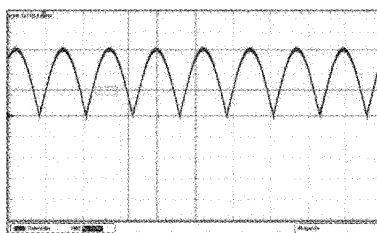
本文设计的锁定放大电路用于对微弱电流信号进行检测。限于实验室没有可产生微弱电流信号的设备,采用等效法对电路进行测试:根据诺顿等效定理,电压源和电阻的串联可等效为电流源和电阻的并联。因此,按图 5 所示搭建测试系统。用锁定放大器输出的斩波信号同步信号发生器,使信号发生器输出频率 10 kHz、相位和斩波信号一致的方波电压信号。该电压信号经 10 M Ω 电阻输入锁定放大器,可等效为方波电流输入。设方波电压信号幅度为 α V,则等效电流幅度为 100 α nA。

3.2 输入-输出关系曲线

调节信号源输出的方波信号幅度,令其从 -1.3 V 按



(a) 相位不匹配



(b) 相位匹配

图 4 相敏检测电路输出波形

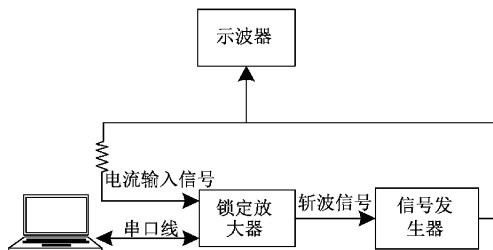


图 5 锁定放大器测试系统

照 0.1 V 步进逐渐增加至 +1.3 V,可等效地认为锁定放大器输入电流幅度从 -130 nA 以 10 nA 步进变化至 +130 nA,同时用示波器对信号发生器输出信号进行监测,以获得锁定放大器输入信号幅度的精确值。

通过计算机串口采集在不同输入幅度下对应的锁定放大器输出,得到的数据如表 1 所示(注:表中的电压数据以示波器实测值为准)。用表 1 中的数据作线性拟合,得到图 6 所示曲线。图中,“*”号表示表 1 中实测得到的数据点,不难看出在首尾两个数据点处锁定放大器的 ADC 已饱和。利用其余数据点作线性拟合,得到图中直线所示的拟合直线,其斜率为 0.081 49,可知在当前参数配置下该锁定放大器的电压/电流增益为 8.149×10^7 V/A。

将实测的锁定放大器输出电压减去理想电压(即拟合直线在相应横坐标上的值),得到误差电压,如图 7(a)所示。用误差电压除以理想电压得到相对误差,如图 7(b)所示。由图可知最大误差电压为 0.035 39 V,最大相对误差为 0.56%。

3.3 输出动态范围

锁定放大器的输出动态范围定义如下:

$$DR = 20 \lg \frac{FS}{MDS} \text{ (dB)} \quad (6)$$

其中,FS 是指满刻度输出时的输入电平,可由锁定放

表 1 锁定放大器输入-输出关系测试数据

序号	输入电压/V	等效电流/nA	检测输出/V
1	-1.303 0	-130.30	-10.000 0
2	-1.204 0	-120.40	-9.815 0
3	-1.100 0	-110.00	-8.997 0
4	-1.008 0	-100.80	-8.178 0
5	-0.904 3	-90.43	-7.360 0
6	-0.802 0	-80.20	-6.542 0
7	-0.704 6	-70.46	-5.724 0
8	-0.603 4	-60.34	-4.906 0
9	-0.502 7	-50.27	-4.090 0
10	-0.401 8	-40.18	-3.271 0
11	-0.301 3	-30.13	-2.454 0
12	-0.200 9	-20.09	-1.637 0
13	-0.100 2	-10.02	-0.818 8
14	0.100 2	10.02	0.817 6
15	0.200 9	20.09	1.636 0
16	0.301 4	30.14	2.453 0
17	0.400 4	40.04	3.271 0
18	0.502 7	50.27	4.090 0
19	0.602 8	60.28	4.907 0
20	0.702 1	70.21	5.726 0
21	0.802 0	80.20	6.543 0
22	0.904 0	90.40	7.362 0
23	1.008 0	100.80	8.181 0
24	1.100 0	110.00	9.000 0
25	1.204 0	120.40	9.818 0
26	1.303 0	130.30	9.989 0

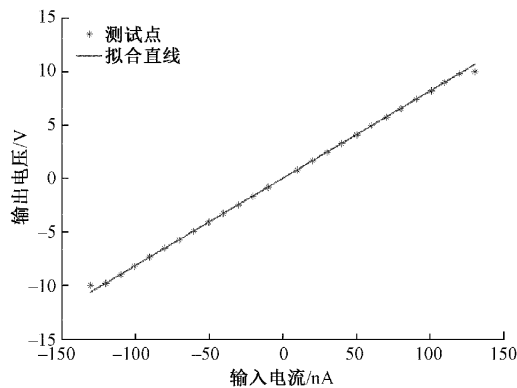


图 6 锁定放大电路的输入-输出关系曲线

大器的线性输出电压范围 VR 除以增益 α 得到:

$$FS = \frac{VR}{\alpha} \quad (7)$$

MDS 为最小可测信号,可由锁定放大器的时间漂移 TDR 除以增益 α 得到:

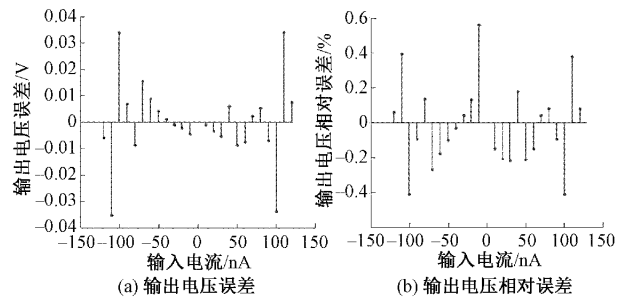


图 7 锁定放大电路的误差分析

$$MDS = \frac{TDR}{\alpha} \quad (8)$$

所以,在实际测试时动态范围可由下式计算:

$$DR = 20 \lg \frac{FS \cdot \alpha}{MDS \cdot \alpha} = \frac{VR}{TDR} \text{ (dB)} \quad (9)$$

待锁定放大器加电稳定后向锁定放大器输入固定幅度的信号,连续记录锁定放大器输出,得到的结果如图 8 所示。由图 8 可知,锁定放大器输出电压在 30 min 内的时间漂移为 1.2 mV,故上式中 TDR 取 1.2 mV。

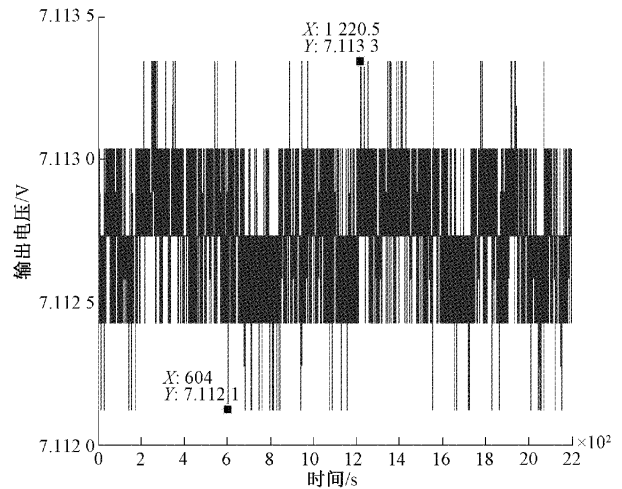


图 8 锁定放大电路的时间漂移

由 3.2 小节可知,锁定放大器的线性输出电压范围覆盖 $-9.815 \sim 9.818$ V 区间,即 $VR > 19.6$ V,这里取 19.6 V。代入上式,可得研制的锁定放大器动态范围为 84.3 dB。

3.4 太赫兹时域光谱测试

按图 9 所示搭建太赫兹时域光谱测试平台,将研制的锁定放大电路用于太赫兹时域光谱测试。光纤飞秒激光器发出两束飞秒激光,一束作为泵浦光源,另一束作为探测光源;泵浦光经光纤传输到发射天线上,在偏置电压的作用下产生宽带太赫兹波,该太赫兹波经太赫兹透镜组聚焦后照射到检测目标上,目标透射的太赫兹波用太赫兹接收天线接收;飞秒激光器发出另一束探测光经光纤传输到太赫兹接收天线上产生光生载流子,在太赫兹波作用下产生电流信号;利用研制的锁定放大器对微弱电流信号进行采集,得

到的太赫兹时域波形及频谱分析结果如图 10 所示。

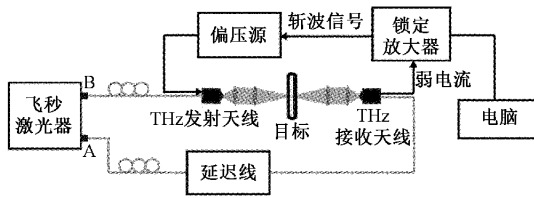


图 9 太赫兹时域光谱测试平台

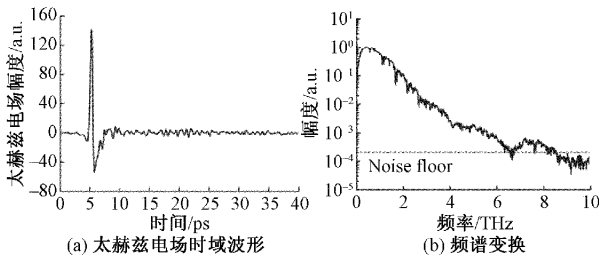


图 10 测得的太赫兹电场幅度的时域波形及其频谱变换

从图 10 可看出,在太赫兹时域光谱系统中采用本文设计的锁定放大器能采集到高质量的太赫兹时域脉冲信号。从频域看,整个太赫兹时域光谱系统的动态范围到达了 79 dB,比单独测得的锁定放大器动态范围(84.3 dB)略低,这是由于系统中还有光电导天线和高精度延迟线等可能引入噪声的环节,可通过优化光路和高精度延迟线等措施进一步提升整机动态范围。

4 结 论

在对锁定放大技术原理,及其在太赫兹时域光谱仪中的应用场景分析的基础上,提出了一种精简的锁定放大电路结构,并设计了锁定放大电路。基于诺顿等效定理提出了一种电流放大型锁定放大器测试系统,采用一般的信号发生器和示波器即可单独对电流型锁定放大器的性能进行测试。设计的锁定放大电路尺寸仅 $85 \times 85 \text{ mm}^2$,最大相对误差仅 0.56%,动态范围达到 84.2 dB,其参考信号相位、锁定放大增益和积分时间均可通过串口指令编程控制,并且可通过串口完成数据采集,便于系统集成。

参考文献

[1] 蒋鹏,赵国忠. TDS 用锁相放大器电路设计[J]. 电子测量技术,2012,35(4): 24-28.

- [2] 黄战华,龙宁波,何明霞,等. 可编程 THz-TDS 锁相放大技术[J]. 光电工程,2015,42(7):7-11.
- [3] 熊显名,张海申,韩家广,等. 太赫兹测试系统中锁相放大电路的设计[J]. 电测与仪表,2017,54(7):89-93.
- [4] 杨鹏飞,肖鹏,张诸宇,等. 一种基于锁相放大器的微弱信号检测方法[J]. 无线电通信,2018,44(6):597-600.
- [5] 厉佳男,黄瑞. 基于相敏检波技术的锁相放大器[J]. 工业控制计算机,2016,29(10):137-138,145.
- [6] 李敏,韦铭远,刘俊. 锁相放大器实验平台[J]. 实验技术与管理,2020,37(11):125-130.
- [7] 郑杰,刘超,胡成立,等. 基于数字锁相的微型浊度检测仪研究[J]. 电子测量技术,2020,43(6):77-82.
- [8] 叶硕,夏振华. 精密锁相放大电路的设计与实现[J]. 化工自动化及仪表,2018,45(6):467-470.
- [9] 王力,施芸城,杨忠杰,等. 基于 LabVIEW 的锁相放大器的设计与测量[J]. 物理实验,2015,35(9):33-36.
- [10] 姚国生,孙志斌,李培刚,等. 基于微弱交流信号检测的锁相放大系统设计[J]. 工业控制计算机,2017,30(1):134-135.
- [11] 熊平波,叶哲江. 基于 MSP430 的数字锁相放大器测温系统设计[J]. 电子测量技术,2019,42(14):1-5.
- [12] 胡华,钟杰. 新型锁相放大器的设计[J]. 电子测量技术,2014,37(8):15-18.
- [13] 杨朝霞. 相位可调可编程数字移相器的设计[J]. 自动化与仪器仪表,2016(6):205-207.
- [14] 高国旺,段鹏伟,陈凯莉,等. 基于 AD630 的锁相放大器的设计及应用[J]. 信息记录材料,2020,21(2):198-199.
- [15] 张洗玉,杨鹏,张琛其,等. 基于锁相放大原理的微弱信号检测装置的研制[J]. 中国仪器仪表,2019(9):62-66.
- [16] 朱革,余小雨,付敏,等. 高精度自适应数字移相方法研究[J]. 电子测量与仪器学报,2020,34(2):107-114.

作者简介

何徽,工学硕士,工程师,主要研究方向为太赫兹光谱/成像系统中的信号检测、变像管扫描成像技术等。

E-mail:40763529@qq.com

温伟峰(通信作者),工学硕士,高级工程师,主要研究方向为高速摄影技术与系统、瞬态超快光电测试诊断技术等。

E-mail:pleague@126.com