

文章编号: 1001-3806(2015)03-0333-04

基于 AD8302 的激光外差干涉信号解调技术

刘丹¹, 郑宾^{1,2*}, 郭华玲^{1,2}, 刘辉¹

(1. 中北大学 信息与通信工程学院, 太原 030051; 2. 中北大学 电子测试技术重点实验室, 太原 030051)

摘要: 为了改善传统硬件相位测量中存在电路复杂、测量精度低、工作频带宽窄等诸多缺陷, 利用 AD8302 的良好高频测相能力, 设计了一种新的激光外差干涉信号处理系统, 分析了其工作原理, 并取得了静态、动态实验数据。结果表明, 系统测量误差小于 0.5° , 使外差干涉理论测量分辨率提高到 0.088nm , 更有利于微振动信号的测量。

关键词: 测量与计量; 高频测相; AD8302; 激光外差干涉; 微振动信号

中图分类号: TN247; TN763 **文献标志码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2015.03.011

Laser heterodyne interference signal processing system based on AD8302

LIU Dan¹, ZHENG Bin^{1,2}, GUO Hualing^{1,2}, LIU Hui¹

(1. School of Information and Communication Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China; 2. National Key Laboratory for Electronic Measurement Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: In order to overcome defects of the traditional phase measurement hardware, such as circuit complexity, low measurement precision and narrow band width, a novel signal processing system of a laser heterodyne interferometer was designed based on AD8302 with good performance. The work theory of the system was analyzed in detail. Static and dynamic experimental data were obtained. The results show that measurement error of the system is less than 0.5° and the measurement resolution of heterodyne interference can reach 0.088nm in theory which is more conducive to measure the microvibration signal.

Key words: measurement and metrology; high-frequency phase measurement; AD8302; laser heterodyne interference; microvibration signal

引言

由于激光外差干涉具有非接触测量、精度高和溯源性好等优点, 已经被广泛运用于振动、位移、速度等物理量的精密测量中。激光外差干涉测量的原理是将被测物理量转化为调频或调相信号, 解调后即可得到被测量信息^[1-3]。目前对于外差信号的处理常采用相位解调法。相位解调需要精确地测量相位差, 如果基于软件算法实现, 将加重计算机的数据采集负担, 同时在解调过程中会引入量化误差, 导致信号失真^[4]。为了解决这些问题, 应该设计硬件解调, 将原始的光强信号直接用硬件解调模块处理, 再交由后端数据采集处理系统作数据分析, 降低对采集系统采样率的要求, 同时也消除量化误差对相位信号的影响^[5]。硬件解调系统稳定可靠, 解调出的信号能够如实地还原被测

信号, 但传统的硬件相位解调存在很多缺陷, 需要采用多片集成芯片, 不仅电路复杂、测量精度低, 而且工作频带窄, 只能测量中低频信号^[6-7]。因此需要提出一种电路简单、测量精度高的新型的相位解调方法。本文中采用单片相位与幅度测量集成芯片 AD8302 对高频激光外差信号 (80MHz) 进行相位精确测量。

1 激光外差测量原理

激光外差测量原理见图 1。氦氖激光器作为光源, 激光光束进入具有频移作用的声光调制器 (acousto-optic modulator, AOM), 产生频率不同的两束光: 0 级光和 +1 级光, 其频差为 80MHz 。其它杂散光被滤除, 0 级光与 +1 级光通过光阑, 然后经过偏振分光棱镜 (polarizing beam splitter, PBS) 分为两束, 透射部分为线偏振 p 光, 反射部分为线偏振 s 光。0 级和 +1 级 p 光依次经过反射镜 M_1 和 M_2 , 然后经过三角棱镜, 最后到达非偏振分光棱镜 BS_1 上。非偏振分光棱镜不会影响光束的偏振态, 调整光路使 0 级光和 +1 级光重合, 重合的两束 p 光经聚焦透镜汇聚到光电探测器 (photoelectric detector, PD) PD_1 上发生干涉, 作为

基金项目: 教育部博士点基金资助项目 (2103142012007)

作者简介: 刘丹 (1989-), 女, 硕士研究生, 主要从事激光微损伤检测方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: zhengbin@nuc.edu.cn

收稿日期: 2014-06-09; 收到修改稿日期: 2014-07-09

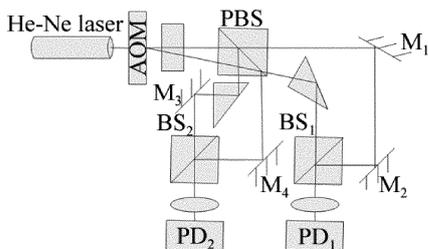


Fig. 1 Scheme of heterodyne interferometers

参考光。同时 0 级 s 光经过三角棱镜和反射镜 M₃, 到达非偏振分光棱镜 BS₂, +1 级 s 光入射到存在微振动的测量镜后, 到达非偏振分光棱镜 BS₂, 最终经透镜汇聚到 PD₂ 上发生干涉。根据电磁场理论, 两光电探测器输出外差信号分别为^[8]:

$$I_1 = A_1 \cos(\omega_1 t + \varphi_1) \quad (1)$$

$$I_2 = A_2 \cos[\omega_2 t + \varphi_2 + (4\pi/\lambda)u(t)] \quad (2)$$

式中, A₁ 和 A₂, φ₁ 和 φ₂ 分别为参考光与信号光的振幅和初相位; ω₁ 和 ω₂ 是参考光和信号光的频率, 如果被测镜表面存在振动 u(t), 则信号光经样品表面反射后由于多普勒效应发生 (4π/λ)u(t) 的位移^[7]。由 (1) 式和 (2) 式可知, 只要测出两路外差信号的相位差 Δφ, 就可以得到待测振动信息, 因此, 实验测量的要点是对两路光外差信号进行比相, 以期得到振动的相位和幅度。

2 AD8302 对外差干涉信号的解调

2.1 AD8302 的性能特点

AD8302 是美国 ADI 公司于 2001 年推出的单片宽频带相位差测量系统, 包含 2 个精密匹配的宽带对数放大器、1 个宽带相位检测器, 工作频率从低频到 2.7GHz^[9-10]。由于所有模块集成在一个芯片上, 因此, 可将温漂降至最低限度^[11]。测量相位差的范围是 0° ~ 180°, 对应的电压变化范围是 0V ~ 1.8V, 输出灵敏度为 10mV/°。相位输出的转换速率高达 30MHz, 响应时间为 40ns ~ 500ns。单电源 +2.7V ~ +5.5V 供电, 典型值为 5V, 电源电流为 19mA^[12]。

2.2 AD8302 测量相位差原理

AD8302 的测量原理如图 2 所示, 将参考光路和信号光路的电信号接入 AD8302 的两个输入端, 送给内部两个对数放大器, 然后通过乘法器, 经积分后的输出与相位差有关的信号, 其数学表达式如下:

$$R = (1/T) \int_0^T I_1' I_2' dt = (1/T) \int_0^T A_1 A_2 \times \cos(\omega t + \phi_1) \cos(\omega t + \phi_2) dt = A_1 A_2 \cos(\phi_1 - \phi_2) / 2 \quad (3)$$

式中, I₁' 和 I₂' 是 I₁ 和 I₂ 通过对数放大器后输出的信号; φ₁ 和 φ₂ 分别是 I₁ 和 I₂ 经对数放大器后的相位, 忽略对数放大器不对称导致的误差, 则 φ₁ - φ₂ = Δφ, 因此两路外差干涉信号经过 AD8302 内部集成的鉴相

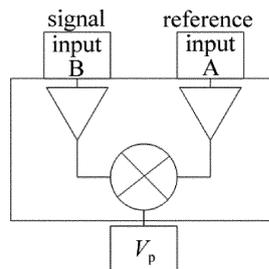


Fig. 2 Work principle of AD8302

电路后, 得到的相位差输出电压^[13]为:

$$V_p = -R_{VREF} I_\phi (|\phi_1 - \phi_2| - 90^\circ) + V_c \quad (4)$$

式中, R_{VREF} I_φ 代表相位特性曲线斜率, 大小为 10mV/°, 中心点为 V_c (900mV), 对应角度 90°。相位特性曲线如图 3 所示。当相位差为 0° 时, 输出电压为 1.8V; 相位差为 180° 时, 输出电压为 30mV^[14]。AD8302 输出的与相位差有关的电压信号可在示波器上显示, 也可由数据采集卡送入计算机处理。

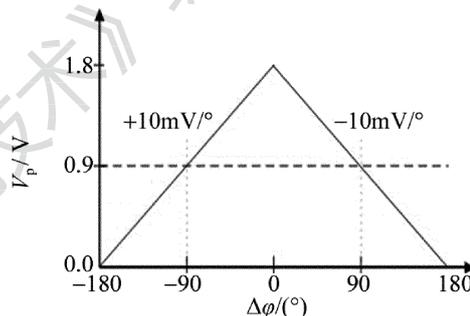


Fig. 3 Phase character graph of AD8302

2.3 AD8302 相位差测量的硬件设计

设计中采用 AD8302 的典型应用电路, 系统框图如图 4 所示。由于 AD8302 输入功率的范围是 -60dBm ~ 0dBm, 特性阻抗为 50Ω 的系统, 对应电压范围为 0.224mV ~ 224mV, 所以外差干涉信号幅度应低于 AD8302 输入信号幅度范围。本电路采用型号为 VAC18E 的衰减器, 频率为直流到 1.5GHz, 衰减范围 0dB ~ 15dB 可调。由于 AD8302 的输出范围为 30mV ~ 1.8V, 为了便于采集与处理, 采用 TI 公司的宽带电压反馈运算放大器 OPA690 对输出信号进行放大后交给数据采集系统。

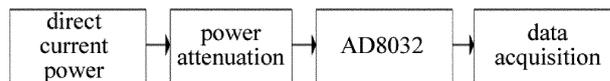


Fig. 4 Block diagram of the system

3 实验结果与分析

3.1 静态验证

首先, 对 AD8302 相位解调电路进行静态验证。由软件控制信号发生器卡的 CH₁ 和 CH₂ 输出两路正弦波, 频率固定时, CH₂ 的初始相位不变, 依次改变

CH₁ 的初始相位,使两路信号的相位差改变,记录 V_p 输出电压值,根据相位差响应特性公式计算对应相位差,改变两路信号的频率 f,使 f 依次为 0.1MHz, 1MHz, 5MHz 等,重复上述实验。实验数据如表 1 所示。静态验证结果表明,设计电路可以测量任意两路同频信号的相位差,测量误差小于 0.5°。

Table 1 Measurement result at static state

real/ (°)	f/MHz							
	0.1	1	5	10	30	40	50	80
	measured/(°)							
30	30.2	29.6	29.7	30.4	30.4	30.3	30.4	29.7
45	44.7	45.1	45.4	45.2	45.3	45.1	45.2	45.4
90	90.2	90.4	89.6	89.7	89.8	89.7	89.6	89.5
135	134.6	135.2	135.3	134.7	134.8	134.7	134.6	135.6
180	179.7	179.8	179.7	179.7	179.8	179.8	179.8	179.8

3.2 动态验证

为了检验电路,首先对信号发生器卡的标准调相信号进行相位解调。信号发生器卡设置载波频率为 80MHz,基带频率为 10MHz。将调制信号和参考信号

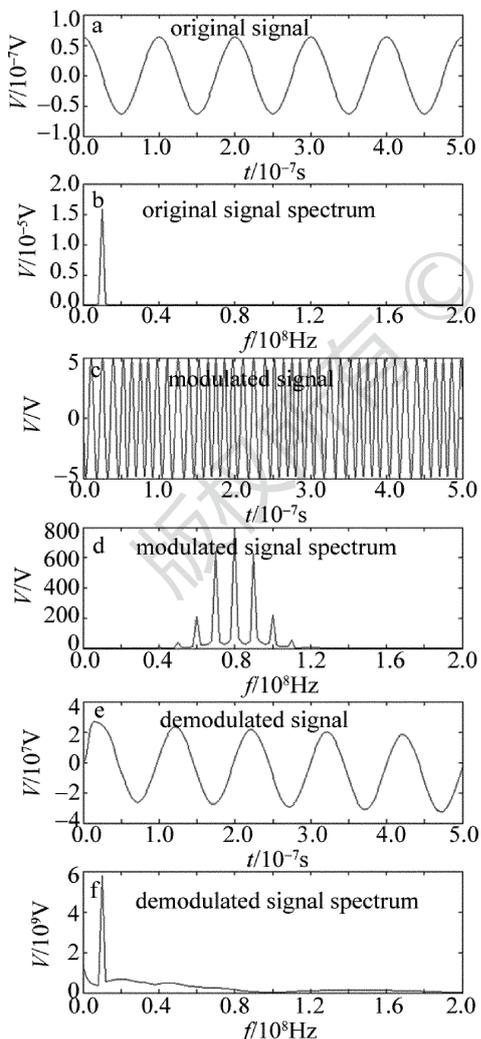


Fig. 5 Measurement result of AD8302 at dynamic state

输入解调电路,通过示波器初步观察解调信号。在深入研究 AD8302 鉴相机理的基础上,详细分析测量中存在的误差项,通过硬件降噪、软件补偿等方法对测量结果进行修正以提高测量精度,经 MATLAB 处理后如图 5 所示。其中横纵坐标的 V, t, f 分别代表原调制信号、载波信号、解调信号的电压幅值、时间和频率。解调后的信号时域波形有 25ns 的滞后,这是由于电路中衰减模块、相位差测量模块、运算放大模块都有一定的响应时间,导致时间延迟。解调信号的频谱成分中主频为 10MHz,但包含其它成分的频率分量,这是由于对高频信号进行处理,电路中存在电磁干扰。今后本电路设计过程中对电子元器件的选择、PCB 布局布线需要注意高频特性带来的影响^[10]。实验结果表明,基于 AD8302 相位解调电路可以完整地解调相位调制信号。

3.3 激光外差干涉信号的解调

首先,通过 AD8302 的幅值比输出端来观察两路

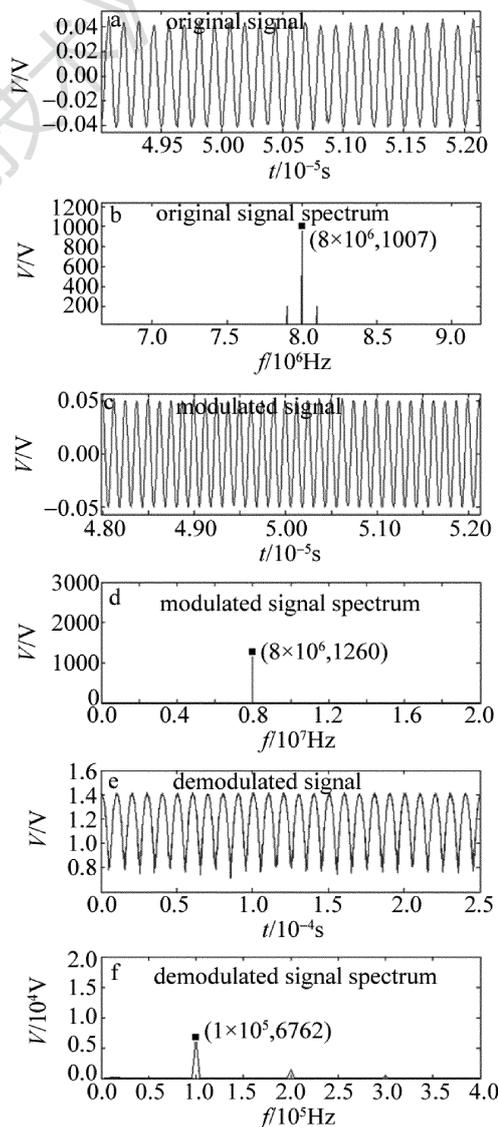


Fig. 6 Processing result of laser heterodyne interference

信号的电压变化情况,将两路光信号的干涉效果调整到最佳状态。然后,采用压电陶瓷模拟微振动信号驱动测量镜 M_4 ,设置振动频率为 100kHz。将 AD8302 相位解调电路的输出端交给数据采集系统处理后如图 6 所示。

实验结果表明,本设计可以准确地测量激光外差干涉光路检测的微振动信号。AD8302 的分辨率为 0.1° ,因此外差干涉微振动测量系统的理论分辨率高达 $(0.1/360) \times (632.8\text{nm}/2) = 0.088\text{nm}$ 。

4 结 论

利用 AD8302 的良好高频测相能力,可以实现对激光外差信号的高精度相位测量。AD8302 将测量相位的能力集中在一块集成电路内,较传统的相位测量系统相比,本系统电路简单、成本低、可靠性强、测量误差小于 0.5° ,使激光外差干涉系统的理论分辨率高达 0.088nm 。并且利用该芯片可以检测两路信号幅值比,可以反映激光外差光路干涉效果,判断光路调整的好坏,方便光路调整。

参 考 文 献

- [1] JOO K N, ELLIS J D, BUICE E S, *et al.* High resolution heterodyne interferometer without detectable periodic nonlinearity[J]. *Optics Express*, 2010, 18(2):1159-1165.
- [2] KIM M S, KIM S W. Two-way frequency-conversion phase measurement for high-speed and high-resolution heterodyne interferometer[J]. *Measurement Science and Technology*, 2004, 15(11):2341-2348.
- [3] ZHAO S W, YAN L P, YANG T. Signal processing method of the laser heterodyne interferometer based on DSP[J]. *Journal of Zhejiang Institute of Science and Technology*, 2011, 28(2):217-220(in Chinese).
- [4] LU Sh, LOU L F, WANG Ch. Research of signal hardware demodulating technique in fiber interferometer vibration measurement[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2013, 26(7):932-935(in Chinese).
- [5] WEI J Q, ZHANG T, HE Z N, *et al.* Signal processing system of dual-frequency laser interferometer with two longitudinal modes based on AD8302[J]. *China Measurement & Test*, 2009, 35(3):52-55(in Chinese).
- [6] LI L. Research on radio locating system of test bomb falling point in missile range[D]. Taiyuan:North University of China, 2009:1-65(in Chinese).
- [7] CAO L J. A new measuring system of phase and amplitude based on AD8302[J]. *Electronic Engineer*, 2007, 33(3):6-8(in Chinese).
- [8] MONCHALIN J P. Heterodyne interferometer laser probe to measure continuous ultrasonic displacement[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1985, 56(4):543-546.
- [9] SHA Zh Y, LIU A F, WANG K. Design of single-chip broad band phase biasmeasure system based on AD8302[J]. *International Electronic Elements*, 2006(1):57-60(in Chinese).
- [10] JIA X G. Design and analysis of transceiver system of SAW sensor in TPMS[D]. Harbin:Harbin Institute of Technology, 2010:1-67(in Chinese).
- [11] ZHANG J. Research of eddy current testing method for drill pipe thread[D]. Shenyang:Shenyang University of Technology, 2009:1-72(in Chinese).
- [12] ANALOG D I. AD8302:LF-2.7GHz RF/IF gain and phase detector data sheet[EB/OL]. (2002-07-01)[2002-11-04]. <http://www.analog.com>.
- [13] WU D, ZHU R H, CHEN L. Heterodyne vibration measurement and signal processing for environmental micro-disturbances on phase-shifting interferometer[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2004, 31(9):53-56(in Chinese).
- [14] YEE Y F, CHAKRABARTY C K. Phase detection using AD8302 evaluation board in the super heterodyne microwave interferometer for line average plasma electron density measurements[J]. *Measurement*, 2007, 40(9):849-853.