

文章编号:1001-5078(2024)10-1534-07

· 激光应用技术 ·

基于误差补偿的光源调频非线性校正研究

张鹏, 封治华, 张鹏飞, 赵渊明, 阮友田, 韩文杰, 张辉, 康朝阳
(中国电子科技集团公司第二十七研究所, 河南 郑州 450047)

摘要: 由于 FMCW 光源非线性频率调制的影响, 其差频信号的频谱会出现展宽, 降低频谱分辨率, 因此光源非线性校正是该体制激光雷达精确测距的前提。为了避免现有非线性校正技术系统结构复杂, 测量成本高的缺陷, 本文提出了基于误差补偿的 FMCW 光源非线性校正法。该方法通过输出信号与线性回归数据之间的误差, 构建与输出信号频率变化趋势相反的校正数据作为激光器的调制信号源。经过若干次循环补偿, 逐步将输出信号频率与线性回归数据之间的决定系数提高到 0.9995 以上。最终通过距离测量实验, 验证了该方法的有效性和可行性。

关键词: FMCW 光源; 非线性校正; 误差补偿; 输出信号; 校正数据; 决定系数

中图分类号: O437; TN249 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1001-5078.2024.10.005

Correction of nonlinear frequency modulation of laser source based on error compensation

ZHANG Peng, FENG Zhi-hua, ZHANG Peng-fei, ZHAO Yuan-ming, RUAN You-tian,
HAN Wen-jie, ZHANG Hui, KANG Zhao-yang
(The 27th Research Institute of CETC, Zhengzhou 450047, China)

Abstract: Due to the effect of nonlinear frequency modulation of FMCW laser source, the spectrum of beat frequency appears to be broadened, which reduces spectral resolution, so the nonlinear correction of the light source is a prerequisite for the accurate ranging of this system LIDAR. To avoid the defects of the existing nonlinear correction technology with complex system structure and high measurement cost, a nonlinear correction method of FMCW laser source based on error compensation is proposed in this paper. Through the error between the output signal and the linear regression data, correction data with the opposite trend of change in the output signal frequency is constructed as the modulation signal source of the laser. After several cycles of compensation, the coefficient of determination between the output signal frequency and the linear regression data is gradually improved to more than 0.9995. At last, the effectiveness and feasibility of this method is verified by range measurement experiments.

Keywords: FMCW laser source; nonlinear correction; error compensation; output signal; correction data; determination coefficient

1 引言

调频连续波 (FMCW) 技术最早由 Skolnik 在

1980 年提出, 在随后的几十年里, FMCW 激光测距、测速技术逐渐成熟^[1]。为了实现距离和速度的解

作者简介: 张鹏 (1989 -), 男, 博士, 工程师, 主要研究方向为激光雷达与光电信号处理。E-mail: zhangpeng901@hust.edu.cn

收稿日期: 2024-01-18

耦,可采用三角波频率调制的方式,但要得到精确的距离和速度信息,需要 FMCW 激光器具有严格的线性频率调制特性。然而,由于激光波长和注入电流之间的非线性关系,以及电流影响增益介质的温度并导致波长波动的影响,激光器频率调制无法达到完全线性^[2]。这使得差频信号的频谱出现展宽,距离、速度信息计算误差较大。因此,通常需要对激光器的调制信号波形进行校正,从而消除不利影响。

目前,国外许多大学和研究机构都开展了与 FMCW 光源调频非线性校正相关的研究。例如,2009 年, Yüksel^[3] 等对测量的光学频率进行插值并确定与等距光学频率对应的时间点,然后在这些时间点对测量干涉仪的拍频信号进行重采样,从而消除调频非线性误差。2012 年, Satyan^[4] 团队研究了光电锁相原理,将负反馈电路与声光移频器(AOFS)结合,在 2 ms 内实现了垂直腔面发射激光器(VCSEL) 400 GHz 的精确线性调频。2013 年, Baumann^[5] 等用光学频率梳校准 FMCW 激光雷达系统,按照等间距频率步长对雷达测量信号重新采样,以此消除调频非线性的影响。2014 年,牛津大学的 Dale^[6] 等用调频干涉测量法搭建多通道距离测量系统,提出了不受调频非线性影响的相位比值法。2015 年, Prellinger^[7-8] 等通过恒定光程差提取辅助干涉仪信号的相位,对测量信号在时间尺度上进行缩放重整,并通过样条插值法对重整数据保证等间距,以此消除激光器调频非线性的影响。2020 年, Badar^[9] 等集成辅助干涉仪和主干干涉仪,用单个信号通道实现调频非线性校正。

国内对 FMCW 光源非线性校正的研究起步较晚,但近些年发展迅速。2018 年, Shi^[10] 等人使用 F-P 干涉仪和 M-Z 干涉仪搭建 FMCW 激光测距系统,基本消除了调频非线性和激光跳模的影响。2021 年, Meng^[11] 等人搭建了由外部 AOFS 和内腔 PZT 组成的双环复合反馈系统,用一个辅助 MZI 来监测和评估动态激光频率噪声并消除非线性影响。同年, Xie^[12] 等人将模式间距扫描频率梳和多环复合光锁相环相结合,利用具有大环路带宽和高环路增益的高度紧锁的复合锁相回路完成非线性校正。2022 年, Dong^[13] 等用边带调制和注入锁定技术,将主激光器的窄线宽特性和 AWG 信号源的线性调频特性引入从激光器,实现相干长度大、调频线性度高的

FMCW 测量系统。

可以看出,国内外研究机构提出的调频非线性校正方法各有优缺点。例如,基于锁相反馈控制的激光频率线性化技术和利用光学频率梳的非线性校正方法虽然测量精度较高,但其系统结构复杂,测量成本较高,其应用受到一定限制;而等光频间隔重采样法、相位比值法的测量精度较低,且受到鉴相精度的直接影响,对信号的信噪比要求较高。为了保证测量精度,尽量减小校正算法复杂度,降低测量成本,扩大应用范围,本文提出基于误差补偿的 FMCW 光源非线性校正方法。经过多次校正,可简单实现原始输出信号调频非线性的消除。最后,通过本文的实验验证,证实了该方法的有效性和可行性。

2 调频非线性影响分析

信号的调频非线性一般是由于 FMCW 激光器的非线性动态响应引起的,意味着信号源的线性波形会产生非线性调频响应。其原因在于 FMCW 激光器实际工作中,由于压电陶瓷的迟滞性和电机的机械抖动,使得输出信号频率并不是严格线性变化。而且激光器中介质的色散效应或温度变化带来的光学参数改变也会影响调频的线性度。线性和非线性调频信号的时频特性对比如图 1 所示。

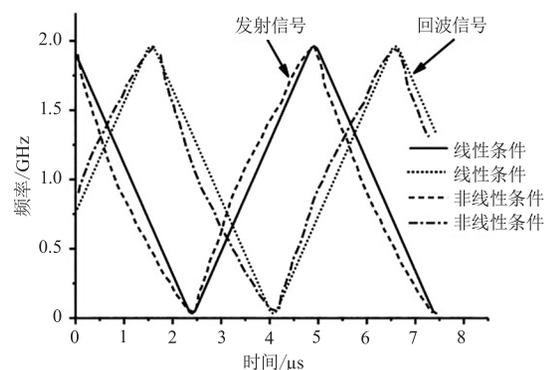


图 1 线性和非线性调频波形示意图

Fig. 1 Waveform of linear and nonlinear frequency modulation

对于理想情况下的线性调频,在正向调频段内,发射波频率 f_t 和回波频率 f_r 分别为:

$$f_t = f_0 + \mu t \quad (1)$$

$$f_r = f_0 + \mu(t - \tau) \quad (2)$$

其中, f_0 为基频; $\mu = 2B/T_m$, B 为带宽; T_m 为调制周期; $\tau = 2L/c$, L 为距离; c 为光速。则差频为:

$$f_b = f_t - f_r = \mu\tau = \frac{4BL}{T_m c} \quad (3)$$

因此,可以得到目标与雷达的相对径向距离为:

$$L = \frac{c}{4B} \cdot \frac{f_b}{f_m} \quad (4)$$

其中, $f_m = 1/T_m$ 为调制频率。当调制带宽 B , 调制频率 f_m 一定时, 测距误差 ΔL 是由于差频的误差引起的, 可以表示为:

$$\Delta L = \frac{c}{4B} \cdot \frac{\Delta f_b}{f_m} \quad (5)$$

其中, $\frac{\Delta f_b}{f_m}$ 表示一个调制周期 $1/f_m$ 内平均差频误差。当

频率测量的量化误差为 1 次时, 即 $\frac{\Delta f_b}{f_m} = 1$ 。可以得到:

$$\Delta L = \frac{c}{4B} \quad (6)$$

由此可知, 理想情况下, 调频连续波测距系统的测距精度和频率调制带宽 B 成反比。

在调频非线性情况下, 通过卡森带宽规则 (Carson Bandwidth Rule)^[14-15] 可以估计出差频误差为:

$$\Delta f_b = (1 + \beta)f_m \quad (7)$$

其中, β 是调制指数, 可以近似等于在正向调频段内, 线性拟合直线 (D) 与调频曲线 (S) 相减得到的频率偏差 Δf 的均方根 $f_{DS_RMS}(t)$ 乘以 $2\pi \cdot 2L/c$, 即:

$$\beta = 2\pi \frac{2L}{c} f_{DS_RMS} \quad (8)$$

因此:

$$\Delta f_b = \frac{1 + 2\pi \frac{2L}{c} f_{DS_RMS}}{T_m} \quad (9)$$

可见, 得到调频非线性影响下的距离分辨率表示为:

$$\Delta L = \frac{c \left(1 + 2\pi \frac{2L}{c} f_{DS_RMS} \right)}{4B} \quad (10)$$

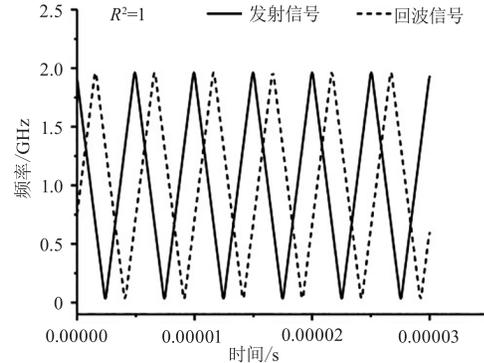
如果调频非线性 $\beta = 2\pi \frac{2L}{c} f_{DS_RMS} \ll 1$, 调频非线性可以忽略不计, 因此距离分辨率趋近于理想线性调频状态下的结果。否则, 调频非线性不可忽略, 距离分辨率可表示为:

$$\Delta L = \frac{c}{4B} + \frac{\pi L f_{DS_RMS}}{B} \quad (11)$$

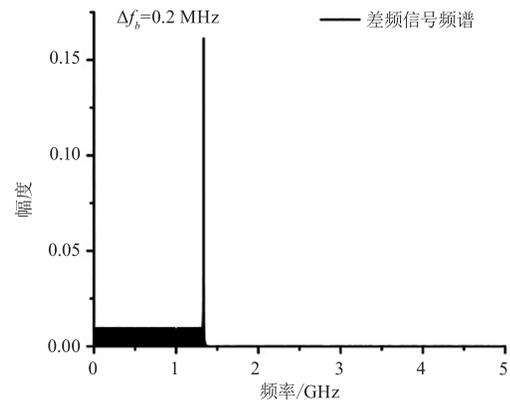
可见, 距离分辨率会受到距离 L 和调频非线性均方根 $f_{DS_RMS}(t)$ 的影响。此时, 线性拟合直线 (D) 与调频曲线 (S) 的决定系数 R^2 与 $f_{DS_RMS}(t)$ 的关系为:

$$R^2 = 1 - \frac{N \cdot f_{DS_RMS}^2(t)}{\sum_{i=0}^{N-1} (S_i - \bar{S}_i)^2} \quad (12)$$

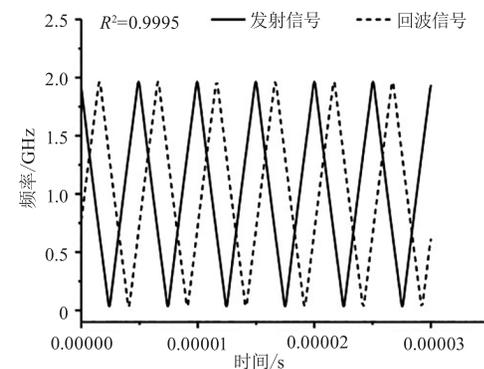
其中, N 表示正向调频段内调频曲线数据量。为了更直观地了解调频非线性带来的影响, 通过 MATLAB 仿真, 分析不同决定系数 R^2 条件下, 信号的时频特性和差频带宽 Δf_b , 仿真结果如图 2 所示。



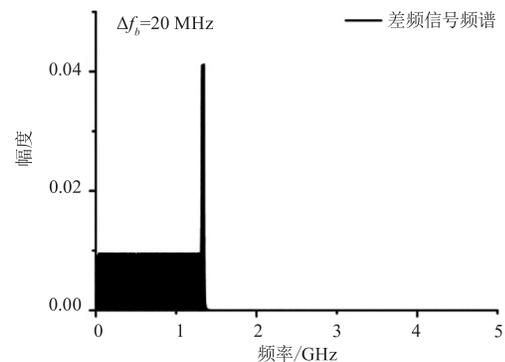
(a) $R^2=1$ 信号时频图



(b) $R^2=1$ 拍频信号频谱图



(c) $R^2=0.9995$ 信号时频图



(d) $R^2=0.9995$ 拍频信号频谱图

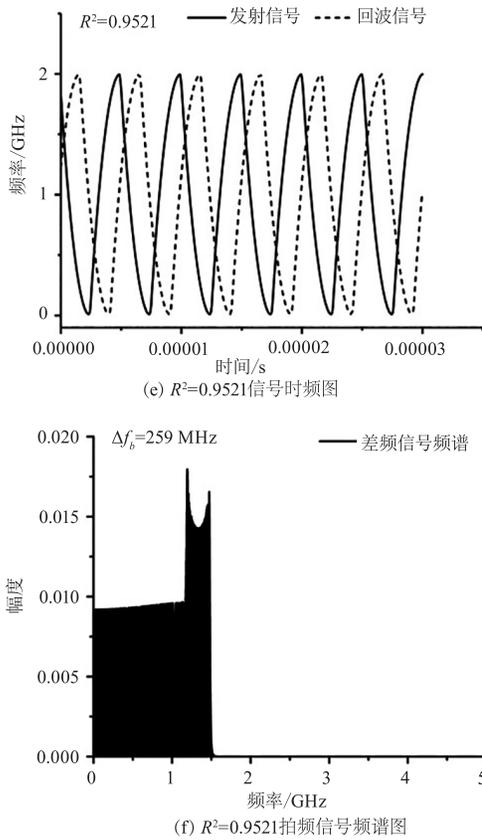


图2 不同 R^2 条件下的信号时频图和拍频信号频谱图
Fig.2 Time-frequency diagram of signal and spectral diagram of beat frequency in different R^2

仿真结果表明,当激光器处于线性调频状态时,调频信号和拟合直线的决定系数 $R^2 = 1$,差频信号处于单一频率,其频谱线宽约为 $\Delta f_b = 0.2$ MHz,便于提取峰值计算相应的探测距离。当调频信号和拟合直线的决定系数 $R^2 = 0.9995$,激光器处于非线性调频状态,差频信号不再是单一频率,其频谱线宽

$\Delta f_b = 20$ MHz,频谱分辨率降低,但仍能提取峰值计算相应的探测距离。当调频信号和拟合直线的决定系数 $R^2 = 0.9521$,激光器非线性调频严重,差频信号频谱线宽 $\Delta f_b = 259$ MHz,无法准确提取峰值计算相应探测距离。因此,对非线性条件下的激光器调制信号进行校正,确保调频信号与拟合直线之间的决定系数 $R^2 > 0.9995$,是实现频谱精确测量和距离精确探测的前提。

3 研究方法

对调频非线性影响的分析阐明了非线性校正对于距离精确测量的必要性。然而,通过国内外研究现状的分析可知,现有方法对硬件的要求较高,且具有系统结构复杂,测量成本相对较高的缺点。为了在工程应用领域避免上述缺点,本文从信号处理层面寻求新的非线性校正方法。

新方法综合考虑了信号源、激光器、输出光源之间的关系,将具有非线性调频功能的激光器看作系统函数,将信号源作为系统输入,输出光源作为系统输出。当信号源的频率特性是线性三角波调频信号时,经过激光器的非线性调频作用,产生了频率特性为非线性三角波调频的输出光源信号。此时,选取输出光源信号的频率上升沿和下降沿分别进行线性回归拟合。随后得到频率上升沿和下降沿部分与拟合直线之间的误差,将其反向加载到拟合直线上,得到与原始输出光源频率变化趋势相反的校正信号,并作为激光器的系统输入。此时,经过激光器的非线性调频作用,新的输出光源的调频非线性程度会降低,如图3所示。

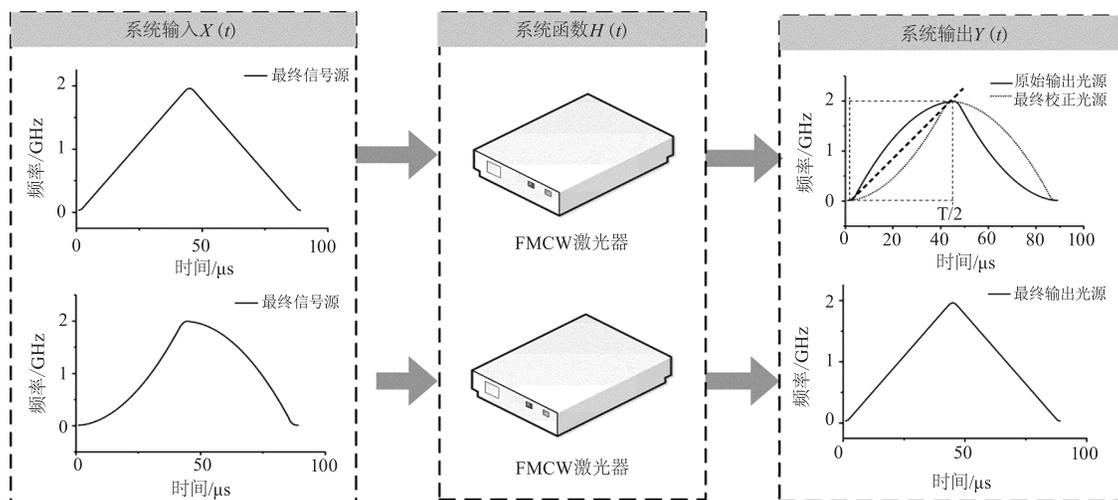


图3 FMCW 光源非线性校正方法总体思路

Fig.3 Overall view of nonlinear correction method of FMCW laser source

该方法使用误差补偿的原理,得到与原始信号源频率波形变化趋势相反的波形作为新的信号源,从而降低输出光源的调频非线性,因此称为基于误差补偿的 FMCW 光源调频非线性校正方法。通常经过一次校正难以达到理想效果,需要经过多次循环校正,具体流程图如图 4 所示。

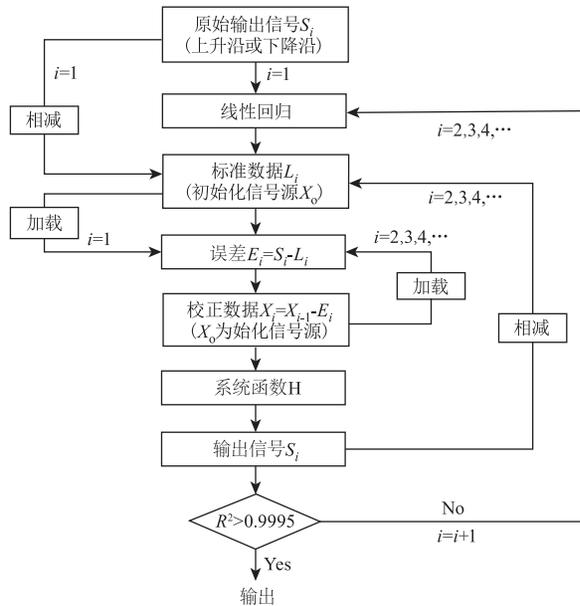


图 4 基于误差补偿的 FMCW 光源非线性校正算法流程图
Fig. 4 Diagram of nonlinear correction algorithm based on error compensation of FMCW laser source

从该流程图可看出,该算法具体实施过程分为如下几步:

(1) 首次校正,即 $i = 1$ 时,将原始输出信号上升沿或下降沿部分 S_i 进行线性回归拟合,得到拟合的标准数据 L_i 。

(2) 将 S_i 与 L_i 相减,得到误差 $E_i = S_i - L_i$ 。

(3) 将误差反向加载到上次校正数据 X_{i-1} 上,即 $X_i = X_{i-1} - E_i$ 。 $i = 1$ 时, X_0 为初始化信号源,即标准数据 L_i 。使得校正数据和原始输出信号的频率变化趋势相反。

(4) 将校正数据 X_i 作为新的信号源输入 FMCW 激光器系统 H ,得到新的输出信号 S_i 。

(5) 判断新的输出信号 S_i 与标准数据 L_i 之间的决定系数 R^2 是否大于 0.9995,若大于则输出信号 S_i 即为最终校正结果,若小于则返回步骤(1),此时 $i = i + 1$ 。

(6) 进行多次循环,直至决定系数 R^2 大于 0.9995。

4 实验系统与过程

本节将给出实验系统详细设计,并说明实验系统各部分功能。之后,根据设计搭建光源非线性校正实验系统,完成基于误差补偿的光源非线性校正实验。最后给出基于已搭建系统得到的测量结果,并对校正结果进行评价与分析。系统框图如图 5 所示。

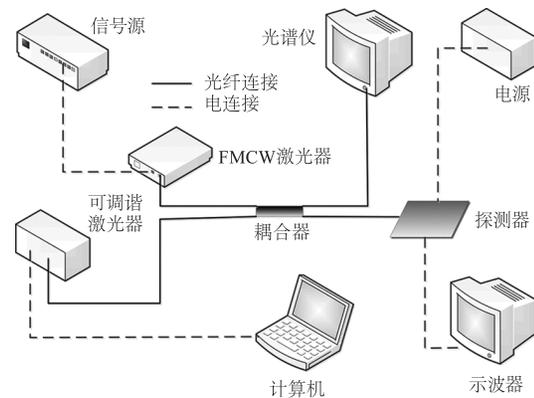


图 5 基于误差补偿的光源非线性校正实验系统框图
Fig. 5 Experimental system diagram of nonlinear correction based on error compensation

本实验需要用到的设备包括 FMCW 激光器、信号源、可调谐激光器、光谱仪、耦合器、探测器、示波器、电源、计算机等。其中 FMCW 激光器波长为 1550 nm,扫频带宽为 5 GHz,基频为 10 GHz,重复频率为 100 kHz。信号源的作用是为 FMCW 激光器调制信号,产生频率为对称三角波调制的连续光源。可调谐激光器用于将其波长与 FMCW 激光器波长调节一致,产生拍频信号,波长调谐功能由计算机控制。光谱仪用于观察可调谐激光器和 FMCW 激光器的波长,便于波长调谐。耦合器用于将 FMCW 激光器与可调谐激光器的输出光源信号进行耦合。探测器用于接收耦合信号,并将拍频信号转化为电信号输送到示波器。示波器的作用是观察拍频信号的波形,并将当前信号存储。电源用于给探测器供电。

实验过程分为如下几步:

(1) 将各实验设备连接完毕并接电。

(2) 信号源输出初始化调制信号,即线性对称三角波调制信号。

(3) 通过计算机调节可调谐激光器波长,参考光谱仪将可调谐激光器波长与 FMCW 激光器波长调至一致。

(4) 观察示波器,当产生拍频信号波形后,将该

信号波形保存于 U 盘。

(5)通过 Matlab 软件分析保存于 U 盘中的信号,得到该信号的时频分析图,如图 6(a)所示。从图中可看出,由于 FMCW 激光器非线性因素影响,频率的上升沿和下降沿部分均为非线性。

(6)使用图 4 中的算法对输出信号进行非线性校正,将校正数据上传到信号源,作为新的调制信号传输给 FMCW 激光器。重复步骤(3)~(5)。

(7)经过多次循环操作,分析 U 盘中信号的时频特性如图 6(b)所示。此时若输出信号上升沿和下降沿分别与线性回归拟合直线的决定系数大于 0.9995 则表明校正完成。此时的校正数据即为最终信号源。

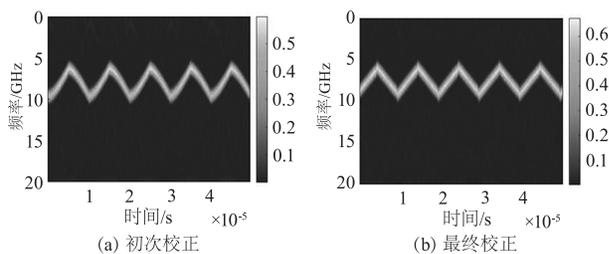


图 6 初次校正和最终校正的输出信号时频图
Fig. 6 Time-frequency diagrams of output signals for initial and final calibration

从图 6(a)、(b)可看出,经过若干次的误差补偿算法校正,输出波形的非线性成分已经基本消除,可进行后续差频计算和距离求解。

5 实验验证

在同一实验条件下,选择 FMCW 激光器进行 12 组光源非线性校正实验,其中 FMCW 激光器波长为 1550 nm,扫频带宽为 5 GHz,基频为 10 GHz,重复频率为 100 kHz。采用决定系数 R^2 评价光源非线性校正效果,并将 12 组校正数据作为 FMCW 激光器信号源,进行距离测量,得到距离测量值、测量误差,验证该校正方法的效果。具体结果由表 1 给出。

从表 1 可以看出,采用误差补偿的 FMCW 光源非线性校正方法得到的 12 组决定系数 R^2 有 10 组大于 0.9995,满足光源的非线性校正要求。从结果可看出,10 组测距相对误差均小于 5cm,接近距离分辨率理论值 $c/4B = 1.5 \text{ cm}$,由于噪声和测量距离等因素的影响,实际测量误差大于距离分辨率理论值。其中 1 和 5 组测距相对误差大于 5 cm。其原因在于 1 和 5 组的决定系数 R^2 均小于 0.9995,相对其

他组的决定系数略低。这也再次说明了距离测量精度与 FMCW 光源非线性校正的决定系数 R^2 密切相关。

表 1 FMCW 激光器光源非线性校正效果和测距效果

Tab. 1 Correction and ranging effect of nonlinear correction of FMCW laser source

实验序号	上升沿决定系数(R^2)	下降沿决定系数(R^2)	距离真值/m	距离测量值/m	测量误差/m
1	0.9993	0.9994	8.561	8.5039	0.0571
2	0.9997	0.9996	13.455	13.4358	0.0192
3	0.9998	0.9997	16.830	16.8470	-0.0170
4	0.9996	0.9994	20.670	20.6452	0.0248
5	0.9993	0.9995	25.471	25.5283	-0.0573
6	0.9996	0.9998	29.041	29.0669	-0.0259
7	0.9996	0.9996	32.713	32.6898	0.0232
8	0.9997	0.9996	36.267	36.2512	0.0158
9	0.9996	0.9998	39.518	39.5436	-0.0256
10	0.9997	0.9995	43.062	43.0404	0.0216
11	0.9997	0.9997	46.552	46.5250	0.0270
12	0.9998	0.9997	51.400	51.4363	-0.0363

6 结论

本文通过对 FMCW 光源中非线性调制现象的介绍,阐述了光源非线性调制对 FMCW 激光测距精度的影响。为了避免国内外学者所用非线性校正方法的缺点,本文提出了基于误差补偿的 FMCW 光源非线性校正方法。从算法设计、实验系统设计和实验结果分析三方面详细介绍了该方法的基本步骤和校正效果。最后通过具体的测距实验,验证了该方法对于提高测距精度的作用。

从原理上来讲,基于误差补偿的 FMCW 光源频率校正方法能够较好地消除原始输出波形中的非线性成分,将调制频率的上升沿和下降沿校正为决定系数 R^2 接近 1。因此该方法能够很好地解决非线性调频引起的频率测量误差,从而提高测距精度。而且该方法使用循环校正思想,每次循环只进行输出信号和线性回归直线之间的误差的计算,以及误差的加载。算法的时间复杂度较低,能够适应高采样率条件下的海量数据处理。

参考文献:

[1] Yin Jinjin. Design of laser radar ranging system based on

- linear frequency modulation[D]. Xi'an: Xidian University, 2018. (in Chinese)
- 尹进进. 基于线性调频的激光雷达测距系统设计[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2018.
- [2] Jia L H, Wang Y, Wang X Y, et al. Nonlinear calibration of frequency modulated continuous wave LIDAR based on a microresonator soliton comb[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(5): 1025 – 1028.
- [3] Yüksel K, Wuilpart M, Mégret P. Analysis and suppression of nonlinear frequency modulation in an optical frequency domain reflectometer[J]. *Optics Express*, 2009, 17(7): 5845 – 5851.
- [4] Satyan N, Vasilyev A, Rakuljic G, et al. Phase-locking and coherent power combining of broadband linearly chirped optical waves[J]. *Optics Express*, 2012, 20(23): 25213 – 25227.
- [5] Baumann E, Giorgetta F R, Coddington I, et al. Comb-calibrated frequency-modulated continuous-wave lidar for absolute distance measurements[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(12): 2026 – 2028.
- [6] Dale J, Hughes B, Lancaster A J, et al. Multi-channel absolute distance measurement system with sub ppm-accuracy and 20 m range using frequency scanning interferometry and gas absorption cells[J]. *Optics Express*, 2014, 22(20): 24869 – 24893.
- [7] Prellinger G, Meiners-Hagen K, Pollinger F. Spectroscopically in situ traceable heterodyne frequency-scanning interferometry for distances up to 50 m[J]. *Measurement Science Technology*, 2015, 26(8): 084003.
- [8] Prellinger G, Meiners-Hagen K, Pollinger F. Dynamic high resolution spectroscopic frequency referencing for frequency sweeping interferometry[J]. *Surface Topography: Metrology and Properties*, 2016, 4(2): 024012.
- [9] Badar M, Lu P, Buric M, et al. Integrated auxiliary interferometer for self-correction of nonlinear tuning in optical-frequency domain reflectometry[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(21): 6097 – 6103.
- [10] Shi G, Wang W, Zhang F M. Precision improvement of frequency-modulated continuous-wave laser ranging system with two auxiliary interferometers[J]. *Optics Communications*, 2018, 411: 152 – 157.
- [11] Meng Y X, Xie W L, Feng Y X, et al. Dynamic range enhanced optical frequency domain reflectometry using dual-loop composite optical phase-locking[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2021, 13(4): 7100307.
- [12] Qin J, Zhou Q, Xie W L, et al. Coherence enhancement of a chirped DFB laser for frequency-modulated continuous-wave reflectometry using a composite feedback loop[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(19): 4500 – 4503.
- [13] Dong Y K, Zhu Z D, Tian X N, et al. Frequency-modulated continuous-wave LIDAR and 3D imaging by using linear frequency modulation based on injection locking[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, 39(8): 2275 – 2280.
- [14] Pieper R J. Laboratory and computer tests for Carson's FM bandwidth rule[C]//Proceedings of the 33rd Southeastern Symposium on System Theory. IEEE, 2001: 145 – 149.
- [15] Laskai L, Enjeti P N, Pitel I J. White-noise modulation of high-frequency high intensity discharge lamp ballasts[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1998, 34(3): 597 – 605.