

文章编号 1004-924X(2013)10-2527-08

激光测距系统整形模块和低通滤波模块优化设计

尤 政^{1,2*}, 杨 冉^{1,2}, 张高飞^{1,2}, 薛旭峰¹, 叶良琛^{1,2}

(1. 清华大学 精密仪器系, 北京 100084; 2. 清华大学 精密测试技术及仪器国家重点实验室, 北京 100084)

摘要: 由于减小相位式激光测距系统的鉴相误差可提高测距精度, 本文对鉴相器前置整形模块和后置滤波模块进行了优化设计, 以提高鉴相精度。针对整形模块, 引入了迟滞比较器, 克服了传统开环比较电路在实际噪声条件下存在的多重触发缺陷, 解决了鉴相器输出方波高电平宽度不稳定的问题。针对滤波模块, 介绍了基于 MC4044 鉴相芯片的两种典型放大/滤波电路及其缺陷, 使用 FilterPro 软件设计了 4 阶有源低通滤波器, 并说明了它相对于典型设计的优势。实验结果表明: 相比于开环比较器, 本文设计的迟滞比较器避免了接地(GND)噪声引起的多重跳变现象, 输出方波的上升沿时间由 $1.66 \mu\text{s}$ 下降为 108 ns ; 与基于 MC4044 的两种典型放大/滤波模块设计相比, 本文设计的低通滤波电路克服了输出 DC 电平非线性变化的缺陷线性度(R^2)值由 0.908 3 提高至 0.999 9)和灵敏度较低的缺陷(转化增益常量提高了 96.5%), 而输出 DC 电平上的干扰信号峰峰值则由 $50 \sim 230 \text{ mV}$ 下降至 $10 \sim 20 \text{ mV}$, 有效减少了后级的 A/D 采样误差, 提高了鉴相精度。

关键词: 激光测距系统; 鉴相精度; 迟滞比较器; 整形模块; 放大/滤波模块

中图分类号: TN247; TN713 文献标识码: A doi: 10.3788/OPE.20132110.2527

Optimization of shaping circuit and low-pass filter in laser ranging system

YOU Zheng^{1,2*}, YANG Ran^{1,2}, ZHANG Gao-fei^{1,2}, XUE Xu-feng¹, YE Liang-chen^{1,2}

(1. Department of Precision Instrument, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments,
Tsinghua University, Beijing 100084, China)

* Corresponding author, E-mail: yz-dpi@mail.tsinghua.edu.cn

Abstract: As the phase discrimination error of a phase laser ranging system effects its ranging accuracy, this paper optimizes the designs of a preceding stage (shaping circuit) and a subsequent stage (low-pass filter) in the phase detector. For the shaping circuit, a comparator with hysteresis was designed to avoid the multiple-triggered phenomenon caused by the noise on GND for open loop filters, and stabilizes the output of phase detector. For the low-pass filter, two typical amplifier/filter circuits based on MC4044 and their defects were introduced, a 4th-order low-pass filter was designed by using FilterPro, and its advantages were presented. Experimental results indicate that the multiple-triggered phenomenon is eliminated by using the hysteresis comparator designed, and the rise-time of out-

收稿日期: 2013-04-10; 修订日期: 2013-05-13.

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (No. 20124302056)

put square wave falls to 108 ns from 1.66 μs as compared with that of a traditional opened-loop comparator. Furthermore, the 4th-order filter designed in this paper improves the linearity and sensitivity of the DC output, the linearity(R^2) increases from 0.908 3 to 0.999 9, and the convention gain improves by 96.5% as compared with that of the typical designs of amplifier/filter circuits. Moreover, the peak-to-peak value of the interference signal on a Low Pass Filter(LPF) DC output decreases from 50–230 mV to 10–20 mV, which reduces the phase detection error effectively.

Key words: laser ranging system; phase detection accuracy; comparator with hysteresis; shaping module amplifier/filter module

1 引言

激光相位测距采用经过波形调制的激光作为载波,通过对激光强度进行波形调制,并对反射光进行接收,可以测定激光信号在待测距离上往返时产生的相位差,间接算得激光的往返时间,从而进一步计算出距离。与传统的微波雷达测距方式相比,激光测距具有抗干扰能力更强、隐蔽性更好的优点^[1-2]。在调制频率 f 一定的条件下,激光相位测量的最大单值测量距离为 $c/2f$ ^[3]。其测距精度 Δd 与鉴相精度 $\Delta\Phi$ 成正比,二者之间的关系为 $\Delta d = \Delta\Phi \times c/2f$ 。由此可知,鉴相精度的高低对测距准确度具有决定性的影响。目前,科研项目 and 工程应用对测距准确度的要求不断提高^[4],因此,高鉴相精度硬件的研究和设计具有重大意义。

一般的鉴相过程包含整形、鉴相、低通滤波和 A/D 转换 4 个环节。其工作原理为:整形电路使用两个比较器作为核心器件,分别将发射信号和接收信号(一般为正弦信号)转化为具有相同相位差的方波信号,之后将这两个方波信号接入鉴相器的输入端;鉴相器的输出信号为同频方波信号,占空比与发射信号和接收信号之间的相位差成正比;低通滤波器将鉴相器输出的方波信号转化为直流电平(DC)信号,电平值与方波信号占空比成正比,便于后级的 A/D 转换。目前,提高鉴相精度的研究主要集中在降频、选用集成鉴相芯片、采用数字鉴相技术、正交鉴相技术等方面^[5-6],却忽略了鉴相误差的另外两个重要来源。一是由于干扰信号的存在,整形后方波信号之间的相位差与初始相位差不一致;另一个是相位差变化时,低通滤波模块输出的 DC 信号为非线性变化,且范围较小,纹波较大,因此测量灵敏度较低,后级 A/D

采样误差较大。

为了提高鉴相精度,本文针对整形电路设计了迟滞比较器,并基于 MC4044 芯片设计了后级的放大/滤波模块。分析和实验结果表明,相比于传统的开环比较器,本文设计的迟滞比较器有效克服了因噪声信号引起的多重触发现象,解决了鉴相器输出方波信号高电平宽度不稳定的问题。与两种基于 MC4044 的典型放大/滤波方法相比,本文设计的放大/滤波模块具有线性度好,灵敏度高,输出 DC 信号上寄生纹波小的优势。

2 激光测距系统的总体构成

本文设计的激光测距系统采用了分散的直接法对非合作目标进行距离测量,其原理如图 1 所示。本系统使用了两把测尺:粗尺的调制频率为 15 kHz,测尺长度为 10 km,鉴相精度优于 1/100;精尺的调制频率为 1.5 MHz,测尺长度为 100 m,鉴相精度优于 1/1 000。本系统的测程为 10 km,测距精度优于 0.1 m。

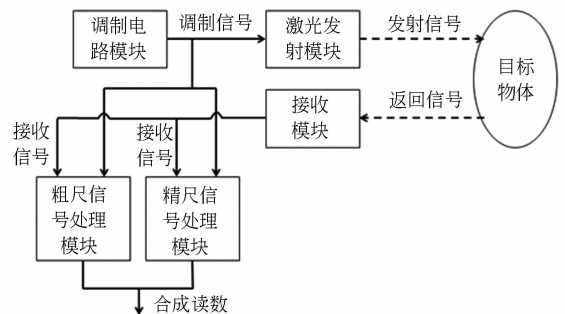


图 1 双侧尺激光测距系统总体原理图

Fig. 1 Block diagram of dual-ruler laser range finder

精尺信号处理模块的工作原理如图 2 所示。其中,精尺比较器的作用是对混频模块输出的 10

kHz 正弦信号进行整形,输出同频的方波信号,以满足后端精尺鉴相器的输入信号为方波的要求。精尺鉴相器对发射信号和接收信号的相位差进行鉴别,输出方波的占空比与发射/接收信号的

相位差成正比。精尺低通滤波器将鉴相器输出的不同占空比的方波信号转化为 DC 电平,通过测量其电压值可以间接计算出发射信号与接收信号之间相位差的大小。

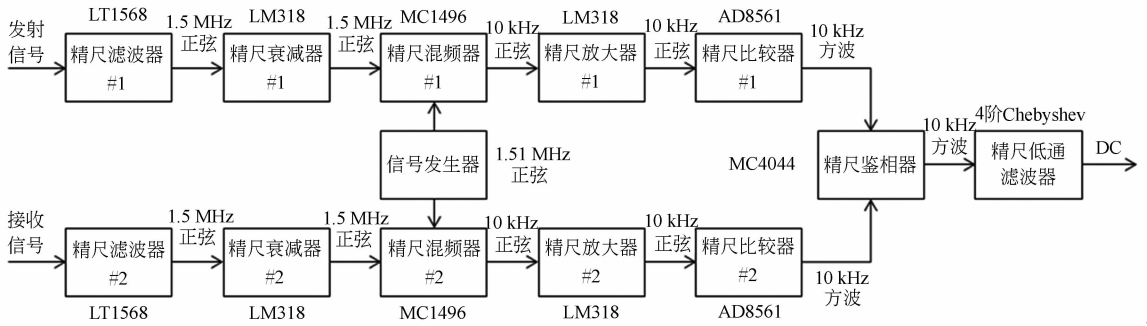


图 2 精尺信号处理模块原理图

Fig. 2 Block diagram of precision-ruler signal processing module

下面从理论分析和实际测试两方面对精尺比较器和精尺低通滤波器的设计进行讨论,以说明本文设计的整形模块和放大/低通滤波模块可以有效提升系统整体的鉴相精度。

于参考电压 V_r (即 GND) 上存在高频干扰信号,当 V_{in} 穿越 V_r 时,噪声信号也同时被开环增益放大,导致 V_o 。在 V_r 处发生了多次不期望的往返跳变,输出方波上升沿时间过长,因此鉴相器无法准确识别比较器输出方波的上升沿位置,降低了鉴相精度。

3 迟滞比较器的设计及实验研究

3.1 比较电路工作特点

精尺整形电路为过零比较器,使用了美国 AD 公司生产的 AD8561 芯片。整形模块一般采用开环比较电路的设计,它具有响应迅速、结构简单的特点^[7],其原理如图 3 所示。其中 V_{in} 为输入正弦信号(幅值为 ± 3 V), V_r 为参考电压(0 V)。

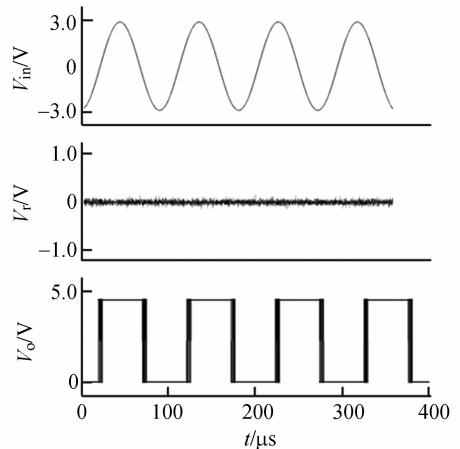


图 4 开环过零比较器输入输出关系(GND 上有噪声)
Fig. 4 Relationship between input and output signals of open-loop comparator (with noise on GND)

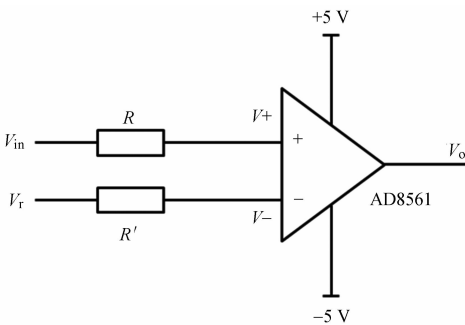


图 3 AD8561 构成的开环比较电路

Fig. 3 Open loop comparator using AD8561

在实际工程应用中,模拟地上往往存在一定的噪声干扰信号,这使得开环比较电路无法稳定工作,输入信号在参考电压比较点处往返变化,发生多重触发的现象^[8],如图 4 所示。可以看出,由

3.2 迟滞比较器介绍和理论分析

使用正反馈引入少量迟滞可以有效解决比较器多重触发的问题。迟滞能够将输出的上升和下降阈值基准分开,在一次输出跳变发生后,只有当输入信号发生明显的反向变化时,输出信号才会再次发生反向跳变。由 AD8561 构成的同相端反馈的迟滞比较器原理如图 5 所示。

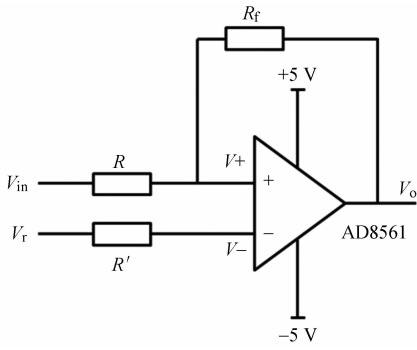


图 5 AD8561 构成的同相输入迟滞比较器

Fig.5 Comparator with hysteresis on its noninverting port

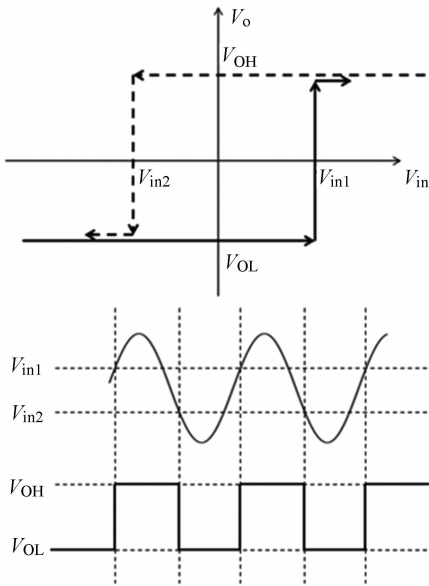


图 6 同相输入迟滞比较器输入信号与输出信号的关系

Fig.6 Relationship between input and output signals of comparator with hysteresis on its noninverting port

图 6 为迟滞比较器输入输出电压的关系。图中, V_{OH} 和 V_{OL} 分别为 AD8561 输出方波的高、低电压值, V_{in1} 和 V_{in2} 分别为输出方波上升沿和下降沿对应的输入信号电压值, 计算公式如式(1)和式(2)所示。

$$V_{in1} = \frac{R}{R_f}(V_r - V_{OL}) + V_r, \quad (1)$$

$$V_{in2} = \frac{R}{R_f}(V_r - V_{OH}) + V_r. \quad (2)$$

由式可见, 根据噪声信号强度, 通过控制同相端输入电阻 R 和反馈电阻 R_f 的大小, 能够调节 V_{in1} 和 V_{in2} 的值, 使它们在噪声范围之外, 从而避免输出方波信号的上升沿和下降沿重复跳变, 并

且使发射部分和接收部分的输入输出信号相位差保持一致。

3.3 实验结果与分析

对 AD8561 构成的开环比较器和迟滞比较器分别进行实验, 选取的参数为: 输入电阻 $R = 510 \Omega$, 反馈电阻 $R_f = 4.26 \text{ k}\Omega$, 阻抗匹配电阻 $R' = 1 \text{ k}\Omega$ 。由式(1)和式(2)计算可得, V_{in1} 和 V_{in2} 的理论值分别为 135 mV 和 -560 mV , 均在 GND 干扰信号 ($-58 \sim +80 \text{ mV}$) 之外。使用示波器对迟滞比较器的输入端和输出端信号进行观察, 波形如图 7 所示。可测得 V_{in1} 和 V_{in2} 的值分别为 132.5 mV 和 -543.75 mV , 与理论值接近。

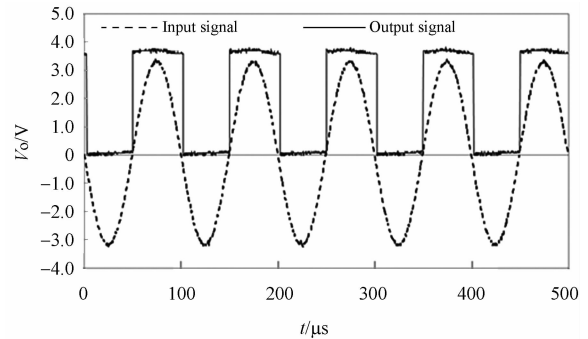


图 7 迟滞比较器输入信号和输出信号对比

Fig.7 Comparison of output and input signals of comparator with hysteresis

使用示波器对迟滞比较器和开环比较器的输出方波信号上升沿波形进行观察, 波形分别如图 8 和图 9 所示。可见, 开环比较器输出方波的上升沿发生了明显的多次触发, 上升沿时间为 $1.66 \mu\text{s}$; 而迟滞比较器输出方波的上升沿较为理想, 避免了往返跳变现象, 上升沿时间为 108 ns (主要由于 AD8561 自身的传输延迟和相应时间所致), 减

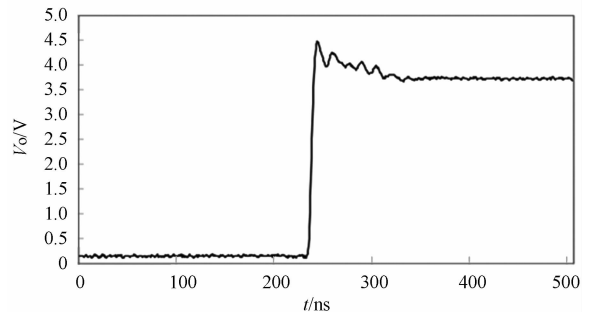


图 8 迟滞比较器输出方波上升沿波形

Fig.8 Rising edge of output square-wave signal of hysteresis comparator

小了 93.5%。由于数字鉴相器内部逻辑变化是由输入方波信号上升沿触发的,因此经过优化设计后的整形模块,其输出方波上升沿的延时误差对系统整体引入的鉴相误差仅为 0.010 8%,与“鉴相精度优于 1/1 000”的技术指标要求相比,可以忽略不计。

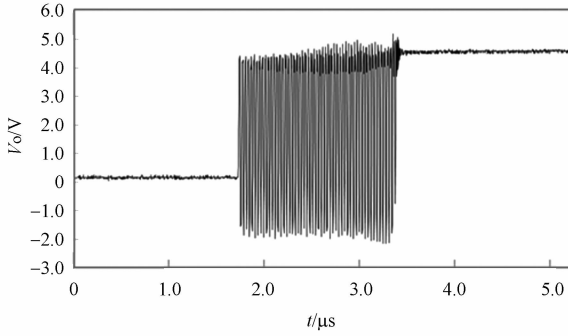


图 9 开环比较器输出方波上升沿波形

Fig. 9 Rising edge of output square-wave signal of open-loop comparator

4 基于 MC4044 的滤波放大模块优化

4.1 MC4044 鉴相器工作原理

精尺鉴相器使用了美国 MOTOROLA 公司生产的 MC4044 芯片,它的原理如图 10 所示。MC4044 由相位/频率检测器、电荷泵和放大器 3 部分组成。其中,相位/频率检测器对两路以脉冲形式输入的信号进行相位比较,比相部分输出脉冲宽度等于两路信号的相位差;电荷泵的本质是一个电流源,输出电流的有无和时间长短由比相部分输出的脉冲宽度所控制;放大器的作用是将电荷泵输出的电流信号转化为方波电压信号,并进行放大。

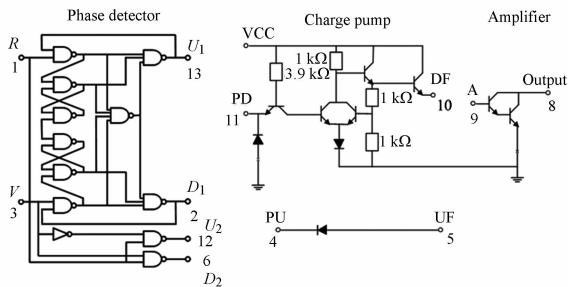


图 10 MC4044 鉴相器原理图^[11]

Fig. 10 Block diagram of MC4044^[11]

4.2 MC4044 后级典型放大/滤波模块(LPF # 1 和 LPF # 2)

在使用 MC4044 进行鉴相时,通常采用两种典型的放大/滤波电路(分别命名为 LPF # 1 和 LPF # 2)。其作用为:(1)将电荷泵输出的电流信号转化为电压信号,相当于负载电阻;(2)对方波信号进行低通滤波,将鉴相输出方波信号转化为 DC 电平,电平值与方波占空比成正比,便于后级的 A/D 转化。

文献[9~11]提出的放大/滤波模块 LPF # 1 如图 11 所示。其中, R_1, R_2, R_3, R_4, C_1 以及 MC4044 内部的达林顿管组成了第一级反相放大电路; C_2, C_3, R_5 以及电感 L 组成第二级二阶低通滤波电路。但由于电容 C_1 的充放电作用,当发射信号和接收信号间相位差扩大时,电荷泵输出方波的低电平上升,反相放大电路输出方波的高电平下降,从而导致低通滤波器输出的 DC 电平非线性变化,精度降低。

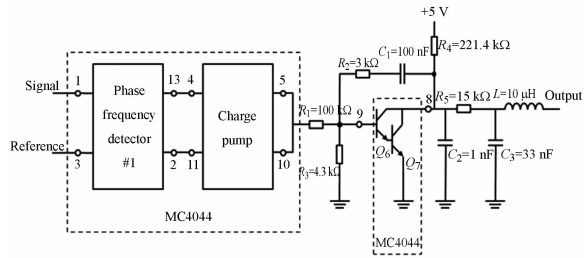


图 11 LPF # 1 原理图

Fig. 11 Block diagram of LPF # 1

文献[12]与 MC4044 数据手册提出的放大/滤波模块 LPF # 2 如图 12 所示。其中, R_1 是上拉电阻, R_2 和 C 构成了一阶低通滤波电路。但由于电荷泵输出方波的低电平约为 0 V,高电平约为 2.25 V,因此当相位差变化时,LPF # 2 输出的 DC 电平的线性变化为 0~2.25 V,范围较小,因此测量灵敏度较低。

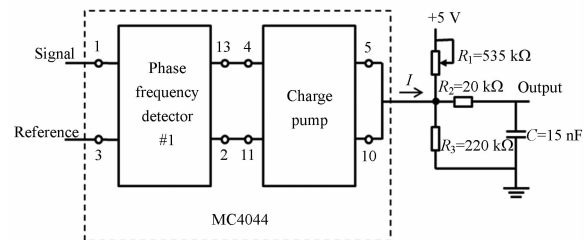


图 12 LPF # 2 原理图

Fig. 12 Block diagram of LPF # 2

4.3 MC4044 后级放大/滤波模块的优化设计 (LPF # 3)

为了解决 LPF # 1 和 LPF # 2 存在的问题, 本文使用 TI 公司的 FilterPro 软件设计了如图 13 所示的 4 阶 Chebyshev 型低通滤波器(LPF # 3)。与其它类型的低通滤波器(如 Butterworth 型、Bessel 型或 Cauer 型)相比, 在阶数、截止频率、通带波动和增益倍数一致的前提下, Chebyshev 型低通滤波器具有更高的 Q 值。本文设计的 LPF # 3 由两级 2 阶有源低通滤波器组成, 截止频率分别为 1.791 和 3.093 8 kHz, Q 值分别为

0.705 和 2.941, 总截止频率为 3 kHz, 增益为 5.393 dB(1.860 5 V/V)。相比于基于 MC4044 的两种典型放大/滤波模块设计, LPF # 3 的优势为:(1)与 LPF # 1 相比, 输入阻抗更高, 对前级电荷泵输出信号的影响可以忽略, 克服了相位差变化时低通滤波器输出的 DC 电平值非线性变化的缺陷;(2)与 LPF # 2 相比, 低通滤波器增益由 0 dB 提高至 5.393 dB, 因此输出的 DC 值变化范围更大, 测量灵敏度更高;(3)LPF # 3 的阶数更高, 滤波效果更好, 因此输出 DC 电平上的寄生干扰纹波幅值更小, 减小了后级 A/D 采样的误差。

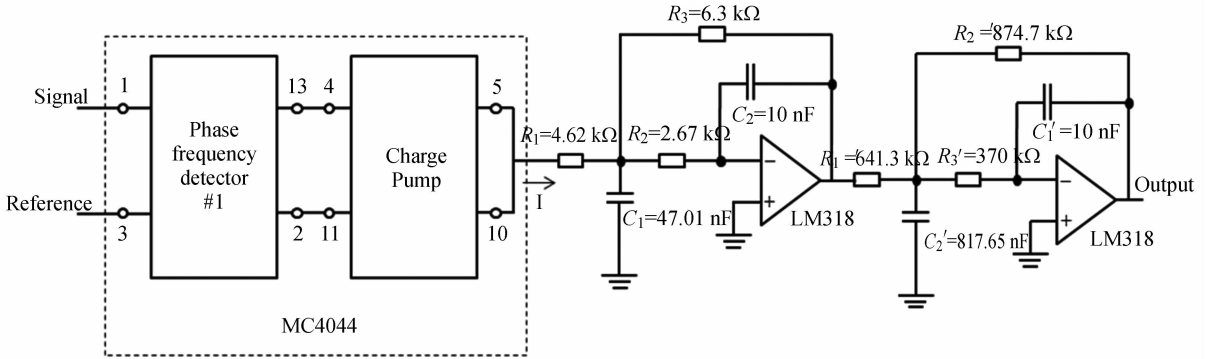
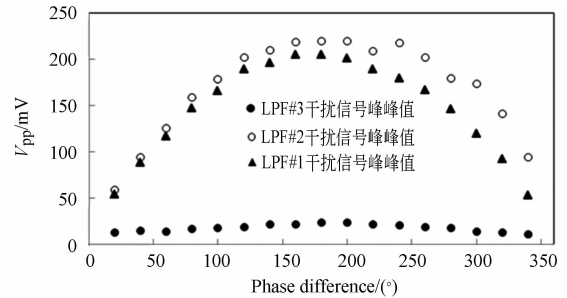


图 13 LPF # 3 原理图

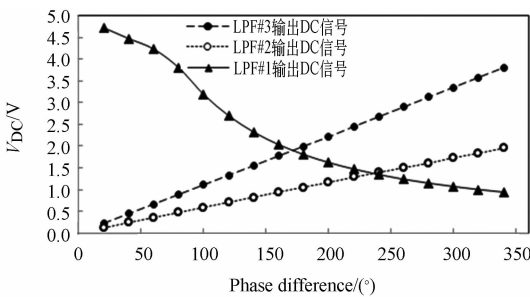
Fig. 13 Block diagram of LPF # 3

4.4 实验结果与分析

MC4044 的两路输入信号 Signal 和 Reference 由信号发生器给出。它们频率为 10 kHz, 幅值为 0~3.6 V, 占空比为 50% 的方波。定义 Signal 为接收信号, Reference 为发射信号, 因此, Signal 比 Reference 相位滞后。调节二者之间的相位差分别为 20, 40, 60, ..., 320, 340°, 记录 3 种放大/低通滤波模块输出的 DC 值和其上的寄生



(b) LPF # 1~3 输出 DC 电平上寄生干扰信号峰峰值
 (b) V_{pp} of interfering signal on DC output of LPF # 1~3



(a) LPF # 1~3 输出 DC 电平值与 MC4044 输入信号相位差之间的关系
 (a) Relationship between output DC values and phase difference of MC4044 input signals among LPF # 1~3

图 14 LPF # 1~3 输出 DC 电平值以及其上寄生的干扰信号峰峰值
 Fig. 14 Output DC values of LPF # 1-3 and peak-to-peak values of interfering signal

干扰信号峰峰值, 分别如图 14(a) 和图 14(b) 所示。由图 14(a) 可以看出: 与 LPF # 1 相比, LPF # 3 输出 DC 电平值的线性度得到改善, R^2 值由 0.908 3 变为 0.999 9; 与 LPF # 2 相比, LPF # 3 的转化增益常量(即直线拟合斜率)更高, 由

0.005 7 V/(°)变为 0.011 2 V/(°),提高了 96.5%,因此 LPF # 3 输出的 DC 电平值变化范围更广,测量灵敏度更高。由图 14(b)可以看出,使用 LPF # 3 时,输出 DC 电平上干扰信号的峰值由 50~230 mV(LP#1 和 LPF # 2)明显下降至 10~20 mV,因此可以减小后级 A/D 采样误差,提高鉴相精度。

5 结 论

鉴相精度的提高直接决定了相位式激光测距系统的测距精度。为了提高鉴相精度,本文设计了基于 AD8561 芯片的迟滞比较器和基于 MC4044 鉴相芯片的后续放大/滤波电路。分析

和实验结果表明,相比于传统的开环比较器,本文设计的迟滞比较器可以有效克服 GND 噪声引起的多重触发现象,输出方波的上升沿时间由 1.66 μ s 下降为 108 ns,从而解决了鉴相器输出方波信号高电平宽度不稳定的问题。与两种基于 MC4044 鉴相芯片的典型放大/滤波方法相比,本文设计的放大/滤波模块分别克服了输出 DC 电平值非线性变化的缺陷线性度(R^2)值由 0.908 3 提高至 0.999 9)和测量灵敏度较低的缺陷(转化增益常量提高了 96.5%),而输出 DC 电平上的干扰信号峰峰值则由 50~230 mV 下降至 10~20 mV,可以有效减轻后级 A/D 转化的压力,降低鉴相误差。本设计为高精度相位式激光测距系统提供了硬件保障。

参考文献:

- [1] 刘秉琦,周斌,武东生,等. 双通道激光主动探测系统[J]. 光学精密工程,2012,20(2): 241-246.
LIU B Q, ZHOU B, WU D SH, *et al.*. Dual-channel active laser detection system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(2):241-246. (in Chinese)
- [2] 张雏,周冰,沈学举,等. 精确校正激光测距仪三光轴平行的理论计算方法研究[J]. 光学精密工程,2002,10(6):650-654.
ZHANG CH, ZHOU B, SHEN X J, *et al.*. Study of the calculation method for accurately adjusting laser range finder's three optic axes to parallel to each other [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002, 10(6): 650-654. (in Chinese)
- [3] 贾方秀,丁振良,袁锋. 相位法激光测距接收系统[J]. 光学精密工程,2009,17(10): 2377-2384.
JIA F X, DING ZH L, YUAN F. Phase-shift laser range finder receiver system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(10): 2377-2384. (in Chinese)
- [4] 王选钢,缙宁祎,张珂殊. 相位式激光测距谱分析鉴相的无偏改进[J]. 光学精密工程,2012,20(4): 888-895.
WANG X G, GOU N Y, ZHANG K SH. Unbiased improvement of spectrum analysis phase discrimination for phase-shift laser range finder [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(4): 888-895. (in Chinese)
- [5] 李焯,董秀珍,刘锐岗,等. 生物磁感应成像中的高精度鉴相方法研究[J]. 北京生物医学工程,2006,

25(4): 351-354.

- LI Y, DONG X ZH, LIU R G, *et al.*. The study of high resolution phase detecting method in biological magnetic induction imaging [J]. *Beijing Biomedical Engineering*, 2006, 25(4): 351-354. (in Chinese)
- [6] 胡宗恺,饶志宏. 高精度数字鉴相技术的 FPGA 实现[J]. 通信技术,2010,12(43): 177-179.
LIU Z K, RAO ZH H. FPGA realization of high precise digital phase discrimination technology [J]. *Communications Technology*, 2010, 12(43): 177-179. (in Chinese)
- [7] 唐姗姗. 用于地震检波的高精度 A/D 转换器设计[D]. 济南:山东大学,2010.
TANG SH SH. *Design of high-resolution A/D converter in seismometer* [D]. Jinan: Shandong University, 2010. (in Chinese)
- [8] 刘黎辉,吴志海,汪道辉,等. 高速迟滞比较电路研究及实验[J]. 电子测量技术,2007,30(2): 46-49.
LIU L H, WU ZH H, WANG D H, *et al.*. Research and experiment of high-speed comparing circuit with hysteresis [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2007, 30(2): 46-49. (in Chinese)
- [9] 尤政. 光外差干涉相位检测技术[J]. 计量技术,1995,5:2-4.
YOU ZH. Phase detection using heterodyne interference technology [J]. *Measurement Technology*, 1995, 5:2-4. (in Chinese)
- [10] 刘振余,宋鸿霞,夏仲英. MC4044 数字鉴相器的分析及应用[J]. 无线电通信技术,1982,4: 20-29.
LIU ZH Y, SONG H X, XIA ZH Y. Analysis

and application of MC4044 digital phase detector [J]. *Radio Communication Technology*, 1982, 4: 20-29. (in Chinese)

- [11] SUN G F, GU Q T, LIU X B. Principle and implementation of an MC4044-based phase locked loop for constant speed control [J]. *Tsinghua Science and Technology*, 2000, 5(4): 409-413.

- [12] 赵洪志, 赵洋, 王佳, 等. 一种宽量程光外差干涉信号的处理方法[J]. *光学精密工程*, 1996, 4(4): 130-133.

ZHAO H ZH, ZHAO Y, WANG J, *et al.*. A wide-range processing method for optical heterodyne interference signal [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1996, 4(4):130-133. (in Chinese)

作者简介:



尤 政(1963—),男,江苏扬州人,博士,教授,博士生导师,1985年、1987年、1990年于华中科技大学分别获得学士、硕士和博士学位,主要从事微米/纳米技术、微光机电系统集成、微纳卫星技术等方面的研究。E-mail: yz-dpi@mail. tsinghua. edu. cn



杨 冉(1987—),男,山西太原人,硕士研究生,2010年于清华大学获得学士学位,主要从事激光测距方面的研究。Email: russell247@163. com



张高飞(1977—),男,河南开封人,博士,副研究员,2000年,2005年于清华大学分别获得学士、博士学位,主要从事 MEMS 技术、微小卫星技术等方面的研究。E-mail: zgf@mail. tsinghua. edu. cn



薛旭峰(1992—),男,山西运城人,本科生,主要从事激光测距方面的研究。Email: xuexufengcanon@qq. com



叶良琛(1990—),男,安徽长丰人,博士研究生,2012年于清华大学获得学士学位,主要从事激光测距和 MEMS 扫描显微镜方面的研究。Email: yelc08@yahoo. cn

(版权所有 未经许可 不得转载)