光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2021.03.027

基于相位拼接的调频连续波激光雷达跳模影响消除方法

姜　朔[1,2,3*]，刘　博[1,2,3]，王盛杰[1,2,4]，赵　彬[1,2,3]

（1. 中国科学院空间光电精密测量技术重点实验室，成都 610209；2. 中国科学院光电技术研究所，成都 610209；
3. 中国科学院大学，北京 100049；4. 中国民用航空飞行学院，四川 德阳 618300）

摘　要： 为了消除激光跳模对调频连续波激光测距的影响，提出了一种基于重采样信号相位拼接的跳模影响消除方法。该方法利用重采样信号相位展开求导的结果来定位激光跳模发生的时间，并对重采样信号跳模处两端的峰值进行相位拼接来去除跳模段的重采样信号。通过对相位拼接后的重采样信号进行 Chirp-Z 变换可以得到不受激光跳模影响的目标距离谱。系统对光程约为 21.16 m 的延时光纤进行多次测量，实验效果证明此方法可以消除调频激光跳模对距离测量的影响，并实现了 12 μm 的测距标准差。

关键词： 调频连续波激光雷达；激光跳模；相位拼接；测距

中图分类号： TN958.98　**文章编号：** 1001－5868(2021)03－0447－04

Mode Hopping Elimination Method of FMCW Lidar Based on Phase Splicing

JIANG Shuo[1,2,3], LIU Bo[1,2,3], WANG Shengjie[1,2,4], ZHAO Bin[1,2,3]

(1. Key Laboratory of Science and Technology on Space Optoelectronic Precision Measurement, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, CHN; 2. Institute of Optics and Electronics of the Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, CHN;
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, CHN;
4. Civil Aviation Flight University of China, Deyang 618300, CHN)

Abstract: To eliminate the influence of laser mode hopping on FMCW ranging, a mode hopping elimination method based on resampled signal phase splicing is proposed in this paper. It uses the result of the phase derivation of the resampled signal to locate the time when laser mode hopping occurs, and phase splices the peaks at both ends of the resampled signal to remove the signal in the mode hopping section. By performing Chirp-Z transformation on the resampled signal after phase splicing, the target distance spectrum not affected by laser mode hopping can be obtained. The system performs multiple measurements on the delay fiber of 21.16 m. Experimental results show that this method can eliminate the influence of laser mode hopping on the distance measurement, and improve the measurement standard deviation to 12 μm.

Key words: FMCW lidar; laser mode hopping; phase splicing; ranging

0　引言

调频连续波激光雷达是一种高精度的目标绝对距离测量方法，其测距的分辨率与激光的调制带宽成反比，随着调制带宽的增加，其测距精度也会进一步提高。为了提高系统测距的分辨率和精度，激光器往往采用内调制方法以实现太赫兹的激光扫频带宽，进而达到微米量级的测距分辨率。除此之外，调频连续波激光雷达还具有无接触测量、测距精度高、无测距盲区等优点，在精密仪器加工、大面型目标测量等高精密测量领域有着非常重要的应用[1-6]。

调频连续波激光雷达在大带宽调制过程中，受到激光器内部机械部件迟滞效应、非线性蠕变以及

收稿日期：2020－10－21.
基金项目：国家自然科学基金项目(61805249)；中国科学院青年创新促进会基金项目(2019369).
* **通信作者：**姜　朔

温度影响，难以实现高线性度的激光频率调制[7]。为此，进行相干探测时得到的干涉信号频率不再是一个固定值，目标距离也无法准确地计算得到。为了消除激光器频率调制非线性对距离测量带来的影响，主要采取激光频率反馈补偿法和双干涉光路系统法。激光频率补偿法利用激光器的出光频率受到注入电流以及激光器腔长变化影响的特性，通过反馈信号改变注入电流或者利用 PZT 进行腔长补偿来完成对出射调频激光频率线性度的矫正。2009 年，Satyan 等[8]利用半导体激光器结合光电反馈环路在 1 ms 内实现 100 GHz 的线性扫描，并获得了 1.5 mm 的空间分辨率。同年，Roos 等[9]使用带有两个锁相环的外腔半导体激光器，实现了高达 4.8 THz 的精确激光线性化调制。除了基于反馈环路的调频激光线性化矫正方法，另外一种常用的方法是搭建双干涉光路系统。2014 年，时光等[10]利用外腔半导体激光器搭建了双干涉光路系统，将辅助干涉仪信号作为系统外部时钟对测距路干涉信号进行重采样。实验在 8.7 m 处实现了 50 μm 的距离分辨率。2015 年，曲兴华等[11]采用双干涉光路系统，通过对重采样信号的相位进行拼接来提高调频连续波测距系统的距离分辨率。然而，跳模作为一种在激光调制过程中存在的噪声干扰，会对辅助干涉信号的相位产生很大的影响，以此作为系统重采样外部时钟会严重影响目标的测距精度。2017 年，哈工大的贾韬[12]利用扫描干涉仪的方法对输出激光跳模现象进行检测，并提出了一种标准具角度调谐与 PZT 腔长调谐相结合的跳模抑制方法。为了解决激光跳模的影响，2018 年，时光等[13]在双干涉光路的基础上，提出了均值剔除假极值的方法，并在 5.8 m 处获得了±20 μm 的误差。为了解决激光跳模对双干涉光路调频连续波激光测距的影响，本文提出了一种利用相位求导确定跳模位置，再将重采样信号跳模两端信号峰值进行相位拼接的方法，此方法无需对激光光源进行额外改进就可以消除激光跳模处重采样畸变信号对测距的影响。

1 理论原理与模型

1.1 调频连续波激光雷达测距原理

调频连续波激光雷达系统采用频率线性调制的激光作为光源。激光调制开始时分成两路，一路作为本振臂，一路作为测量臂，测量臂激光被目标反射后与本振臂激光相干得到干涉信号。如图 1 所示，实线代表本振激光的频率，虚线代表测量臂返回激光的频率，干涉信号的频率 Δf 即为两路激光的瞬时频率差。图中 T 为激光器的调制周期，B 为激光调制带宽，τ 为调制激光在测量路径中的传播时延，c 为光速。由此可以计算出目标的距离信息：

$$R=\frac{Tc}{2B}\cdot\Delta f \tag{1}$$

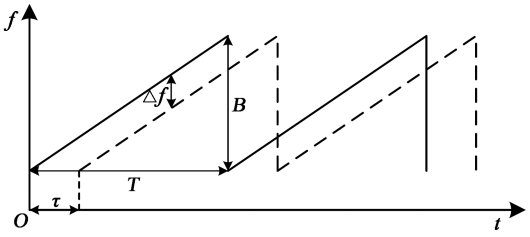


图 1 调频连续波测距原理图

然而在实际情况中，调制激光的瞬时频率与时间并不成理想的线性关系，直接对干涉信号进行快速傅里叶变换(FFT)来计算目标的距离会造成测距精度和分辨率的严重降低。为此，本文采用了双干涉光路的调频连续波测距系统，系统由辅助干涉光路和测距干涉光路组成。辅助干涉光路的光程差由延时光纤组成，测量干涉光路的光程差由测量路径组成，测距干涉信号 $I_m(t)$ 与辅助干涉信号 $I_r(t)$ 的表达式分别为

$$I_m(t)=I_m\cos(2\pi f_0\tau+2\pi k(t)\tau t) \tag{2}$$

$$I_r(t)=I_r\cos(2\pi f_0\tau_r+2\pi k(t)\tau_r t) \tag{3}$$

其中，I_m 和 I_r 为信号的幅度，f_0 为调制激光的起始频率，$k(t)$为激光调制的瞬时速度，τ 和 τ_r 分别为测距干涉光路和辅助干涉光路对应的激光群时延。两路干涉信号被采集卡同步采集得到。

重采样的方法就是将辅助干涉信号作为系统外部时钟，将辅助干涉信号极值(峰-谷值)对应时刻点的测距干涉信号提取出来组成新干涉信号，表示为

$$I(n)=I\cos\left(2\pi\frac{\tau}{2\tau_r}\cdot n\right) \tag{4}$$

其中，n 为重采样过程中采样点的序号。根据式(4)可以得到消除激光调制非线性影响的测距路干涉信号。重采样过程的关键在于对辅助干涉信号等相位间隔(极值点)的提取，而激光调制过程中的跳模现象会给极值点的提取引入严重噪声，而简单的滤波操作并不能完全将跳模引入的极值错误点去除，因此本文提出了基于相位拼接的跳模影响消除方法。

1.2 基于相位拼接的跳模影响消除方法

图 2 为消除激光跳模影响的流程图。为了消除

跳模对重采样效果的影响，首先要确定激光跳模的位置。测量单个目标时，重采样信号的频率在理想情况下是一个固定值，但在跳模段，其频率与非跳模段存在很大差异。为此，可以通过对重采样信号进行相位展开并求导的方式来快速定位激光跳模位置。对重采样信号进行函数插值并结合定位得到激光跳模的时间段后，对跳模处两端重采样信号的峰值点进行拼接，就可以获得消除激光跳模影响的重采样信号。对此信号进行线性调频 Z 变换（CZT）后就可以计算出消除激光跳模影响的目标距离谱。

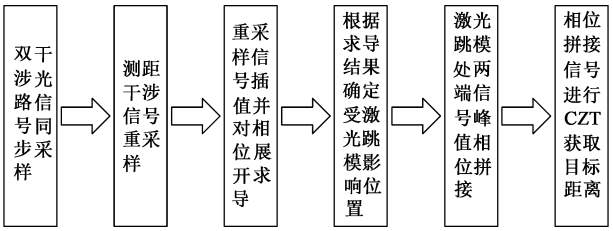


图 2　相位拼接消除激光跳模对重采样影响的流程图

2　实验结果及分析

2.1　实验设置

为了验证此方法的有效性，进行了实验验证。系统采用 Santec TSL-710 作为激光调制光源，调制带宽设为 10 nm，调制速度为 10 nm/s，发射激光功率为 1 dBm。图 3 为系统原理图，调频激光经耦合器分成两路，分别进入辅助干涉光路和测距干涉光路，并分别在探测器 1 和探测器 2 得到两路干涉信号。为了提高测量的信噪比，辅助干涉光路和测量干涉光路的光程差均由延时光纤组成，其中测距干涉光路延时光纤的光程约为 21.16 m。两路信号被示波器同时采集得到并在 PC 端进行处理。

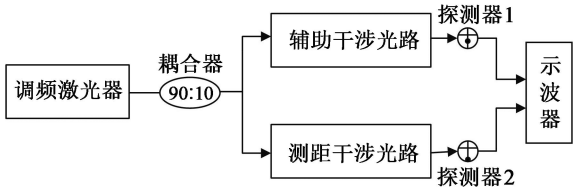


图 3　调频连续波双干涉光路系统原理图

2.2　实验数据处理过程及结果

为了确定调频激光是否发生跳模及其跳模位置，首先利用 Hilbert 变换对重采样得到的干涉信号进行相位展开并求导，如图 4 所示，在采样点 2.83×10^6 附近出现求导值突变。对于单目标测量系统，激光跳模处相位求导结果与非跳模处相比差异明显，由此可以定位出重采样信号中受影响的位置。

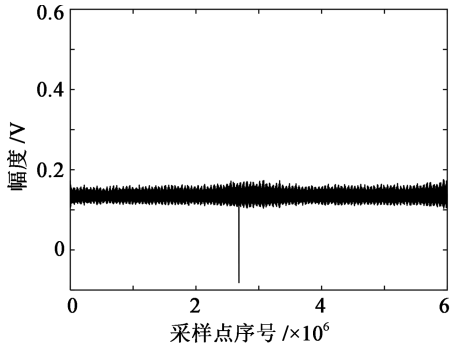
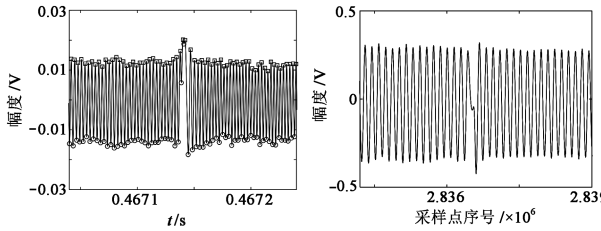


图 4　调频激光跳模位置的确定

双干涉光路调频激光在扫频过程中出现跳模现象会给辅助干涉信号极值位置的确定带来影响，如果以辅助干涉信号极值点来确定重采样的时刻，会使激光跳模段的重采样信号发生畸变。图 5(a)为系统辅助干涉光路的信号，通过信号低通滤波后，大部分的噪声已被去除，其中“□”点代表信号峰值，“°”点代表谷值。图 5(b)为在该时间段内以辅助干涉信号为时钟对测距干涉光路信号进行重采样得到的干涉信号。



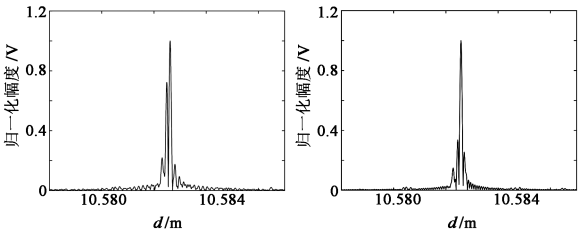
(a)　辅助干涉光路信号　　(b)　重采样信号

图 5　激光跳模处辅助干涉信号及重采样信号

直接对重采样信号进行 CZT 后得到的目标距离谱如图 6(a)所示，可以看出，目标距离谱有两个明显的谱峰，不能准确地提取出目标的距离信息。对重采样信号进行相位展开并求导就可以找到重采样信号中受扫频激光跳模影响的部分。将跳模两端信号峰值进行拼接，并对拼接后的重采样信号进行 CZT，得到的目标距离谱如图 6(b)所示。与图 6(a)相比，基于相位拼接的重采样信号距离谱旁瓣显著降低，谱峰更加明显，从中可以将谱峰对应的距离更准确地提取出来。

实验对测距干涉光路进行多次测量，其测量结果如图 7 所示。其中，“o”代表未消除激光跳模影响的距离测量结果，“+”为基于重采样信号相位拼接得到的目标测量结果。可以看出，图中第 1，3，4，5，6 和 8 次测量过程中未出现跳模现象。为了衡量系

统测距的精度，本文利用标准差来对测量结果进行评估。在消除跳模影响前，系统测距的标准差为19.3 μm，而经过相位拼接处理后得到的目标测距标准差达到了12 μm。实验结果证明，此方法可以有效提高距离测量的精度。



(a) 拼接前 (b) 拼接后

图6 相位拼接前后的目标距离谱

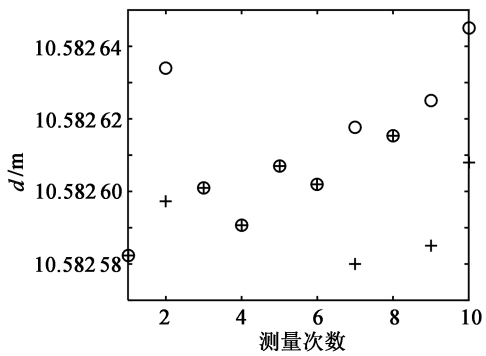


图7 拼接前后目标测距结果

3 结论

在双干涉光路调频连续波激光测距过程中，为了消除调频光源偶发的跳模现象对目标距离测量的影响，本文提出了一种基于重采样信号相位拼接的跳模影响消除方法。此方法通过对重采样干涉信号的相位展开并求导来监测激光跳模的发生并确定信号中受跳模影响的位置，通过信号两端峰值拼接来消除跳模对重采样信号的影响。实验结果表明，基于重采样信号相位拼接的方法可以有效消除激光跳模对调频连续波激光雷达目标绝对距离测量的影响，提高系统测距的精度。

参考文献：

[1] Fox-Murphy A F, Howell D F, Nickerson R B, et al. Frequency scanned interferometry (FSI): The basis of a survey system for ATLAS using fast automated remote interferometry[J]. Nuclear Instruments & Methods in Physics Research, 1996, 383(1): 229-237.

[2] Zheng J. Analysis of optical frequency-modulated continuous-wave interference[J]. Appl. Opt., 2004, 43(21): 4189-4198.

[3] Wu X, Wei H, Zhang H, et al. Absolute distance measurement using frequency-sweeping heterodyne interferometer calibrated by an optical frequency comb[J]. Appl. Opt., 2013, 52(10): 2042-2048.

[4] Yang H J, Deibel J, Nyberg S. High-precision absolute distance and vibration measurement with frequency scanned interferometry[J]. Appl. Opt., 2005, 44(19): 3937-3944.

[5] Dale J, Hughes B, Lancaster A J. Multi-channel absolute distance measurement system with sub ppm-accuracy and 20 m range using frequency scanning interferometry and gas absorption cells[J]. Opt. Express, 2014, 22(20): 24869-24893.

[6] 路统霄，张有润，章玉飞，等. 一种用于激光脉冲测距的恒比定时电路[J]. 微电子学，2019，49(6)：812-816.
Lu Tongxiao, Zhang Yourun, Zhang Yufei, et al. A constant fraction discriminator for laser pulse ranging [J]. Microelectronics, 2019, 49(6): 812-816.

[7] Wen D, Zhigang L, Zhongwen D, et al. Extraction of interference phase in frequency-scanning interferometry based on empirical mode decomposition and Hilbert transform[J]. Appl. Opt., 2018, 57(9): 2299-2305.

[8] Satyan N, Vasilyev A, Rakuljic G, et al. Precise control of broadband frequency chirps using optoelectronic feedback[J]. Opt. Express, 2009, 17(18): 15991-15999.

[9] Peter A R, Randy R R, Trenton B, et al. Ultrabroadband optical chirp linearization for precision metrology applications [J]. Opt. Lett., 2009, 34(23): 3692-3694.

[10] Shi G, Zhang F M, Qu X H. High-resolution frequency-modulated continuous-wave laser ranging for precision distance metrology applications[J]. Opt. Engin., 2014, 53(12): 122402.

[11] 孟祥松，张福民，曲兴华. 基于重采样技术的调频连续波激光绝对测距高精度及快速测量方法研究[J]. 物理学报，2015，64(23)：35-41.
Meng X S, Zhang F M, Qu X H. High precision and fast method for absolute distance measurement based on resampling technique used in FM continuous wave laser ranging[J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(23): 35-41.

[12] 贾 韬. 线性调频激光器跳模抑制研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2017：37-47.
Jia T. Research on mode hopping inhibition of linear frequency modulation laser[D]. Harbin: Harbin Institute of Technol., 2017: 37-47.

[13] Shi G, Wang W, Zhang F. Precision improvement of frequency-modulated continuous-wave laser ranging system with two auxiliary interferometers [J]. Opt. Communications, 2018, 411: 152-157.

作者简介：

姜 朔(1993—)，女，山东日照人，博士生，主要研究方向为激光雷达探测；

刘 博(1979—)，男，博士，研究员，博士生导师，主要研究方向为激光雷达探测与激光通信。