

文章编号: 1001-3806(2012)06-0759-04

一种双频激光干涉信号探测器的设计

乐燕芬 时颖 向爱松

(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

摘要: 为了获取高精度双频激光干涉测量中的干涉信号,完成了一种新的光电探测器电路设计。该探测器利用AD645设计了精密低噪声光电转换前置放大器,保证微弱干涉光信号的有效接收;增益可调的主放大器设计保证输出信号足够的动态范围,适应不同类型的干涉信号处理电路,双二次型带通滤波器有效抑制了噪声与温漂。结果表明,研制的光电探测器能完成微弱干涉信号的接收处理,信噪比高、频率稳定、结构简单易实现,可应用于高精度比相计等激光干涉仪信号处理装置。

关键词: 光电子学; 双频激光干涉仪; 光电信号探测器; 低噪声; 增益可调

中图分类号: TH744.3 文献标识码: A doi: 10.3969/j.issn.1001-3806.2012.06.012

Design of heterodyne interferometer signal detectors

LE Yan-fen, SHI Ying, JU Ai-song

(School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: In order to obtain the interference signal in a high-precision heterodyne interferometer, a new design of gain-controlled weak-signal detector was presented. In the detector circuit, a low noise photoelectric conversion pre-amplifier was designed based on AD645 to convert the weak interferometric beam effectively. A gain-controlled main amplifier was designed to guarantee the dynamic range for the signal and applicable for various processing circuit. A biquad band-pass filter was introduced to minimize the noise and the temperature drift. It is verified experimentally that the output signal of detector has high signal-to-noise ratio, large dynamic range and high gain. The detector with high performance can be used in high precision interferometers.

Key words: optoelectronics; heterodyne interferometer; photoelectric signal detector; low noise; gain control

引言

双频激光干涉测量系统是目前最常用的精密激光测量系统。它利用两束具有一定频差的正交线偏振光分别经过干涉系统的参考臂和测量臂,获取携带有测量信息的干涉信号。因具有测量速率快、抗干扰能力强、易于实现高分辨率测量等优点被广泛用于位移、角度、直线度、平面度等几何量测量领域,特别是在纳米量级的位移、面形测量中占有重要地位^[1-2]。微瓦级的激光干涉信号^[1]经光电转换后形成微弱的电信号,如何有效获取微弱信号、低噪声高增益放大是实现精密测量的首要前提。微弱信号检测常用的方法包括窄带

滤波法、同步累积法和相关检测等。针对信号的不同频率特性,不少文献中提出具体的方案^[3-5],包括锁相环技术、快前置放大技术及精密低噪声放大技术等。通过对电路噪声因素的分析^[6-7],提出了抑制噪声、提高电路信噪比的方法,如光电器件、运算放大器的合理选型、电路的补偿、差分技术等。双频激光干涉仪中经光电转换后的信号是频率在几百千赫兹到几兆赫兹的交变信号,针对这个频率的微弱信号,参考文献[8]中提出了利用差分放大器抑制温漂的检测电路,而参考文献[9]中则提出了基于宽带运放及低通滤波器的光电检测电路。

作者设计了一种新的光电信号检测、滤波和放大电路。针对外差激光干涉测量时影响测量精度的重要误差源,如温漂、光功率漂移等低频噪声及突发的环境扰动等高频噪声,引入带通滤波器抑制噪声。另外,为保证微弱信号的无失真高增益放大,放大器采用多级级联、增益可控,使输出的电信号符合不同激光干涉处理电路的电平要求。

基金项目: 上海市教委重点学科建设基金资助项目 (J50505); 国家自然科学基金资助项目 (51075280)

作者简介: 乐燕芬 (1978-), 女, 讲师, 现主要从事微纳米检测的研究。

E-mail: le_yf@163.com

收稿日期: 2012-03-09; 收到修改稿日期: 2012-04-05

1 系统设计及结构

光电探测器的系统结构如图 1 所示。来自激光干涉系统参考臂或测量臂的激光拍频信号,由光电转换模块接收转换为微弱的电压信号,通常只有几毫伏。经低噪声前置放大器模块进行初级放大和处理,增加驱动能力后进入带通滤波器模块。带通滤波器保证拍频信号无失真通过,同时减小系统带宽以抑制散粒噪声。该滤波模块的低频抑制能力可控制温漂、光源功率漂移等低频噪声。经滤波后,电压幅值通常为几百毫伏量级的激光拍频信号进入主放大器模块进一步放大,通过增益控制,获得大动态范围的输出信号供后续电路处理。为有效滤除传输信号中的直流干扰,前置放大器和主放大器均设有消除直流偏移的电路来消除直流噪声,提高探测器的信噪比^[4]。

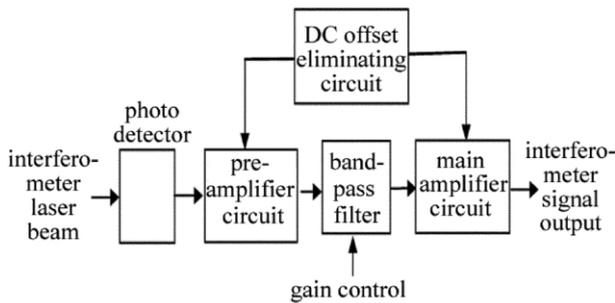


Fig. 1 Structure of the interferometer detector

1.1 光电转换前置放大器模块

探测器首先要将光信号尽可能无失真转化为电信号,完成初级光电转换。光电转换器件的选择直接影响到后续放大器输入信号的大小、信噪比,进而影响到系统的性能。在双频激光干涉系统中,两个椭圆偏振光干涉后形成的拍频信号频率由于干涉系统的激光源决定,一般在几百千赫兹到几兆赫兹范围,且干涉后形成的拍频信号很微弱,一般在微瓦数量级,这对光电转换器件的光谱特性、灵敏度、噪声及带宽等提出了要求。作者设计的电路中采用日本滨松公司生产的 S6775,此硅 PIN 型光电二极管适合可见光到近红外光的探测。当入射光波长为 660nm 时,光电二极管的灵敏度为 0.7A/W,加上 10V 的反向偏置电压时,最大截止频率可达 15MHz,满足系统性能要求。

探测器接收的激光拍频信号的光功率较微弱,光电二极管内阻较大,大约在几十千欧姆至几百千欧姆,形成的光电流很小。为提高光电二极管的频率响应特性,采用反偏置的光导模式,利用跨阻放大电路,将光电流转换为电压信号输出。电路设计如图 2 所示。 R_3 的选择要保证信号有较短的上升时间,同时能减小反偏置时产生的暗电流,有效提取光电流信号。在该设

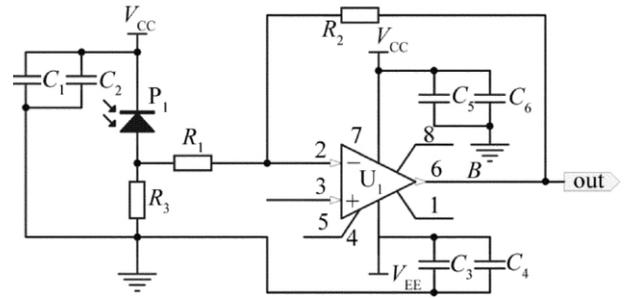


Fig. 2 Pre-amplifier of the detector

计中,经实践选取了 $R_3 = 1k\Omega$ 。

前置放大器需要将微安培级的光电流信号转换为后续电路匹配的电压信号。考虑到信噪比、响应速率及带宽等因素,前置放大电路采用高阻、低噪声运放 AD645。AD645 是场效应晶体管 (field effect transistor, FET) 输入级运算放大器,10kHz 时,输入电压噪声密度为 $10nV/Hz^2$,电流噪声峰峰值为 $11fA$,最大输入偏置电流为 $1.5pA$,能保证 AD645 应用于低噪声高精度微弱电流信号的前置放大,并能有效减少系统误差。前置放大电路如图 2 所示。其噪声主要包括 AD645 的输入噪声、 R_1 和 R_2 引起的热噪声及电流流过 R_1 和 R_2 产生的噪声电压。由于此前置放大器设计的电压增益为 20dB,即 $R_2 = 10R_1$ 。所以减小 R_2 可有效减少系统热噪声。但同时需考虑 R_1 随 R_2 相应减少,并引起光电转换电路光电流的有效提取。系统设计中需综合考虑上述因素。

1.2 主放大电路设计

主放大电路需实现可调高增益放大。本设计中采用性能优异的 MAX4107 运算放大器。该放大器具有高速、极低噪声特性,稳定的 10V/V 闭环增益(即 20dB);3000MHz 的工作带宽完全可满足光电探测器的带宽要求;15mA 的工作电流可提供摆幅达 $\pm 3.2V$ 的输出电压及 80mA 输出电流。

为保证信号无失真高增益放大,主放大器采用 3 级电压放大器级联,其中第 2 级和第 3 级采用电位器实现增益可调节。系统设计灵活简洁。设计电路如图 3 所示。

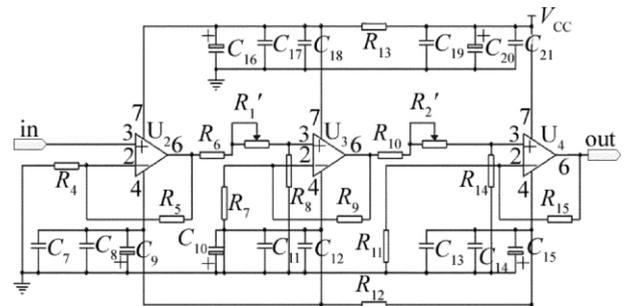


Fig. 3 Schematic diagram of the main amplifier

如图 3 所示,第 1 级放大器电压增益为:

$$A_{u_{i1}} = \frac{u_o}{u_i} = 1 + \frac{R_5}{R_4} \quad (1)$$

第 2 级放大器电压增益:

$$A_{u_{i2}} = \left(\frac{R_9 + R_7}{R_7} \right) \left(\frac{R_8}{R_6 + R_1' + R_8} \right) \quad (2)$$

第 3 级放大器放大增益同第 2 级,故不再赘述。因 R_1', R_2' 为可调电阻,则通过调节其阻值可方便地根据具体应用设定主放大器的增益。

1.3 滤波器电路设计

由于设计中采用的主放大器工作带宽高达 300MHz,为保证放大器良好的信号增益,有必要对前置放大器的输出信号进行滤波,以抑制进入主放大器的干扰。设计采用稳定性好、调整方便的双二次型带通滤波器。滤波电路的分析计算如下^[10]。

2 阶带通滤波器的归一化传递函数为:

$$H(S) = \frac{K\omega_0 S}{S^2 + \frac{\omega_0 S}{Q} + \omega_0^2} \quad (3)$$

式中 S 为拉普拉斯变换中的复频变量, K 为通带内增益, ω_0 为滤波器的中心频率, Q 为品质因素。又知 2 阶带通滤波器的传递函数典型公式为:

$$H(S) = \frac{\rho\omega_0 S}{S^2 + \beta\omega_0 S + \gamma\omega_0^2} \quad (4)$$

式中 ρ, β, γ 是参考文献 [10] 中设计的 2 阶滤波器的参量,由滤波器传递函数的归一化参量决定。比较 (3) 式和 (4) 式得到:

$$\rho = \frac{K}{Q}, \beta = \frac{1}{Q}, \gamma = 1 \quad (5)$$

设计中应用双频激光的干涉信号为 1.7MHz,故滤波器取中心频率 $\omega_0 = 1.7\text{MHz}$,增益 $K = 10$,品质因数 $Q = 1$ (对应带宽约为 1.7MHz),则由 (3) 式可得传递函数为:

$$H(S) = \frac{10\omega_0 S}{S^2 + \omega_0 S + \omega_0^2} \quad (6)$$

由 (5) 式得 $\rho = 10, \beta = 1, \gamma = 1$ 。

设计时,电容 C_{22} 和 C_{23} 取值相同,理论上可以任意取值。一般选取接近 $10\mu\text{F}$ 的标称化数值。各电阻阻值可由下式计算:

$$\begin{cases} R_{16} = \frac{1}{\rho\omega_0 C_{22}} \\ R_{21} = \frac{1}{\beta\omega_0 C_{22}} = \frac{\rho}{\beta} R_{16} \\ R_{20} = \frac{1}{\gamma\omega_0^2 C_{22}^2 R_{19}} \end{cases} \quad (7)$$

式中 R_{19} 可任意取值,建议选取参考值为:

$$R_{19} = R_{20} = \frac{1}{\gamma\omega_0 C_{22}} \quad (8)$$

反相器中的电阻 R_{17}, R_{18} 与 R_{19} 取值相同即可。

由于 $\omega_0 = 1.7\text{MHz}$, 则 $10\mu\text{F} \approx 5.88\text{pF}$, 取标称化数值 $C_{22} = 6.8\text{pF}$, 则由 (7) 式得到: $R_{16} = 1.377\text{k}\Omega, R_{21} = 13.77\text{k}\Omega, R_{20} = R_{19} = 13.77\text{k}\Omega$ 。

由此得中心频率 $\omega_0 \approx 1.69972\text{MHz}$, 带宽约等于 1.69972MHz, 对应的通带约为 0.85MHz ~ 2.55MHz, 符合设计要求。双二次带通滤波器的电路原理图如图 4 所示。

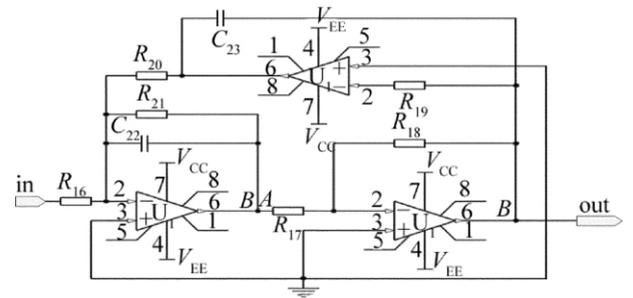


Fig. 4 Biquad structure of band-pass filter

2 实验结果

对设计的光电探测器进行了实验,以验证其工作性能。实验中,探测器接收的是位移干涉测量中获得的拍频为 1.7MHz 的测量信号。该拍频信号经光电转换前置放大后采集到的图像见图 5a,信号峰峰值在 20mV 左右,并叠加有一定的噪声。图 5b 是经带通滤

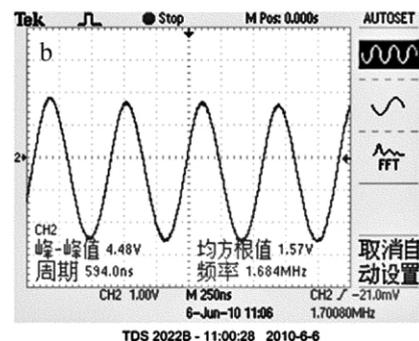
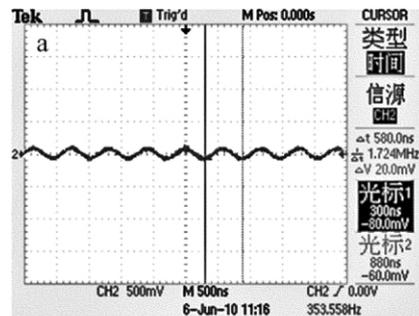


Fig. 5 Measurement signal output

a—output of the pre-amplifier b—output of the detector

波及主放大器后输出的波形,其峰峰值为4.48V,输出波形基本无噪声无失真。在激光器的输出功率多级可调时,利用主放大器的电压增益调整,可使探测器获取的拍频信号稳定在 $\pm 3V$ 内无失真输出。

3 结论

设计并验证了一种新的光电探测器。实验表明,设计的探测器由于采用了低噪声前置放大电路及带通滤波器,降低了噪声干扰,提高了信噪比。多级放大电路的设计在低失真条件下,可对小信号高增益输出,输出信号动态范围大,且增益可调。利用本光电探测器可实现双频激光干涉系统中拍频信号的快速转换、无失真放大输出。

参 考 文 献

- [1] CHEN B Y, LI D Ch. Challenges and opportunities of nanomeasurement technology[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2005, 26(5): 547-550(in Chinese).
- [2] ZHAO Y, LI D Ch, LIANG J W. Application methods and characteristics of heterodyne interferometer[J]. Measurement Technique, 1996(7): 2-4(in Chinese).
- [3] LIN L, WANG X L, LI G, *et al.* A new type of lock-in amplifier detecting circuit[J]. Journal of Tianjin University, 2005, 38(1): 65-68(in Chinese).
- [4] QI X H, LI S Zh, FEI Y L. Design of high accuracy and low-noise preamplifier circuit[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2010, 30(11): 1509-1511(in Chinese).
- [5] QIAN Y, SU H, LI X G, *et al.* The design of a fast preamplifier[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2006, 26(6): 842-844(in Chinese).
- [6] GUAN M J, ZHAO D E. Research of the noise based on PIN type photoelectric conversion circuit[J]. Electronic Test, 2012, 20(2): 35-38(in Chinese).
- [7] XIAO Q L, YANG D W, ZHANG Ch Y, *et al.* Noise analysis of optical-electrical signal conditioning circuit in acquisition system[J]. Journal of Data Acquisition & Processing, 2009, 24(10): 206-209(in Chinese).
- [8] SHA D L, KONG Y X. Design of receive circuit for heterodyne interferometer[J]. CFHI Technology, 2008, 123(6): 66-68(in Chinese).
- [9] LIU R L, YIN D K. Design of a photoelectric detecting circuit for laser interferometer[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2010, 31(2): 284-287(in Chinese).
- [10] JOHNSON D E, JOHNSON J R, MOORE H P. A handbook of active filters[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 1984: 95-134(in Chinese).

版权所有 ©

《激光技术》编辑部