

DOI:10.13875/j.issn.1674-0637.2019-01-0007-05

基于声光调制技术的光电探测器响应带宽测量方法^{*}

杨帆^{1,2,3}, 王心亮^{1,2}, 阮军^{1,2}, 张首刚^{1,2}

(1. 中国科学院 国家授时中心, 西安 710600;

2. 中国科学院 时间频率基准重点实验室, 西安 710600;

3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 响应带宽是描述光电探测器频率响应特性的重要参数, 它表征了光电探测器对不同频率光信号的响应能力。研究基于声光调制技术的光电探测器响应带宽测量, 通过对激光功率进行调制, 应用自研光电探测器对调制后的激光进行探测并记录输出波形, 最后对波形数据做傅里叶频谱分析, 可以确定光电探测器的响应带宽。该方法操作简单, 可适用于 10 kHz 以下各种低响应频率光电探测器。

关键词: 响应带宽; 光电探测器; 声光调制; 频谱分析

Measurement of response bandwidth of photoelectric detector based on acousto-optic modulation technology

YANG Fan^{1,2,3}, WANG Xin-liang^{1,2}, RUAN Jun^{1,2}, ZHANG Shou-gang^{1,2}

(1. National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;

2. Key Laboratory of Time and Frequency Primary Standards, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Response bandwidth is a significant parameter which is used to describe the frequency response characteristics of the photoelectric detector. It indicates the ability of photoelectric detectors to respond to various frequencies of the optical signal. Acousto-optic modulation technology is used for laser modulation, the photoelectric detector is used to detect and record the output waveforms. Finally, Fourier spectrum analysis was done on the waveform dates, and the response bandwidth of the photoelectric detector could be determined according to the spectrums. The method is simple to operate and can be applied to various low response frequency photoelectric detectors under 10 kHz.

Key words: response bandwidth; photoelectric detector; acoustic-optic modulation; frequency spectrum analysis

0 引言

光电探测技术是光信息科学的主要技术手段之一, 它广泛应用于基础科研、军事技术和日常生活的各

^{*} 收稿日期: 2018-08-25; 接受日期: 2018-10-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61127901); 国家重点研发计划资助项目(2016YFF0200200)

作者简介: 杨帆, 男, 博士研究生, 主要从事铯原子喷泉钟的研究。

个领域^[1]。光电探测器将光信号转换成方便测量的电信号,继而实现对被测信号的监测与处理。响应带宽是描述光电探测器频率响应特性^[2]的最主要参数之一。

目前对光电探测器带宽的测量方法主要是基于光纤光路的光外差法^[3],该方法利用两束激光进行拍频,光电探测器探测两束光的差频分量。固定一束激光的频率,对另一束激光的频率进行扫描,得到被测光电探测器的频率响应曲线,通过计算获得光电探测器的响应带宽。在铯原子喷泉钟实验中,探测荧光信号的探测器往往增益较大,响应带宽在百赫兹量级,有的只有十几赫兹,受激光线宽的限制,光外差法不易实现对探测器响应带宽的测量。

本文通过声光调制方式对激光信号进行功率调制,应用光电探测器对调制激光信号进行探测,而后对探测波形进行傅里叶频谱分析^[4],可以得到光电探测器的响应带宽。该方法测量原理及实验过程较为简单,对于 10 kHz 以下低响应频率光电探测器,能准确地实现响应带宽的测量。

1 理论研究

响应带宽是指光电探测器可探测的频率范围,带宽越宽,表明光电探测器对各种频率调制光信号的响应能力就越强。为了更好地表示光电探测器对频率的动态响应能力^[5],通常可在时域或频域中对其进行分析^[6-7],而频域分析方法在检测领域中更有优势,可以更加容易地获得光电探测器的响应带宽。

光电探测器的响应带宽一般用-3 dB 带宽来表示^[3],是指功率降为最大值一半时对应的频带宽度。研究光电探测器响应带宽,即是了解探测器对各种频率信号的响应程度。实际应用中,光电探测器对探测信号的响应大多表现在对高频信号响应的衰减上,因此大多数光电探测器通过计算或测量其上限截止频率^[8]即可获得其响应带宽。在光电探测器电路中,光电二极管的 PN 结间会形成结电容,该电容及探测电路其他电容会与取样电阻形成一个回路,电容与取样电阻的大小,会共同决定光电探测器的响应带宽^[9]:

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC}, \quad (1)$$

式(1)中, R 为取样电阻阻值, C 为光电二极管结电容和电阻 R 的分布电容以及导线分布电容之和^[10]。

在实际应用中,对于多数光电探测器,例如购买的光电探测器,其电路为一成品电路,电路中电容、电阻等参数无法精确获知,因此无法进行理论计算。就这些情况而言,用实验的方法来测量光电探测器响应带宽是一种既准确又实用的技术。

实验中对光电探测器响应带宽的测量基于声光调制技术,运用到的关键器件即为声光调制器(acousto-optic modulator, AOM),其工作原理基于声光效应^[11]。利用声光调制技术对光电探测器响应带宽进行测量,需要将控制信号以振幅调制方式加载到射频载波上,调幅信号经电-声换能器将电功率转换为声功率在声光介质中产生超声波,入射光波与介质内超声波经声光相互作用后发生衍射现象,衍射光光强受到超声驱动功率调制,从而使得衍射效率在一定范围内受到射频驱动信号电功率的线性调制^[12],其衍射效率为^[13]

$$\eta = \frac{I_d}{I_o} = \sin^2\left(\frac{\pi L}{\sqrt{2}\lambda} \sqrt{MT_s}\right), \quad (2)$$

式(2)中, I_o 为入射光强, I_d 为衍射光强, L 为声束宽度, M 为材料的品质因数, I_s 为理想情况下所需要的声强度。

激光通过声光调制器会发生光束偏转。衍射角与声频在一定范围内存在比例关系,可以通过改变声频来改变衍射角,促使光束发生偏转。当声波频率为 Ω 时,衍射光与入射光之间的夹角为^[13]

$$\theta = \frac{\lambda\Omega}{2\pi nV}, \quad (3)$$

式(3)中, λ 为光波长, n 为介质折射率, V 为声速。

各高级衍射光将互相抵消,只出现 0 级和 ± 1 级衍射光。利用光阑可以将 0 级与其中一级衍射光遮挡,得到另一级按驱动信号频率变化的调制光,并被探测器探测。实验过程中通过对声光调制器射频驱动信号功率和频率等的调节,可实现对激光束的强度调制和角度偏转。

2 实验研究

实验研究中所用光电探测器是基于铯原子喷泉钟工作系统研制的光电探测器,它主要由光电二极管与前后两级放大电路组成,该光电探测器可以通过改变前级放大电路中采样电阻阻值,进而改变整个光电探测器的增益、带宽等参数。

实验中分别对不同采样电阻下光电探测器的响应带宽进行了测量。本文以采样电阻阻值 $R=10\text{ M}\Omega$ 与 $R=20\text{ M}\Omega$ 情况下的探测器为例,进行光电探测器响应带宽的测量与分析。

实验光路原理如图 1 所示。基于铯原子喷泉钟光学系统,采用 TOPTICA 激光器,产生波长为 852 nm 的激光。激光通过光纤注入到准直器,而后经衰减片将光功率进行一定比例的衰减,再经两个耦合镜对激光束进行调节,使激光束通过声光调制器进行调制,调制后只让其中一级衍射光通过光阑,最后被光电探测器探测,其他级衍射光均被光阑遮挡。为减小外部环境对测量过程的影响,整个实验过程在遮光环境中进行。

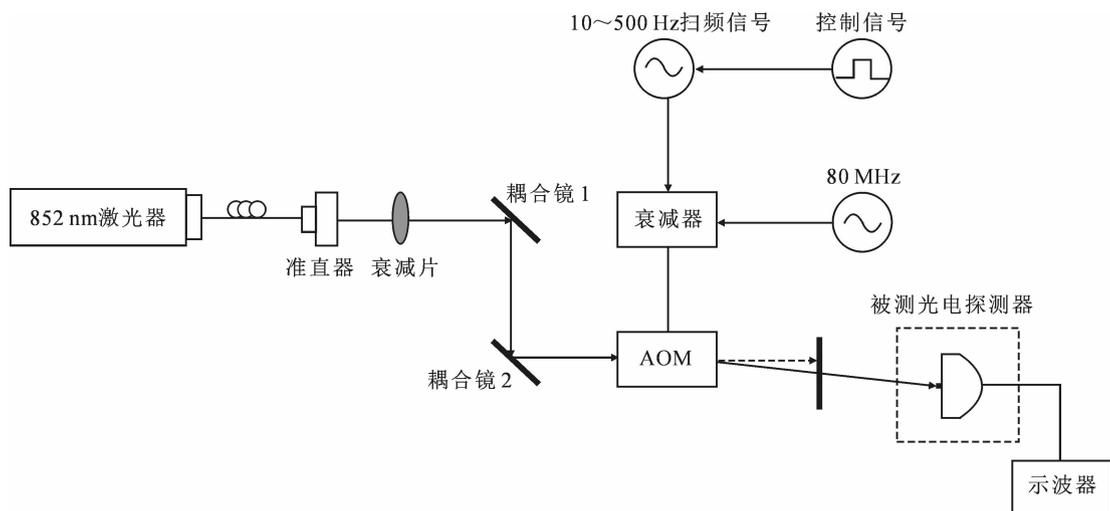


图 1 实验光路原理图

实验中用到 3 个信号源,信号源 1 输出 $10\sim 500\text{ Hz}$ 的扫频信号,信号源 2 产生 1 Hz 的方波信号,信号源 3 输出 80 MHz 的正弦波信号。由于测量光电探测器响应带宽需要用到一个宽带信号源,实验中用信号源输出扫频信号来满足该实验需求,但现有信号源输出扫频信号的下限为 10 Hz ,故用该信号源 1 输出 $10\sim 500\text{ Hz}$ 扫频信号对激光进行调制;信号源 2 用来产生方波信号,用该信号作为信号源 1 扫频信号的触发信号;信号源 3 产生的正弦波信号作为扫频信号的载波信号,同时驱动声光调制器稳定工作。

光电探测器探测的是激光光强的变化,但信号源提供的是信号频率的变化。因此光路设计中引入衰减器,按频率变化的扫频信号经衰减器后变为按幅度变化的电压信号,并加载到 80 MHz 载波信号上,作为声光调制器的射频驱动信号。射频驱动信号作用于声光调制器,可以相应地控制其衍射光的输出功率,使衍射光成为可传输信息的强度调制波^[12]。最后,将声光调制器的一级衍射光束作为输出信号,即光电探测器的探测光信号。在该实验中,激光器功率波动小于 3% ,扫描频率从 $10\sim 500\text{ Hz}$ 之间的变化过程中,AOM 输入端功率会略有波动,但波动幅度远小于调制深度,不会影响到光电探测器的输出强度。

3 实验结果及分析

实验中首先对调制信号进行探测,了解其波形。而后用光电探测器对入射调制激光信号进行探测,用示波器记录探测器的响应波形及相应数据,用 Origin 软件绘制时域响应图(如图 2 和图 3(a)所示),并对时

域图进行傅里叶分析,得到频域响应图(如图 2 和图 3(b)所示)。由于调制信号源产生的扫频信号低频由 10 Hz 开始,图中对应的 10 Hz 以下低频成分不符合要求,且经理论分析可知不会对实验结果产生影响,故舍去即可。对频域响应图进行分析,当频域曲线值下降为最大值一半时所对应的频率值为 -3 dB 带宽,即光电探测器的响应带宽。

图 2 和 3 中分别列出取样电阻为 $10\text{ M}\Omega$ 与 $20\text{ M}\Omega$ 时光电探测器响应的时域图与频域图,分别对图 2(b)和图 3(b)频域响应曲线进行分析可知,当光电探测器取样电阻为 $10\text{ M}\Omega$ 时,其响应带宽约为 270 Hz ;当光电探测器取样电阻为 $20\text{ M}\Omega$ 时,其响应带宽约为 130 Hz 。

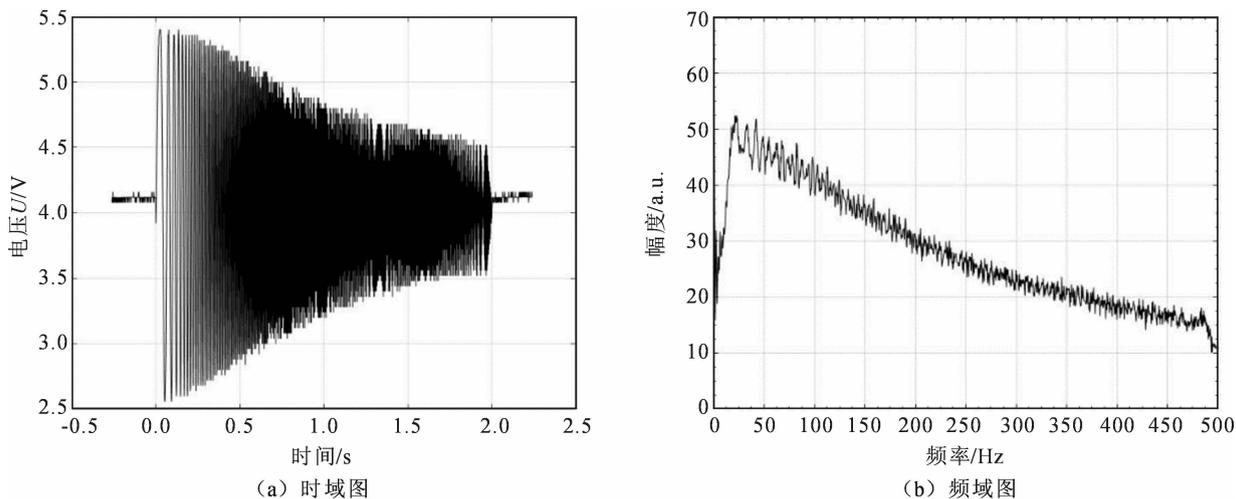


图 2 $R=10\text{ M}\Omega$ 探测器响应图

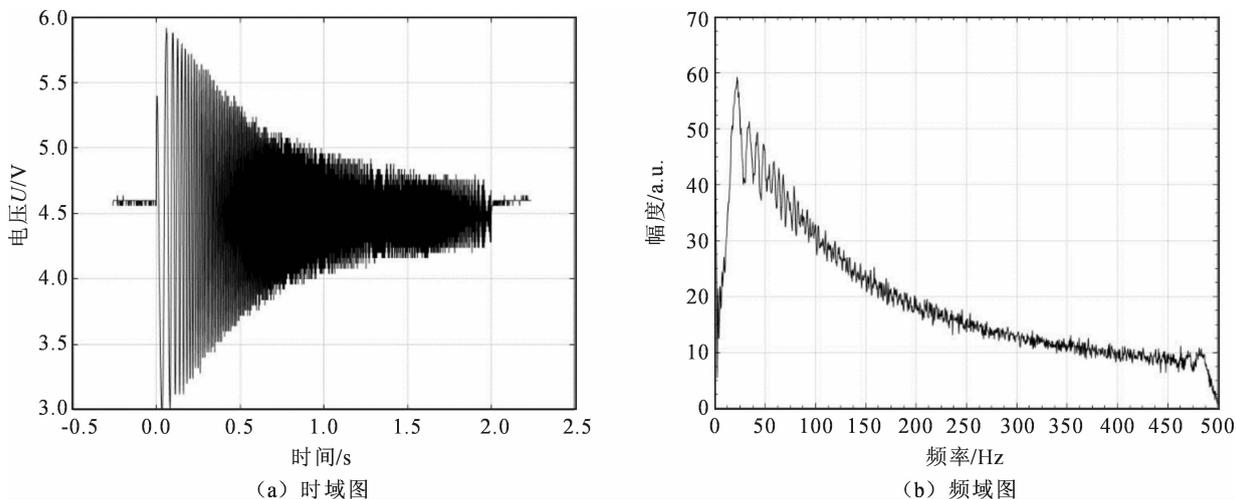


图 3 $R=20\text{ M}\Omega$ 探测器响应图

基于实验中所测光电探测器电路,在该电路中,影响探测器响应带宽的主要因素为取样电阻 R 、光电二极管结电容与补偿电容总和 C ,因此在理论分析中只考虑上述因素对光电探测器响应带宽的影响即可。分析该光电探测器电路原理图,光电二极管结电容与补偿电容总和约为 60 pF ,响应带宽大小随取样电阻阻值变化,代入公式(1)进行理论计算,当光电探测器前级放大电路中取样电阻为 $10\text{ M}\Omega$ 时,探测器的响应带宽理论计算值约为 265 Hz ,取样电阻为 $20\text{ M}\Omega$ 时的响应带宽理论值约为 133 Hz ,实验结果与该理论计算值接近,同理可计算出取样电阻为其他阻值时的探测器响应带宽。

根据响应带宽的计算公式(1),绘制如图 4 所示的响应带宽与取样电阻理论关系曲线(二者成反比关系)。同时将实验中分别对取样电阻 R 取 1, 10, 20 和 100 $M\Omega$ 时对应探测器响应带宽实验结果绘制于图中。经分析可知,实验点基本落在理论曲线上,即实验值与理论值较为符合。由此可知,通过该实验方法可以较准确地进行光电探测器响应带宽的测量。

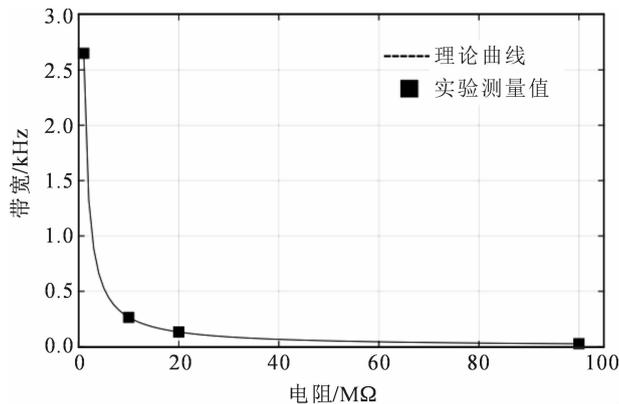


图 4 响应带宽与取样电阻关系曲线

4 结语

本文分析了声光调制技术的基本原理,并运用该原理对应的方法进行光电探测器响应带宽的测量。先通过信号源产生一定频率范围的扫频信号,再通过衰减器将扫频调制信号加载到载波信号上驱动声光调制器工作,利用声光调制技术对激光进行调制,并用光电探测器对调制后的激光信号进行探测,可以很好地通过示波器观察和测量光电探测器对不同频率信号的响应程度,继而通过傅里叶频谱分析结果得到光电探测器的响应带宽。实验中对不同取样电阻下的光电探测器响应带宽进行了测量,均能较好地分析得到光电探测器对应的响应带宽,而且与理论计算值较为接近。但由于目前实验所用仪器及器件参数限制,该方法仅限 10 kHz 以下低频光电探测器响应带宽的测量。本实验以铯原子喷泉钟光学系统工作平台为背景,进行该光电探测器的响应带宽研究,得到很好的实验结果。同样,该实验也适用于其他领域光电探测器的研究。该方法是一种通过激光调制技术得到光电探测器响应带宽的新的实验手段。

参考文献:

- [1] GRAEME J. 光电二极管及其放大电路设计[M]. 北京:科学出版社,2012.
- [2] 李建威. 高速光电探测器频率响应特性测试研究[D]. 南京:南开大学,2010.
- [3] 朱兴邦,费丰,赵耀. 基于光外差法的高速光电探测器带宽测量技术[C]//2011 全国光电子与量子电子学技术大会,北京:中国电子学会,2011.
- [4] HECHT D L,肖振. 采用声—光器件的频谱分析[J]. 压电与声光,1979(1):90-97.
- [5] 陈硕夫,李亮,吴昊,等. 综合考虑偏压和温度因素实现光探测器本征频率响应的提取[J]. 科学通报,2010,55(17):1654-1660.
- [6] 管敏杰,赵冬娥. 一种基于 PIN 型光电二极管频率响应的测试方法[J]. 应用光学,2012,33(6):1088-1091.
- [7] 费丰. 高速光电探测器频率响应测试方法研究[J]. 宇航计测技术,2010,30(1):53-56.
- [8] 高爱华,刘卫国,吴威. 基于光开关的光电探测器响应时间测量[J]. 半导体光电,2008,29(2):188-190.
- [9] 丛东亮,王叶兵,许朋,等. 铯原子互组跃迁荧光探测系统的研制[J]. 光学学报,2012,32(7):46-52.
- [10] 胡涛,司汉英. 光电探测器前置放大电路设计与研究[J]. 光电技术应用,2010,25(1):52-55.
- [11] 卢向东,张丽娟,欧伟英. 声光调制器偏振特性的实验研究[J]. 光学技术,2006,32(z1):395-397.
- [12] 高晶. 声光调制器驱动源及其通信系统研究[D]. 太原:中北大学,2013.
- [13] 朱京平. 光电子技术基础[M]. 2 版. 北京:科学出版社,2009.