

基于相参积累激光扫频干涉液位测量方法研究

金陈凯, 刘易, 何泽聪, 许新科
(中国计量大学计量测试工程学院, 浙江 杭州 310018)

摘要: 工业生产中, 容器内液位高度的控制是生产运输过程中对确保设备正常运行和维护人员生命安全具有重要意义。本文提出采用激光扫频干涉测量系统对液位进行测量, 该方法具有诸多优势, 如测量范围大、非接触式测量、响应速度快和操作便捷等。由于液体对红外光的吸收率相对较高, 导致测量系统采集到的回光信号非常微弱, 同时信噪比也不够理想。为解决此问题, 本文引入相参积累方法, 并将其与测量系统相结合, 以提高液位检测的精度。在信号的各个周期中, 信号携带的有效信息保持一致, 噪声信息是则随机的, 因此通过相参积累方法处理后, 不仅可以增强信号强度, 还可以提升信噪比。再通过扩相频率采样法进行信号的非线性校正, 最后对数据进行处理就, 即可以获得液位信息。实验结果表明, 相参积累方法对增加信号强度与信噪比有显著效果, 为解决低信噪比下提升测量精度问题提供了思路。

关键词: 激光扫频干涉测距; 相参积累; 扩相频率采样法; 液位测量

中图分类号: TN249; TH74 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2024.07.005

Research on laser swept frequency interferometry for liquid level measurement based on phase accumulation

JIN Chen-kai, LIU Yi, HE Ze-cong, XU Xin-ke

(College of Metrology and Measurement Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: In industrial production, precise control of liquid levels within containers holds paramount importance in ensuring smooth equipment operation and safeguarding the lives of maintenance personnel during production and transportation. This paper proposes the utilization of a laser swept frequency interferometry measurement system for liquid level assessment, which has many advantages, such as large measurement range, non-contact measurement, swift response time and convenient operation. Given that liquids exhibit a relatively high absorption rate for infrared light; the backscattered signal acquired by the measurement system is exceedingly weak, leading to a less-than-ideal signal-to-noise ratio. To address this issue, the phase accumulation method is introduced and combined with the measurement system to improve the accuracy of liquid level detection. In each cycle of the signal, the effective information carried by the signal remains consistent, and the noise information is then random. Therefore, employing the phase accumulation method not only amplifies signal strength but also elevates the signal-to-noise ratio. Further, by utilizing a phase-frequency sampling technique for nonlinear correction of the signal, followed by data processing, the liquid level information can be obtained. The experimental results show that the phase parameter accumulation method has a significant effect on increasing the signal strength and signal-to-noise ratio, thus providing a promising approach to enhance meas-

基金项目: 浙江省自然科学基金项目(No. LY19F050008)资助。

作者简介: 金陈凯(1999-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向激光雷达测距。E-mail: 897731143@qq.com

通讯作者: 许新科(1984-), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为激光雷达。E-mail: xuxinke-123@163.com

收稿日期: 2023-10-13

urement precision under conditions of low signal-to-noise ratio.

Keywords: laser swept-frequency interference ranging; phase accumulation; phase-frequency sampling method; liquid level measurement

1 引言

液位测量是工业生产中重要的检测与控制参数之一,涵盖广泛的应用领域,如化工原料储存、食品药物加工制造和交通运输等。液位测量的准确性和可靠性对于生产效率、安全性和质量控制都起着重要的作用。在人工智能与互联网快速发展的现在,液位测量技术得到了极大的发展,从传统的机械式接触式液位测量,到现在的非接触式液位测量,这些技术的不断革新和创新,使得液位测量变得更加精确、便捷和高效,同时也要求我们在特殊恶劣环境中进行稳定且可靠的测量^[1-3]。尽管接触式液位测量技术已经相当成熟,但依然面临着一些难以克服的问题,如容器液体受污染、液体腐蚀传感器、易燃易爆液体受静电干扰等^[4-7]。因此,非接触式液位测量技术被视作未来液位测量技术的发展方向。

液位测量常见的检测方法有浮子式液位测量、电测式液位测量、超声波和雷达液位测量、光纤式液位测量等^[8-11]。其中浮子式液位测量是将浮子与传动装置相连,通过浮子的位置变化将信息传递至位移传感器,从而实现液位的测量,虽然它具有结构简单、使用方便等优点,但也存在测量误差较大、易受液体温度和密度影响,而且接触式测量也容易出现测量故障等问题^[12]。电测式液位测量是通过监测液体与电极之间的电阻变化来实现液位的测量,通过测量和分析电极的电阻值,获取液位高度的信息,其具有响应速度快、适用各种介质和温度的优点,但是容易受到电磁干扰的影响,无法用于测量易燃易爆和腐蚀性液体。超声波和雷达液位测量分别通过发射超声波波束和微波信号,并接收反射回来的信号来实现液位高度的测量,此类测量方法属于非接触测量且精度高,然而环境对于超声波测量距离与精度的影响较大,而雷达测量电路复杂且价格昂贵^[13]。光纤式液位测量是将液位高度转换为光学参量来实现液位高度的测量,其拥有出色的抗电磁干扰能力,适用于易燃易爆环境,能够传输大量信息,且拥有广泛的测量范围,然而,其在测距方面存在较大的精度误差,需要进一步提升精度^[14]。

本文基于激光扫频干涉技术设计了一种液位测量系统,该测量系统具有精度高、低成本、实时性好等特点,而且适用于易燃易爆液体的测量。在实践方面都具有较大的意义。

2 实验原理

2.1 基于扩相频率采样法激光扫频干涉测量原理

本文设计了一种基于激光调频连续波距离测量系统,用于液位测量,以计算液位高度的变化。获取的数据将通过相参积累结合扩相频率采样法进行处理^[15],使用该方法具有校正激光器存在非线性、提高信号的信噪比、满足奈奎斯特采样定律的限制、速度快以及装置便捷的优势。

基于激光扫频干涉距离测量系统框图^[16]如图1所示。以三角波形式对调频激光器进行线性调频,输出激光信号,经过隔离器后被耦合器1(99:1)分为两束信号。其中99%的信号进入测量信号路,1%的信号进入辅助信号路。测量路信号经过耦合器2(99:1)分为两束信号,其中高能量信号为测量信号,通过环形器、发射镜头射出直至目标,经过目标反射后回到系统回路中;另一束参考信号,经过单模光纤延迟后与测量信号通过耦合器3发生干涉,在光电探测器1上生成测量路拍信号,并记录数据。辅助信号路通过耦合器4(50:50)后,分别进入到臂长差不同的马赫泽德干涉光路(辅助干涉仪)^[17-18],通过耦合器5后,在光电探测器2上形成辅助路拍信号,将信号输送至系统后进行数据处理。

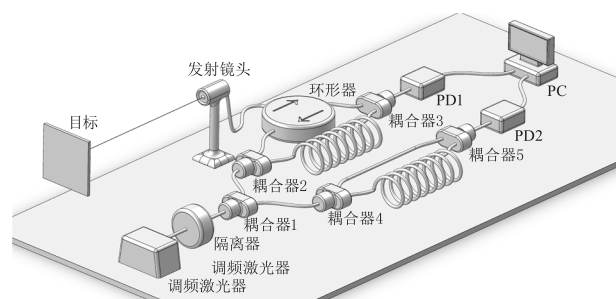


图1 激光扫频干涉距离测量系统框图

Fig.1 Schematic of laser swept frequency interference distance measurement system

激光扫频干涉距离测量原理如下,拍频形成示意图如图2所示。

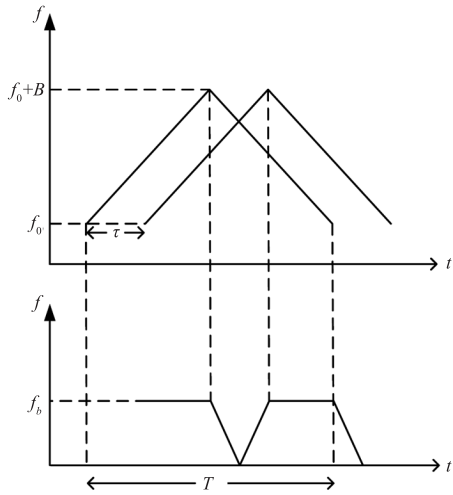


图2 拍频信号形成示意图

Fig.2 Schematic diagram of beat frequency signal formation

可调频激光器输出的激光线性调频函数为:

$$f = \frac{1}{2\pi} \frac{d\phi(t)}{dt} = f_0 + kt, \quad -T/2 < t < T/2 \quad (1)$$

其中, $\phi(t)$ 为任意时刻激光器的相位; f_0 为激光器输出的初始频率; $k = 2B/T$ 为激光调频斜率; T 为激光调频周期; B 为激光调频带宽。在测量光路中, 由于测量光走过的光程与参考光不同, 使得两路信号到达光电探测器时会存在延迟差 τ , R 为激光在

$$I = \eta A_a A_b \cos \left\{ 2\pi \left(f_0 t + \frac{1}{2} \frac{B}{T} t^2 \right) - 2\pi \left[f_0 \left(t - \frac{2Rn}{c} \right) + \frac{1}{2} \frac{B}{T} \left(t - \frac{2Rn}{c} \right)^2 \right] \right\}$$

$$= \eta A_a A_b \cos \left\{ 2\pi \left[\frac{B}{T} \frac{2Rn}{c} t + f_0 \frac{2Rn}{c} - \frac{1}{2} \frac{B}{T} \left(\frac{2Rn}{c} \right)^2 \right] \right\} \quad (5)$$

其中, η 为外差干涉效率。通过上式可以看出光电探测器中的电信号为余弦信号, 那么拍频信号的频率为:

$$f_b = \frac{2RnB}{cT} \quad (6)$$

整理后可得目标对应的距离为:

$$R = \frac{c\tau}{2n} = \frac{cT}{2nB} f_b = \frac{c}{nk} f_b \quad (7)$$

在辅助信号路中, 由于两路信号同源, 因此激光信号的初相位以及频率都相同。 R_j 为延迟光纤的臂长差, n_j 为辅助干涉仪中光纤的折射率, 则辅助干涉仪所对应的时延 τ_j 为:

$$\tau_j = \frac{R_j n_j}{c} \quad (8)$$

光电探测器 2 中的拍信号可以表示为:

$$I_j(t) = I_{jL} \cos[2\pi f(t) \tau_j] \quad (9)$$

空气中单向传播的距离; n 为空气的折射率, c 为光速, 有:

$$\tau = \frac{2Rn}{c} \quad (2)$$

测量光路中的拍信号是将发射信号与回波信号相互干涉得到的, 其频率与目标的距离成正比。

由式 (1) 可知, 参考光信号可以表示为:

$$I_L = A_a \cos[\phi(t)]$$

$$= A_a \cos \left[2\pi \left(f_0 t + \frac{1}{2} k t^2 \right) \right]$$

$$= A_a \cos \left[2\pi \left(f_0 t + \frac{1}{2} \frac{B}{T} t^2 \right) \right] \quad (3)$$

其中, A_a 为参考光信号的振幅。那么测量光信号可以表示为:

$$I_M = A_b \cos[\phi(t - \tau)]$$

$$= A_b \cos \left\{ 2\pi \left[f_0 (t - \tau) + \frac{1}{2} \frac{B}{T} (t - \tau)^2 \right] \right\}$$

$$= A_b \cos \left\{ 2\pi \left[f_0 \left(t - \frac{2Rn}{c} \right) + \frac{1}{2} \frac{B}{T} \left(t - \frac{2Rn}{c} \right)^2 \right] \right\} \quad (4)$$

其中, A_b 为测量光信号的振幅, 将参考光信号与测量光信号的表达式相结合, 得到的就是光电探测器 1 中形成的拍频信号, 其形成的光电流为:

其中, I_{jL} 为幅值。为了实现拍频非线性的校正, 利用辅助信号路中的拍信号相位对测量信号进行插值拟合, 可得:

$$2\pi f(t) \tau_j = 2\pi i + \frac{\pi}{2} \quad (i \in N) \quad (10)$$

$$f(t) = \frac{1}{\tau_j} \left(i + \frac{1}{4} \right) \quad (11)$$

由于辅助信号路与测量信号路的信号源都来自于同一个激光器, 具有相同的瞬时光频, 因此测量信号路的拍信号可以表示为:

$$I(t) = I_L \cos[2\pi f(t) \tau]$$

$$= I_L \cos \left[2\pi \frac{1}{\tau_j} \left(i + \frac{1}{4} \right) \tau \right]$$

$$= I_L \cos \left(2\pi \frac{\tau}{\tau_j} i + \frac{\pi}{2} \frac{\tau}{\tau_j} \right)$$

$$= I_L \cos \left(2\pi \frac{\tau}{\tau_j} i + \phi' \right) \quad (12)$$

其中, ϕ' 为重新拟合后的新信号的初相位。由上式可知该信号与时间 t 无关,故可以改写成:

$$I(i) = I_L \cos(2\pi \frac{\tau}{\tau_j} i + \phi') \quad (13)$$

设新信号的频率为 f' , 可得:

$$f' = \frac{\tau}{\tau_j} = \frac{\frac{2Rn}{c}}{\frac{R_j n_j}{c}} = \frac{2Rn}{R_j n_j} \quad (14)$$

整理后可得目标对应的距离为 R :

$$R = \frac{R_j n_j f'}{2n} = \frac{1}{2} \frac{n_j}{n} \frac{\tau}{\tau_j} R_j \quad (15)$$

通过提前标定 R_j , 即可以计算出目标距离 R 。测得的最终目标距离与激光的调频非线性无关,证明了频率采样法对激光的调频非线性具有较好的校正作用。

尽管非线性问题已经得到校正,但仍面临一个无法避免的难题:基于奈奎斯特采样定律,要求被测目标距离不能超过辅助干涉仪光程的 $1/4$,这将极大地限制测距系统的测量上限。本文采用扩相频率采样法,在目标绝对距离与辅助干涉仪光程差不满足要求时,提供了扩展测距量程的思路。

测量信号路与辅助信号路的拍信号可以分别表示为:

$$I(t) = I_L \cos[2\pi f(t)\tau] \quad (16)$$

$$I_j(t) = I_{jL} \cos[2\pi f(t)\tau_j] \quad (17)$$

将辅助路信号式(17)提取相位信息 ϕ_j , 将提取到的相位扩大 M 倍。将扩展后的相位每经过整周期时刻对测量信号进行拟合采样,最终实现扩相频率采样法的非线性校正。

$$I'_j(t) = I_{jL}(M\phi_j) = I_{jL} \cos[2\pi f(t) \cdot M\tau_j] \quad (18)$$

结合式(18)与式(15),可得到绝对距离测量公式:

$$R = \frac{R_j n_j M f'_e}{2n} = \frac{1}{2} \frac{n_j}{n} \frac{\tau}{\tau_{j_e}} M R_j \quad (19)$$

其中, $f'_e = f'/M$ 为测量信号路经过扩相频率采样法后得到的拍频信号频率, $\tau_{j_e} = M\tau_j$ 为辅助信号路扩相后所对应的时延。一般来说采取四倍的相位扩展。

2.2 相参积累原理

由于大多数液体对红外光的吸收率较高,会

导致测量光信号较弱,使得拍信号振幅较小、最终信号的信噪比较低^[19],难以进行后续的数据处理。本文采用相参积累的方法对信号进行处理^[20-23]。

在计算机中获的复回波信号 $Ae^{i\phi}$ 和加性噪声 w 。在通带中,通常假设噪声是随机过程,其功率为 σ^2 。那么该信号的信噪比被定义为:

$$X_1 = \frac{\text{信号功率}}{\text{噪声功率}} = \frac{A^2}{\sigma^2} \quad (20)$$

将 N 个周期的信号以相同的相位进行叠加,每个周期信号中所附带的有效信息相同,而噪声相互独立。将信号进行积累后,会产生一个新的信号 Y ,这个信号累积的过程被称为相参积累,可以表示为:

$$Y = \sum_{n=0}^{N-1} \{Ae^{i\phi} + w[n]\} = NAe^{i\phi} + \sum_{n=0}^{N-1} w[n] \quad (21)$$

可以明显的观察到,经过积累后的信号 Y 的信号功率为 $N^2\sigma^2$,若其中的噪声函数 $w[n]$ 是均值为零且相互独立的,那么积累后的噪声功率就为各个独立噪声功率之和。假设每个独立噪声的功率相同且都为 σ^2 ,则积累后总噪声的功率为 $N\sigma^2$ 。经过相参积累后的信噪比变为:

$$X_N = \frac{N^2 A^2}{N\sigma^2} = N \frac{A^2}{\sigma^2} = NX_1 \quad (22)$$

通过上述公式可以知道,将 N 个周期信号经过相参积累后,信号的信噪比可以变为原来的 N 倍。在相参积累的过程中,有效信息分量是同相加的,但对于噪声分量来说,各个噪声的相位是随机的。正是由于信号相位的一致性,使得在积累的过程中信号频率的增长速度比噪声频率的增长速度更快。

3 液位实验结果与分析

实验测试装置如图3所示,探测距离约为 $0.2 \sim 0.5$ m,将测量系统置于水平面上,将滴定管垂直固定于底面,确保发射镜头的平行光与液面处于垂直状态。测量系统发出的激光是由准三角波调制而成的,中心波长为 1550.12 nm,平均功率为 15 mW,调频带宽为 35 GHz,调频周期为 1 ms。对液位进行测量时,光线垂直于水平液面,首先测量发射点与液面的距离,然后通过滴定管调整液位高度,再次测量发射点与液面的距离。这两

次距离差即为滴定管中液位的变化量。计算机同时获取测量信号路和辅助信号路的信号,并利用相参积累提高采集到信号的信噪比,随后通过扩相频率采样法校正信号的非线性,进行数据处理后,可以得到最终的液位变化值。

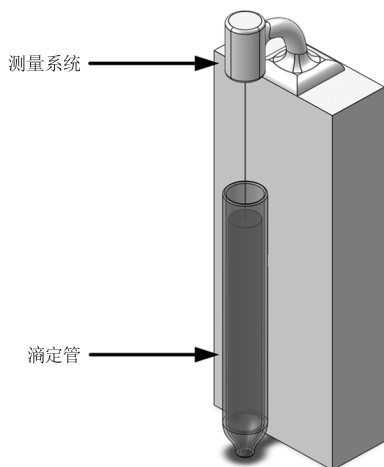
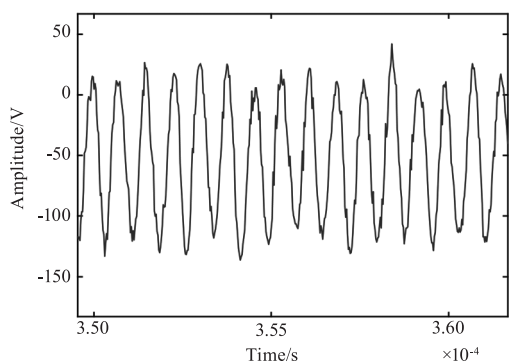


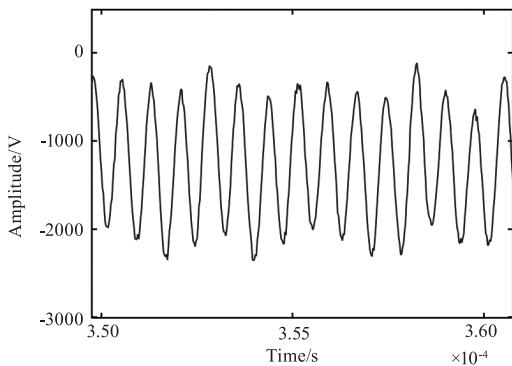
图3 液位测量实验示意图

Fig.3 Schematic diagram of liquid level measurement experiment

在进行扩相频率采样法之前,先对信号进行相参积累处理。相参积累前后对比图如图4所示。



(a) 相参积累前的信号

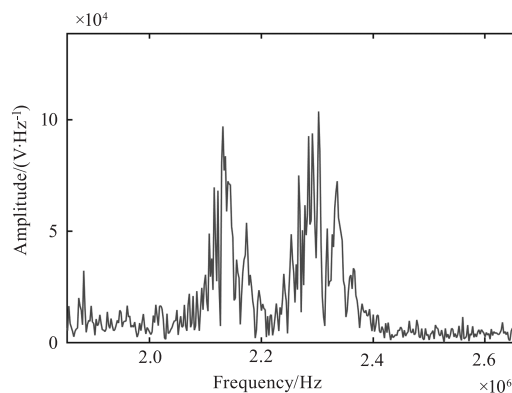


(b) 相参积累后的信号

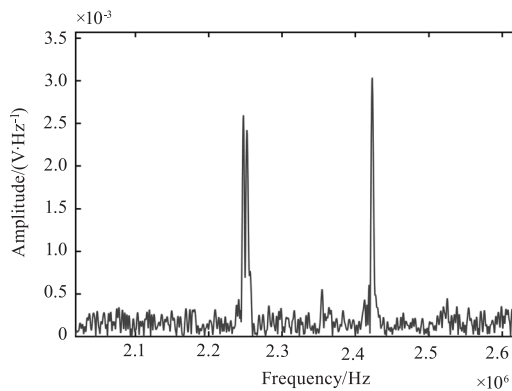
图4 相参积累前后信号对比图

Fig.4 Comparison chart of signals before and after phase accumulation

通过比较图4(a)与图4(b),可以观察到相参积累处理后的信号幅值显著增加,而且相对于相参积累前的信号,噪声毛刺明显减少,使其更加的光滑。选取经过相参积累处理后的信号,并对其进行扩相频率采样法,即使在不满足奈奎斯特采样定律的情况下,也能有效进行非线性校正。扩相频率采样法校正非线性前后对比图如图5为所示。



(a) 非线性校正前的频谱图



(b) 非线性校正后的频谱图

图5 扩相频率采样法校正非线性前后对比图

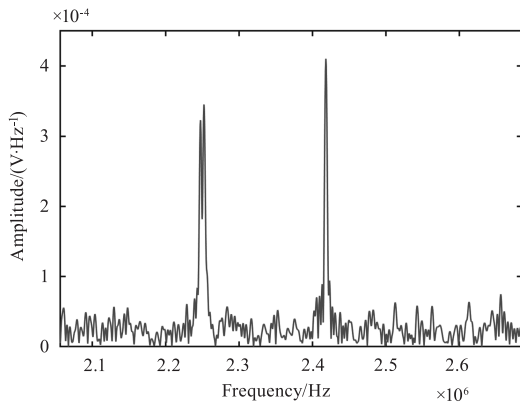
Fig.5 Comparison between before and after correction of nonlinearity by phase spreading frequency sampling method

由图5可以明显看出,经过扩相频率采样法处理后的数据,频谱展宽的现象得到了明显的改善,将展宽的频谱变为具有单一峰值的频谱,得后续提取目标频率的尖峰更加清晰方便,还提高了信噪比。在经过测量后,图5(a)中信号的频谱宽度为86676.29737 Hz,图5(b)信号的频谱宽度为3970.416667 Hz,计算可得经过非线性校正后信号频谱宽度减小了21倍。

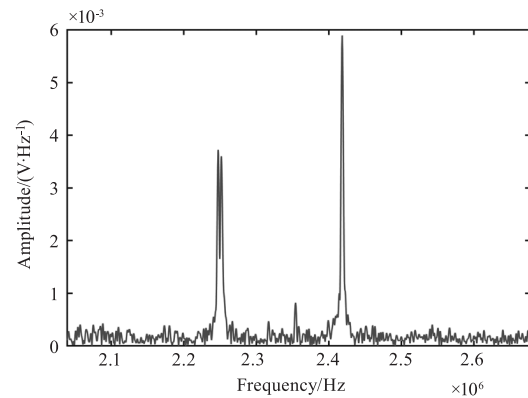
对未经过相参积累处理的信号和经过相参积累处理后的信号分别进行数据处理,最后获得频谱图

如图 6 所示。

对比前后两张频谱图,可知明显观察到信号幅值显著增加,信噪比也得到了显著提高。图中第一个峰为测量系统中发射镜头内部反射产生的信号;而第二个峰为滴定管液面反射的信号。第二个峰的峰值信息内包含了后续处理所需的距离信息。



(a) 未经过相参积累的信号频谱图



(b) 相参积累后的信号频谱图

图 6 相参积累前后信号的频谱图

Fig. 6 Spectrogram of signals before and after phase accumulation

使用 30 mm 的量块来标定测量系统,并通过滴定管的生产指标来确定不同刻度之间的间距。通过处理不同液位下的数据,计算出液位距离的变化,并与刻度变化相比较。然而由于滴定管放液的随机性,不能保证每次液位变化量相同。为保证液位尽可能与刻度线平齐,便于读数记录,可能会出现相邻组的数据刻度不相邻的情况。结果如表 1 所示。

表 1 计算测量距离结果与实际绝对距离对比

Tab. 1 Comparison between calculated measurement distance results and actual absolute distance

相邻数据对应的 刻度差/ml	所对应的实际 距离/mm	未相参积累计算 测量的结果/mm	相参积累后计算 测量的结果/mm	未相参积累的 误差/mm	相参积累后的 误差/mm
0.4	5.79	6.08	5.76	0.29	-0.03
0.5	7.24	7.46	7.45	0.22	0.21
1.5	21.71	20.68	21.66	-1.02	-0.05
0.5	7.24	7.10	7.28	-0.13	-0.01
1.0	14.47	13.28	14.09	-1.19	-0.39
1.4	20.26	20.48	20.07	0.22	-0.19
2.1	30.39	29.68	30.45	-0.71	0.06

如表 1 所示,将两种处理方法计算获得的绝对距离与实际绝对距离进行比较。未经过相参积累的数据明显实验误差较大;而经过相参积累的数据,经处理后误差在 400 μm 以内。实验结果证明,相参积累能提高信噪比较低或是能量较微弱的信号,从而便于后续的数据处理。同时也有效提高了在低信噪比信号影响下的测量的精度。

4 结 论

本文采用激光扫频干涉测距系统对液位进行测量,由于大多数液体对红外光的吸收率较高,反射率较低,导致接收信号微弱、信噪比较低的问题。为解

决该问题,本文采用相参积累的方法与激光扫频干涉测距系统相结合,对滴定管中的液位进行测量。该测距过程先对信号进行相参积累处理,以提升信号强度和信噪比,再通过扩相频率采样法对测量信号的非线性进行校正,最后进行数据的处理。实验结果表明,该方法显著减小了测量误差,并在提升信号强度与信噪比的同时,也有效的提高了液位测量的精度。

参考文献:

- [1] Yu Liang. Liquid level measurement system of oil tank car

- based on FMCW radar[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2019. (in Chinese)
- 喻良. 基于 FMCW 雷达的油罐车液位测量系统[D]. 北京:北京工业大学, 2019.
- [2] Zhu Qingbin. FMCW level radar system control and echo signal processing circuit design[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2011. (in Chinese)
- 朱庆彬. FMCW 液位测量雷达系统控制及回波信号处理电路设计[D]. 大连:大连海事大学, 2011.
- [3] Cong Wenjie. The design and implementation of FMCW level radar experiment platform based on DSP [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2012. (in Chinese)
- 丛文杰. 基于 DSP 的 FMCW 液位测量雷达实验平台设计与实现[D]. 大连:大连海事大学, 2012.
- [4] Yuan Zhaoqing, Chen Feixiang, Xu Songzhi, et al. Survey on detecting method of liquid level of tank [J]. Nondestructive Testing, 2011, 33(12): 90-92. (in Chinese)
- 袁朝庆, 谌飞翔, 徐松芝, 等. 储罐液位检测方法综述[J]. 无损检测, 2011, 33(12): 90-92.
- [5] Zhang Yongbo, Wang Yuqing. Overview of automatic level gauges for storage tanks[J]. Metrology Science and Technology, 2017, 512(4): 72-74. (in Chinese)
- 张永波, 王玉清. 储罐用自动类型液位计综述[J]. 计量技术, 2017, 512(4): 72-74.
- [6] Li Feijun. Discussion on replacing manual measurement with automatic liquid level gauges for oil shore tanks[J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2011, 31(12): 104. (in Chinese)
- 李飞君. 石油岸罐自动液位计替代人工计量探讨[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2011, 31(12): 104.
- [7] Song Chunxia, Chen Lin, Luo Bing. Quantitative identification for liquid level based on infrared technology[J]. Laser & Infrared, 2021, 51(2): 196-201. (in Chinese)
- 宋春霞, 陈林, 罗兵. 储罐液位的红外定量辨识[J]. 激光与红外, 2021, 51(2): 196-201.
- [8] Wang Ruirui. Research on high-precision detection method of liquid level in airtight container[D]. Taiyuan: North University of China, 2021. (in Chinese)
- 王瑞瑞. 密闭容器液位高精度探测方法研究[D]. 太原:中北大学, 2021.
- [9] Zhao Changchao. Design of wireless radar level meter based on FMCW radar[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2013. (in Chinese)
- 赵长超. 无线 FMCW 雷达液位计的设计[D]. 南京:南京信息工程大学, 2013.
- [10] Yang Runze, Tang Yumei, Qiu Jian, et al. Research on laser liquid level measurement technology and its system integration[J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2021, 5(1): 37-41. (in Chinese)
- 杨润泽, 汤玉美, 邱剑, 等. 激光动态液位测量技术研究[J]. 宇航总体技术, 2021, 5(1): 37-41.
- [11] Zhu Yonglu, Feng Hongliang, Wu Shuo, et al. Research and implementation of cryogenic propellant measurement system[J]. Journal of Telemetry, 2017, 38(5): 36-43. (in Chinese)
- 朱永炉, 冯红亮, 吴硕, 等. 低温推进剂测量技术研究及系统实现[J]. 遥测遥控, 2017, 38(5): 36-43.
- [12] Jiang Aihua, Cheng Nai, Xue Xiaoyu. Overview of the current situation and development trends of level measurement instruments [J]. Chemical Engineering & Equipment, 2018(5): 275-276. (in Chinese)
- 姜爱华, 程甯, 薛晓渝. 物位测量仪表现状及发展趋势综述[J]. 化学工程与装备, 2018(5): 275-276.
- [13] Wang Yueming, Gao Song, Chen Bo. Influence of different temperature and relative humidity environment on ultrasonic wave measurement[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2019, 38(9): 13-14, 18. (in Chinese)
- 王月明, 高松, 陈波. 不同热湿环境对超声波测量影响[J]. 传感器与微系统, 2019, 38(9): 13-14, 18.
- [14] Ma Dan, Ge Junfeng, Ye Lin, et al. Review on fiber optic point liquid-level sensors [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2016, 35(9): 92-95. (in Chinese)
- 马丹, 葛俊锋, 叶林, 等. 光纤点式液位传感技术的研究现状[J]. 国外电子测量技术, 2016, 35(9): 92-95.
- [15] Xuebingqing Z, Ming K, Tiantai G, et al. Frequency modulation nonlinear correction and range-extension method based on laser frequency scanning interference. [J]. Applied Optics, 2021, 60(12): 3446-3451.
- [16] Xu Xinke. Research on key technology of laser frequency scanning interference absolute distance measurement [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017. (in Chinese)
- 许新科. 激光扫频干涉绝对距离测量关键技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2017.
- [17] Liu Shuo. Design of high precision ranging system based on Mach Zehnder fiber interferometer[D]. Dali: Dali University, 2021. (in Chinese)
- 刘硕. 基于马赫-泽德光纤干涉仪的高精度测距系统设计[D]. 大理:大理大学, 2021.

- [18] Wang Yi, Wang Yize, Zhu Jigui. Influence of modulation error of optical phase control device on interference projection fringe [J]. *Laser & Infrared*, 2016, 46(7): 852 – 856. (in Chinese)
王一, 王祎泽, 郝继贵. 光学相控器件调制误差对干涉投影条纹的影响[J]. *激光与红外*, 2016, 46(7): 852 – 856.
- [19] Yang Yi, Xu Changbin, Ma Yuying, et al. A review of infrared dim small target detection algorithms with low SNR [J]. *Laser & Infrared*, 2019, 49(6): 643 – 649. (in Chinese)
杨跃, 徐长彬, 马玉莹, 等. 低信噪比下的红外弱小目标检测算法研究综述[J]. *激光与红外*, 2019, 49(6): 643 – 649.
- [20] Ren Pengchong. The study of artillery locating radar coherent integration algorithm and its realization [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016. (in Chinese)
任朋冲. 炮位侦察雷达相参积累算法研究及实现[D]. 北京: 北京理工大学, 2016.
- [21] Fan Chunbo. Development of coherent radar scatterometer [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2011. (in Chinese)
范春波. 相干雷达散射计的研制[D]. 成都: 电子科技大学, 2011.
- [22] Zhu Kairan. Detection of radar signal and its implementation [D]. Xi'an: Xidian University, 2009. (in Chinese)
朱凯然. 雷达信号检测与实现[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2009.
- [23] Zhang Tao, Xing Tao, Pan Fan. Application of pulse compression and coherent integration in laser radar [J]. *Laser & Infrared*, 2022, 52(8): 1143 – 1146. (in Chinese)
张涛, 幸涛, 潘璠. 脉冲压缩及相参积累在激光雷达中的应用[J]. *激光与红外*, 2022, 52(8): 1143 – 1146.