

# 基于气体池信号拼接的高精度调频连续波激光测距

伊灵平, 张福民\*, 曲兴华, 李雅婷

(天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072)

**摘要:**在双光路调频连续波激光测距系统中,辅助光纤的长度标定精度直接影响了系统的测距精度。提出一种基于氰化氢气体池信号拼接的辅助光纤标定方法,通过提高辅助光纤标定精度进而提高系统测距精度。深入研究了基于氰化氢气体池标定方法的原理,为减小数据采集系统负担,利用信号拼接的方法进行改进。实验表明,与传统激光干涉仪的光纤标定方法相比,基于气体池拼接的标定方法具有更高的稳定性,同时,在 3.8 m 测量范围内,采用该标定方法的测距系统与干涉仪标准距离值误差不超过 14  $\mu\text{m}$ ,测量标准差低于 17  $\mu\text{m}$ 。

**关键词:**调频连续波激光测距; 光纤标定; 氰化氢气体吸收池; 重采样

中图分类号: TN249 文献标识码: A

## High precision frequency modulated continuous wave (FMCW) laser ranging based on gas cells signal splicing

YI Ling-Ping, ZHANG Fu-Min\*, QU Xing-Hua, LI Ya-Ting

(State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments,  
Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** In the dual-path FMCW laser ranging system, the length calibration accuracy of the reference optical fiber directly affects the ranging accuracy. In order to improve the ranging accuracy, a high precision reference optical fiber calibration method was proposed, which was based on hydrogen cyanide ( $\text{H}^{13}\text{C}^{14}\text{N}$ ) gas cells signal splicing. In this paper, the principle of calibration method based on  $\text{H}^{13}\text{C}^{14}\text{N}$  gas cells was deeply researched. Moreover, to reduce the burden of data acquisition,  $\text{H}^{13}\text{C}^{14}\text{N}$  signal splicing was used to optimize the calibration method. The experiments show that the calibration method based on  $\text{H}^{13}\text{C}^{14}\text{N}$  signal splicing is more stable than that based on laser interferometer traditionally. After calibrating the reference optical fiber by using  $\text{H}^{13}\text{C}^{14}\text{N}$ . At the same time, within a measuring range of 3.8 m, the error between ranging value of FMCW system and measuring value of interferometer is less than 14  $\mu\text{m}$ , and the standard deviation is less than 17  $\mu\text{m}$ .

**Key words:** FMCW laser ranging, optical fiber calibration,  $\text{H}^{13}\text{C}^{14}\text{N}$  gas cells, resampling

**PACS:** 42. 68. Wt, 42. 79. Qx

## 引言

调频连续波(Frequency Modulated Continuous Wave, FMCW)激光测距也称频率扫描干涉测距,因其在绝对测距上具有测量精度高,测距准确度好,测量速度快,无需合作目标,能实现三维目标测量

和形貌扫描等优势而备受精密工业领域关注<sup>[1-4]</sup>。与传统的激光相位法和激光脉冲法<sup>[5]</sup>相比,它具有更高的测距精度和分辨力,因此在大尺寸非接触式高精度测量中具有广泛的应用前景<sup>[6-7]</sup>。

FMCW 激光测距原理是通过线性调频激光本振信号与物体表面反射的回波信号混频产生固定

收稿日期: 2019-09-24, 修回日期: 2020-03-25

基金项目: 国家自然科学基金(51675380, 51775379)

Foundation items: Supported by the National Natural Science Foundation of China(51675380, 51775379)

作者简介(Biography): 伊灵平(1996-), 女, 福建三明人, 硕士研究生, 主要研究领域: 激光大尺寸测量. E-mail: yi\_lingping@163.com

\* 通讯作者(Corresponding author): E-mail: zhangfumin@tju.edu.cn

Received date: 2019-09-24, Revised date: 2020-03-25

频率的拍频信号,固定频率与物体距离成正比,据此得到物体距离,达到测距的目的。该方法对调频激光线性度有很高的要求,实际应用中,激光器的调制特性并非完全线性,调频激光存在一定波动,导致拍频不稳定,频谱展宽,极大地影响了测距分辨率和准确度<sup>[8]</sup>。为解决光源非线性问题,2009年,Naresh Satyan等搭建闭环锁相系统,通过将频率误差信号反馈至光源控制元件,实现1 ms内100 GHz的线性频率输出,实时测距分辨率为1.5 mm<sup>[9-10]</sup>。这种对光源的反馈控制结构调试困难,成本较高,且锁相过程导致测距速度下降。2010年,王林春等人提出一种对光强信号做一阶微分相除处理的相位提取算法实现非线性误差的消除<sup>[11]</sup>。2016年,刘志刚等人提出一种非平稳干涉信号阶次跟踪抑制激光频率非线性输出的方法,实现在1 m测量范围内,将空间分辨率提高36倍以上<sup>[12]</sup>。但这些算法存在运算复杂的问题。2009年,比利时Yüksel等人提出利用短光纤延时进行重采样的方法,将距离分辨力提高了30倍<sup>[13]</sup>。该方法结构简单,非线性消除效果好。2017年,刘国栋等人基于长光纤等光频采样技术,用光学自聚焦函数模型修正色散引起的频谱畸变,对3.89 m的目标进行40 nm带宽扫描,色散补偿后分辨力达到32.2 μm<sup>[14]</sup>。2012年,本课题组时光等人开始对FMCW激光测距技术展开研究,基于等光频重采样的方法搭建双光路测距系统<sup>[15]</sup>。2015年,职广涛等人利用信号拼接的方法突破带宽限制,实现测量距离为8.7 m时分辨率达到70 μm<sup>[16]</sup>。2018年,史春钊等人在测量光路增加延时光纤,使测量距离拓展到65 m,并利用相位补偿对长距离色散校正,校正后频谱分辨力达123 μm<sup>[17]</sup>。

等光频重采样可以有效消除非线性的影响,该方法引入一路辅助的Mach-Zehnder干涉光路作为时钟基准对测量光路拍频信号进行二次重采样<sup>[15]</sup>。双光路系统测得距离信息与辅助光路延时光程正相关,辅助光纤的长度标定精度直接影响测距精度。目前,对辅助光纤长度的标定常采用:光时域反射计法,但该方法精度较低<sup>[18]</sup>,不能满足FMCW激光测距系统高精度测量要求;或采用更高精度的测距装置,如单频激光干涉仪,商用激光跟踪仪等,与FMCW激光测距系统的测距值进行对比,反解出辅助光纤长度,该方法精度高,但受测距系统本身精度及环境振动等影响,稳定性较差<sup>[19]</sup>;或采用飞秒激光作为FMCW激光测距系统的参考基准,将光

学梳齿锁定在标准激光频率上,能实现良好的重复性和准确度,但该方法价格昂贵,系统复杂<sup>[20]</sup>。因此,需要一种结构简单,可操作性强的高精度光纤标定方法。

H<sup>13</sup>C<sup>14</sup>N气体池具有对特定波长吸收的特性,波长的吸收谱线由美国标准技术研究院(NIST)认证,其重复性和稳定性精度高<sup>[21]</sup>。为实现辅助光路程的高精度标定,进而实现FMCW激光测距系统高精度的测量,提出一种基于H<sup>13</sup>C<sup>14</sup>N气体池信号拼接的辅助光纤标定方法,将H<sup>13</sup>C<sup>14</sup>N气体池作为校准源,对辅助光路延时光纤进行标定,与传统的干涉仪反解法进行对比具有更高的稳定性。同时,通过拼接的方式实现单次采集少量H<sup>13</sup>C<sup>14</sup>N吸收峰值,减少单次数据采集量,突破采集系统限制。通过搭建基于H<sup>13</sup>C<sup>14</sup>N气体池信号拼接的双光路FMCW激光测距系统,验证了该方法的可行性。在3.8 m测量范围内,与干涉仪标准距离值对比误差不大于14 μm,测量标准差低于17 μm,实现高精度的距离测量。

## 1 原理

图1所示为基于气体池标定的双光路FMCW激光测距装置图。其中测量光路及辅助参考光路构成双光路测距系统,辅助参考光路及气体池校准光路构成辅助光纤标定系统。

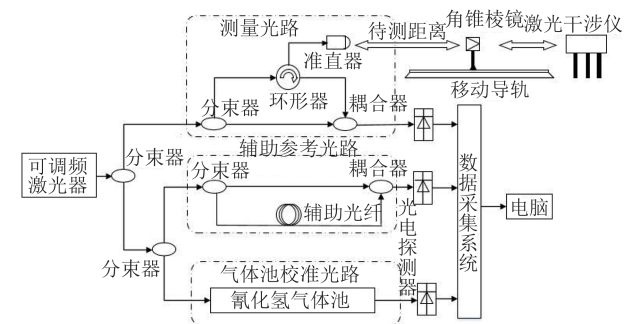


图1 基于气体池标定的测距实验装置图

Fig. 1 The ranging experimental device based on gas cells calibration

### 1.1 双光路FMCW激光测距原理

FMCW激光测距系统以可调谐激光器作为光源,出射光频率随时间线性变化表示为:

$$f_i = f_0 + \alpha t \quad (1)$$

$f_0$ 为初始频率, $\alpha$ 为激光调制速率。

出射光信号表示为:

$$E = E_0 \exp\left(j2\pi \int_0^t f_i dt\right) \\ = E_0 \exp\left\{j\left[2\pi\left(f_0 t + \frac{1}{2}\alpha t^2\right) + \varphi_0\right]\right\}, \quad (2)$$

$E_0$ 为幅度,  $\varphi_0$ 为初始相位。

出射光经过环形器, 准直器, 到达物体表面反射的回波信号表示为:

$$E' = \rho E_0 \exp\left\{j\left[2\pi\left(f_0(t - \tau_m) + \frac{1}{2}\alpha(t - \tau_m)^2\right) + \varphi_0\right]\right\} \quad (3)$$

$\rho$ 为幅度衰减系数,  $\tau_m$ 为待测距离产生的时间延迟。

回波信号与出射信号耦合产生拍频信号, 归一化后表示为:

$$E_m(t, \tau_m) = \exp\left[j2\pi\left(\alpha\tau_m t + f_0\tau - \frac{1}{2}\alpha\tau_m^2\right)\right], \quad (4)$$

如式(4)所示, 拍频信号频率  $f = \alpha\tau$ , 对于静止物体, 当激光调制速率保持恒定, 即激光严格线性输出时, 拍频频率稳定且唯一。通过求解固定频率, 得到时间延迟, 进而换算待测距离, 实现测距。但实际应用中, 激光器调制很难实现完全线性, 存在一定波动, 导致拍频频率波动, 分辨率下降, 大大降低测距精度。

实际拍频信号归一化后表示为:

$$E(\varphi(t), \tau_m) = \exp\left[j2\pi\left(\alpha\tau_m\varphi(t) + f_0\tau_m - \frac{1}{2}\alpha\tau_m^2\right)\right] \quad (5)$$

其中  $\varphi(t) = t + \sum_{i=2}^M \alpha_i t^i$ , 多项式表示非线性项,  $\alpha_i$  为非线性频率调制变化率。

为解决光源非线性问题, 在原有系统中增加一路已知光纤长度的 Mach-Zehnder 干涉光路作为辅助光路, 得到的拍频信号归一化后表示为:

$$E(\varphi(t), \tau_r) = \exp\left[j2\pi\left(\alpha\tau_r\varphi(t) + f_0\tau_r - \frac{1}{2}\alpha\tau_r^2\right)\right], \quad (6)$$

$\tau_r$ 为辅助光路延时光纤产生的时间延迟。

数据采集卡获取测量光路及辅助光路拍频信号, 提取辅助光路拍频信号的峰谷值位置点, 峰谷值位置表示为:

$$\alpha\tau_r\varphi(t) + f_0\tau_r - \frac{1}{2}\alpha\tau_r^2 = \frac{k}{2}, k = 1, 2, 3, \dots, \quad (7)$$

利用峰谷值位置对测量拍频信号重采样, 得到采样间隔为:

$$\Delta\varphi = \varphi_{k+1}(t) - \varphi_k(t) = \frac{1}{2\alpha\tau_r}, k = 1, 2, 3, \dots, \quad (8)$$

重采样后得到的采样点总数为  $N$ , 对重采样后的测量拍频信号进行 FFT 运算得到频谱图, 峰值点位置  $K$  对应的频率值即所需的频率信息, 其频率为:

$$f = F_s \frac{K}{N} = \frac{1}{\Delta\varphi} \frac{K}{N} = 2\alpha\tau_r \frac{K}{N}, \quad (9)$$

由上式可见, 得到的单一频率与非线性无关, 重采样消除了非线性项带来的影响。又频率与待测距离之间关系表示为:

$$f = \alpha\tau_m = \alpha \frac{2s}{c} = 2\alpha\tau_r \frac{K}{N}, \quad (10)$$

则待测距离可表示为:

$$s = c\tau_r \frac{K}{N} = nL \frac{K}{N}, \quad (11)$$

$c$ 为光在真空中传播速度;  $L$ 为辅助光路中延时光纤长度;  $n$ 为光纤折射率。在延时光纤长度  $L$  已知, 峰值位置点  $K$  已知的条件下, 得到距离信息。其中, 由于利用辅助信号峰谷值对测量信号重采样, 依据采样定律, 辅助信号频率至少为测量信号频率的两倍, 即辅助光路光程至少为待测距离两倍, 实际应用中一般 4~5 倍。由式(11)可知, 在双光路 FMCW 激光测距系统中, 待测距离与辅助光路延时光纤长度呈正比, 系统的测距精度与辅助光纤长度的标定精度密切相关。

## 1.2 辅助光路光纤标定

### 1.2.1 利用 $H^{13}C^{14}N$ 气体池标定辅助光纤原理

$H^{13}C^{14}N$  气体池对特定波长进行吸收, 利用此吸收谱线对辅助光纤进行长度标定, 以此为校准源标定得到的光纤长度可溯源到 NIST 标准。表 1 所示为 1 527 ~ 1 565 nm 波长在  $H^{13}C^{14}N$  气体吸收池中所产生的吸收峰谱线。

$H^{13}C^{14}N$  气体池光纤标定方法由辅助参考光路及气体池校准光路构成。激光出射后, 经耦合器分别进入两光路部分。在 1.1 节已给出, 可调谐激光经过辅助参考光路产生拍频信号。可调谐激光经过气体池校准光路, 由于  $H^{13}C^{14}N$  气体池对特定波长的吸收特性, 得到吸收峰谱线图, 如图 2 所示。吸收波长可通过对照吸收峰谱线表获得。

辅助光路拍频信号由激光本振信号和延时信号混频后产生, 相位可由本振信号  $\varnothing(t)$  和延时信号相位  $\varnothing(t - \tau_r)$  相减表示, 对  $\varnothing(t - \tau_r)$  泰勒展开, 忽略二阶及高阶项, 表示为:

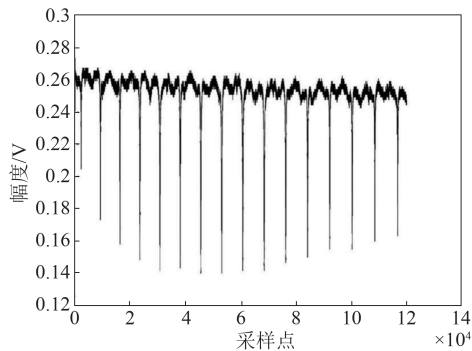
$$\varnothing(t) - \varnothing(t - \tau) \approx \varnothing'(t)\tau_r = 2\pi\tau_r f_i, \quad (12)$$

又对拍频信号希尔伯特变换后解相, 可得每个采样点处相位  $\varnothing$ 。

表1 波长吸收峰谱线表

Table 1 Wavelength absorption peak

R区	波长/nm	P区	波长/nm
26	1 527. 633 42	1	1 543. 114 23
25	1 528. 054 74	2	1 543. 809 67
24	1 528. 485 74	3	1 544. 515 03
23	1 528. 926 43	4	1 545. 230 33
22	1 529. 376 81	5	1 545. 955 49
21	1 529. 836 88	6	1 546. 690 55
20	1 530. 306 66	7	1 547. 435 58
19	1 530. 786 15	8	1 548. 190 57
18	1 531. 275 37	9	1 548. 955 55
17	1 531. 774 30	10	1 549. 730 51
16	1 532. 282 98	11	1 550. 515 46
15	1 532. 801 39	12	1 551. 310 45
14	1 533. 329 54	13	1 552. 115 46
13	1 533. 867 45	14	1 552. 930 51
12	1 534. 415 14	15	1 553. 755 62
11	1 534. 972 58	16	1 554. 590 79
10	1 535. 539 81	17	1 555. 436 05
9	1 536. 116 83	18	1 556. 291 41
8	1 536. 703 64	19	1 557. 156 86
7	1 537. 300 29	20	1 558. 032 40
6	1 537. 906 75	21	1 558. 918 08
5	1 538. 523 05	22	1 559. 813 89
4	1 539. 149 21	23	1 560. 719 83
3	1 539. 785 23	24	1 561. 635 93
2	1 540. 431 20	25	1 562. 562 18
1	1 541. 087 03	26	1 563. 498 59
0	1 541. 752 80	27	1 564. 445 19

图2 H<sup>13</sup>C<sup>14</sup>N气体池部分吸收峰谱线Fig. 2 Partial absorption peaks in H<sup>13</sup>C<sup>14</sup>N spectrum

经H<sup>13</sup>C<sup>14</sup>N气体池所得的校准信号对照吸收谱线表1,可知吸收峰位置点k处对应的吸收波长 $\lambda_k$ 。由于拍频信号和校准信号经数据采集卡同时采集,两信号相同采集位置点为同一时刻信号,找到拍频信号中k处相位 $\varnothing_k$ 。同一时刻,波长 $\lambda_k$ 对应拍频相

位 $\varnothing_k$ 。波长转化为频率 $f_k$ ,得到 $f_k-\varnothing_k$ 对应关系。式(12)中,拍频相位与频率为一次函数关系,将 $f_k-\varnothing_k$ 对应关系通过最小二乘法拟合为一次函数,表示为:

$$\varnothing(f_i) = af_i + b \quad (13)$$

$a$ 为拟合后一次函数斜率,联立式(12-13),辅助光纤延迟时间可表示为:

$$\tau_r = \frac{a}{2\pi} \quad (14)$$

延迟时间与光纤长度关系转换表示为:

$$L = \frac{c\tau_r}{n} \quad (15)$$

至此,获得辅助光纤长度标定值。

### 1.2.2 利用H<sup>13</sup>C<sup>14</sup>N气体池拼接标定光纤原理

文章1.2.1节已经分析基于H<sup>13</sup>C<sup>14</sup>N气体池标定辅助光纤的原理,其中,通过 $f_k-\varnothing_k$ 对应关系拟合相位函数。频率与相位在拍频信号中函数关系是确定的,当用来拟合的 $f_k-\varnothing_k$ 对应点越多,即校准信号包含的吸收峰值越多,拟合结果越接近于其真实的函数关系,最终标定的光纤长度越准确。由表1可知,相邻峰值间隔约0.7 nm,每增加一个吸收峰值,需增加约0.7 nm带宽数据采集量。为将相位函数拟合准确,至少需要20个吸收峰值,即至少14 nm的数据量。当待测距离增加,由于采样定律,辅助光纤长度增加,势必带来采集卡采集数据量的增加,这对数据采集系统及数据处理带来极大的负担。为解决该标定方法单次数据采集量过大的问题,提出一种分段采集后对获得的 $f_k-\varnothing_k$ 进行拼接再拟合的改进方法。

将一定带宽的激光分段出射,相邻带宽间需满足至少重合一个波长吸收峰的条件,每段激光进入系统后都可获得一组 $f_k-\varnothing_k$ 对应关系。将相邻带宽得到的对应关系进行拼接。如图3所示为两组未拼接的 $f_k-\varnothing_k$ 关系,两组待拼接的 $f_k-\varnothing_k$ 关系中存在于一个重合的频率值,对应来自两组信号的不同相位点。选取第1组中一重合频率处相位为基准点,保持第二组各频率所对应的相位的间隔不变,将第2组 $f_k-\varnothing_k$ 值平移至两组对应点在基准点处相位相等,第2组 $f_k-\varnothing_k$ 值平移后,在所有重合频率处均存在来自两组拼接信号的两个相位值,为保持在每个吸收峰频率只有一个对应相位值,删除其中任一相位值,完成两组拼接。循环以上步骤实现多组之间的拼接。拼接后得到最终带宽内所有的 $f_k-\varnothing_k$ 对应关

系,依据文章 1.2.1 所述方法拟合相位函数,由式(13-15)标定光纤长度。

这种基于  $\text{H}^{13}\text{C}^{14}\text{N}$  气体池分段拼接再拟合的标定方法一方面继续保持了利用  $\text{H}^{13}\text{C}^{14}\text{N}$  气体池进行光纤标定方法的稳定性和准确性,另一方面减少了每次采集的数据量,仅需保持两组拼接信号至少重合一个波长吸收谱线就可实现拼接,则单次采集最低只需两个波长吸收峰,即 1.4 nm 左右的数据量,每次采集数据量降低了至少 10 倍,极大的降低了对数据采集系统的要求。同时,可灵活的增加拼接段数来增加所需的  $f_k-\varnothing_k$  对应关系个数,突破了数据采集系统的限制。

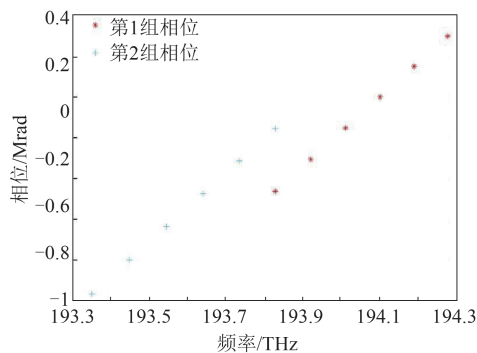


图3 未拼接前两组频率-相位值

Fig. 3 Two groups of non-spliced frequency-phase values

## 2 实验及分析

### 2.1 基于 $\text{H}^{13}\text{C}^{14}\text{N}$ 气体池拼接的光纤标定实验

为了验证基于  $\text{H}^{13}\text{C}^{14}\text{N}$  气体池拼接的光纤标定方法的有效性,依据图 1 所示装置图搭建了双光路 FMCW 激光测距系统。调频连续波激光发射后,分为三路。第一路为测量光路。经过 90/10 分束器,其中 90% 光经过环形器、准直器后出射,到达目标角锥棱镜后返回,与剩余 10% 本振光在 50/50 耦合器处拍频。其中角锥棱镜置于移动导轨,后方由一激光干涉仪测量角锥棱镜位置,将激光干涉仪测得的相对距离值作为测距系统标准值。第二路为辅助参考光路。由一个 Mach-Zehnder 干涉光路构成,测量臂用长光纤进行延时,在 50/50 耦合器处拍频,用于等光频重采样及光纤标定。最后一路为气体池校准光路。经过  $\text{H}^{13}\text{C}^{14}\text{N}$  气体池产生吸收波长谱线,用于标定辅助光纤。三路信号均由光电探测器探测,由数据采集系统同时采集。实验所用的光源为 Luna 公司的可调谐激光器 PHOENIX 1400,调制速率和调

制范围分别设置为 100 nm/s 和 1 542~1 559 nm。气体吸收池为 Wavelength References 公司制造的 HCN-13-H(16.5)-25-FC/APC,并经美国标准技术研究院(Nist)校准过。待标定的辅助光纤为 G652 单模光纤,长度约为 55 m,光纤平均折射率为 1.467。激光干涉仪则是选用的是 Renishaw 公司的 XL-80 @633 nm,其线性测量相对误差 < 0.05 ppm。导轨采用的是大恒光电公司的 1m 电控位移台线性导轨 GCD-302004M。

将 1 542~1 559 nm 的调谐范围,对照表 1,分为 1 542~1 544.9 nm, 1 544 ~1 546.3 nm, 1 545.4 ~1 547.8 nm, 1 547~1 549.3 nm, 1 548.5~1 551 nm, 1 550~1 552.5 nm, 1 551.5~1 554.1 nm, 1 553.3~1 555.8 nm, 1 554.9~1 557.7 nm, 1 556.8~1 559 nm,共 10 组调谐段,每段包含 3 个吸收峰值,前后相邻两段重合 1 个波长吸收峰,分别为波长吸收峰 P3, P5, P7, P9, P11, P13, P15, P17, P19。将激光器按照上述 10 段调谐范围出射激光,分别得到各自的校准光路信号和辅助光路拍频信号,提取每段校准信号中吸收峰频率  $f_k$ ,及在拍频信号对应点处相位  $\varnothing_k$ 。先将 1 542~1 544.9 nm, 1 544~1 546.3 nm 两段  $f_k-\varnothing_k$  关系拼接,两组重合吸收峰为 P3 峰,以 1 542~1 544.9 nm 段在 P3(1 544.515 03 nm)处相位为基准,将 1 544~1 546.3 nm 段  $f_k-\varnothing_k$  关系整体平移至 P3 处两组相位相同,删除 1 544~1 546.3 nm 段在 P3 处相位,保持每个吸收峰频率对应一个相位,完成一次拼接。将后续 8 段  $f_k-\varnothing_k$  依次拼接,拼接完成后对所有  $f_k-\varnothing_k$  进行最小二乘拟合一次函数,得到直线斜率。图 4 所示为 10 段信号拼接后  $f_k-\varnothing_k$  关系及拟合后直线。由公式(14)、(15)计算得到标定长度,为避免数据的随机性,进行 10 次重复实验。10 次重复性实验得到的标定均值为 55.058859 m,与辅助光纤长度基本吻合。

为了进一步确定标定所得值的可靠性,将 10 次标定均值作为辅助光纤长度值代入测距系统。角锥棱镜置于移动导轨,测量位置 1 处角锥棱镜位置 S1,10 次重复性实验,均值为 3.497 671 4 m,沿导轨移动一定距离,测距系统测得位置 S2 均值为 3.528 937 5 m,测距系统测得相对距离为 0.031 269 1 m,与激光干涉仪测得两点标准距离值 0.031 261 4 m 对比得到误差为 4.7  $\mu\text{m}$ ,10 次测量标准差为 7.5  $\mu\text{m}$ 。共测量 11 个位置,得到 10 组相对距离值,每组距离值与激光干涉仪标准值做对比,误差及标准差

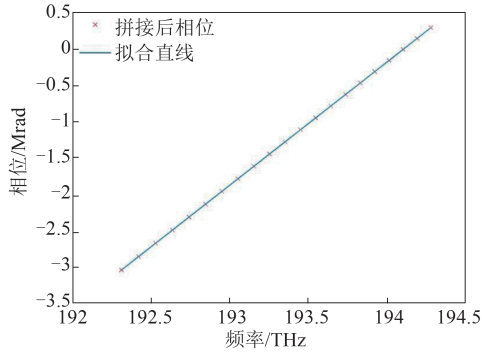


图4 拼接后频率-相位值及其拟合直线  
Fig. 4 Spliced frequency-phase values and fitting line

如图5所示。从结果的对比情况来看,在3.8 m范围内,与干涉仪相比,误差小于14 μm,最大标准差小于17 μm。考虑到系统受环境的影响,以及测距系统本身对信号重采样存在的误差都对最终的测距结果产生影响,其产生的误差是合理的,因此基于H<sup>13</sup>C<sup>14</sup>N气体池拼接标定的辅助光纤长度合理,此方法可行。

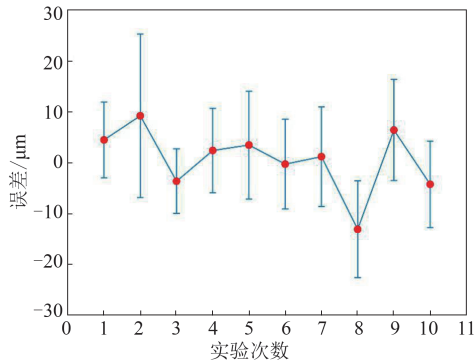


图5 测量误差及标准差  
Fig. 5 Measurement error and standard deviation

图6所示为以不同拼接段数标定光纤长度的双光路系统测距误差结果。图中,4段及以上拼接标定光纤长度的测距误差值随拼接段数的增加,逐渐下降并趋于平缓。证明随着拼接段数的增加,其标定得到的辅助光纤长度越来越接近其真实值。最终稳定在一定的误差值处原因在于测距系统重采样精度及光路中光纤色散等的影响。

### 2.2 基于激光干涉仪的标定方法与基于H<sup>13</sup>C<sup>14</sup>N气体池拼接的标定方法对比

基于激光干涉仪反解的标定方法是通过激光干涉仪和测距系统同时测量导轨上物体两个位置S1和S2,激光干涉仪得到两个位置相对距离ΔS,测距系统对测量光路重采样后拍频信号FFT运算得到

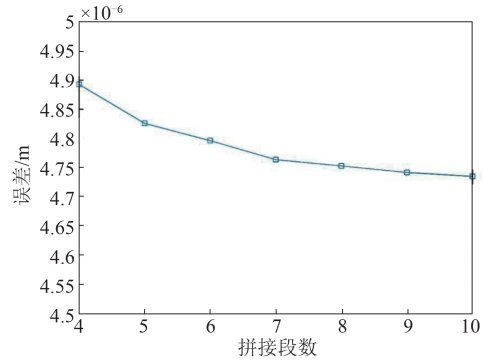


图6 不同拼接段数结果  
Fig. 6 Result of different splices

两个频率位置点K1/N1和K2/N2。基于公式(11),可将辅助光纤长度表示为:

$$L = \frac{S1 - S2}{n\left(\frac{K1}{N1} - \frac{K2}{N2}\right)} = \frac{\Delta S}{n\left(\frac{K1}{N1} - \frac{K2}{N2}\right)} \quad (16)$$

实现光纤标定。为了验证基于H<sup>13</sup>C<sup>14</sup>N气体池拼接的标定方法的稳定性,与基于激光干涉仪反解的标定方法进行对比实验。利用基于干涉仪的光纤标定方法进行重复测量,共记录角锥棱镜在干涉导轨上共11个位置点,每个位置利用测距系统获得频率点位置Kt/Nt(t为1~11)并记录激光干涉仪示数,通过公式(16)计算辅助光纤长度。表2所示为激光干涉仪测得值及光纤标定长度。标定结果去除粗大误差后标准差为7853 μm,基于10段H<sup>13</sup>C<sup>14</sup>N气体池拼接标定的光纤长度标准差为92 μm,后者稳定性是前者的88倍左右。图7所示为两种方法10次标定数据对比图。可以看出基于H<sup>13</sup>C<sup>14</sup>N气体池拼接标定的辅助光纤标定方法较基于激光干涉仪的标定方法具有更高的稳定性。

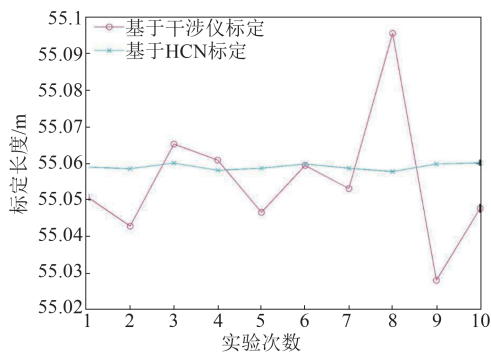


图7 基于干涉仪标定法与基于H<sup>13</sup>C<sup>14</sup>N标定法对比图  
Fig. 7 Comparison of interferometer calibration method and H<sup>13</sup>C<sup>14</sup>N calibration method

表2 干涉仪测得值及标定长度

Table 2 Interferometer measured value and calibration length

位置点 t	测量值 S/mm	$\Delta S/\text{mm}$	标定长度 L/m
1	0	/	/
2	31.2617	31.2617	55.050969
3	62.5123	31.2506	55.042787
4	93.7442	31.2319	55.065276
5	124.9827	31.2385	55.060870
6	156.2635	31.2808	55.046554
7	187.5090	31.2455	55.059420
8	218.7327	31.2237	55.053076
9	249.9534	31.2207	55.095570
10	281.1820	31.2286	55.027957
11	312.4502	31.2682	55.047647

### 3 结语

辅助光纤长度的测量精度是影响双光路调频连续波激光测距精度的重要因素之一。在深入研究双光路调频连续波激光测距原理的基础上,研究了辅助光纤长度的标定精度对测距精度的影响。为实现高精度的辅助光纤标定,提出一种基于 $\text{H}^{13}\text{C}^{14}\text{N}$ 气体池的辅助光纤标定方法,分析和推导了该方法的标定原理,并给出气体吸收池信号拼接的改进措施。改进后的方法极大减少了单次数据采集量,降低了对采集系统的要求。对该光纤标定方法的稳定性及基于该方法的测距系统的测距误差进行实验分析。实验表明,基于 $\text{H}^{13}\text{C}^{14}\text{N}$ 气体池信号拼接的方法较传统激光干涉仪反解法具有更高的稳定性,采用该标定方法的双光路测距系统在3.8 m测量范围内,测距误差不超过 $14\ \mu\text{m}$ ,测量标准差低于 $17\ \mu\text{m}$ 。

### References

- [1] YE Sheng-Hua, WANG Zhong, QU Xing-Hua. Prospect of precision measurement technology [J]. *China Mechanical Engineering* (叶声华, 王仲, 曲兴华, 精密测试技术展望. *中国机械工程*), 2000, **11**(3):262-263.
- [2] ZHOU Na, AN Zhi-Yong, LI Yong-Hao. Large-sized three-dimensional profile measurement technology based on laser radar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, **40**(12):2465-2468.
- [3] MA Li-Qun, WANG Li-Ding, JIN Shu-Yuan, et al. Large-size industrial trace ability status quo and development trend of measuring instruments [J]. *Measurement Technology* (马骊群, 王立鼎, 靳书元, 等. 工业大尺寸测量仪器的溯源现状及发展趋势. *计测技术*), 2007, **26**(6):1-5.
- [4] ZHOU Sen, GUO Yong-Cai, GAO Chao. Dynamic length

measuring system for large scale work pieces [J]. *Optics and Precision Engineering* (周森, 郭永彩, 高潮. 用于大尺寸工件的动态长度测量系统. *光学精密工程*), 2012, **20**(11):2472-2478.

- [5] CHEN Qian-Song, ZHAO Da-Long, YANG Cheng-Wei, et al. Study on self-triggering pulsed time-of-flight laser range finding [J]. *Chinese Journal of Lasers* (陈千颂, 赵大龙, 杨成伟, 等. 自触发脉冲飞行时间激光测距技术研究. *中国激光*), 2004, **31**(6):745-748.
- [6] TAN Shuo, GUO Wei. Research of short-distance target range detection system [J]. *Ship Electronic Engineering* (谭朔, 郭伟. 调频连续波近程测距系统研究. *舰船电子工程*), 2007, **27**(4):95-99.
- [7] DU Yu-Ming, ZHANG Rong-Quan, YANG Jian-Yu. Detection in millimeter LFMCW radar target echo and acceleration-velocity estimation [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (杜雨铭, 张容权, 杨建宇. 毫米波LFMCW雷达加速运动目标回波检测与加速度-速度估计. *红外与毫米波学报*), 2005, **24**(5):348-351.
- [8] YUKSEL K, WUILPART M, MUGRET P. Analysis and suppression of nonlinear frequency modulation in an optical frequency-domain reflectometer [J]. *Optics Express*, 2009, **17**(7):5845-5851.
- [9] Satyan N, Vasilyev A, Rakuljic G, et al. Precise control of broadband frequency chirps using optoelectronic feedback [J]. *Optical Express*, 2009, **17**(18):15991-15999.
- [10] Satyan N, Liang W, Yariv A. Coherence cloning using semiconductor laser optical phase-lock loops [J]. *IEEE J. Quantum Electron*, 2009, **45**(7):755-761.
- [11] WANG Lin-Chun, JIANG Yue-Song, XIN Yao, et al. Analysis of nonlinear error in reference interferometer of frequency-sweeping interferometry [J]. *Journal of Optoelectronics·Laser* (王林春, 江月松, 辛遥, 等. 频率扫描干涉中参考干涉仪的非线性误差分析. *光子·激光*), 2010, **21**(9):1355-1358.
- [12] LIU Zhe, LIU Zhi-Gang, DENG Zhong-Wen, et al. Suppression of nonlinear frequency sweep in frequency sweeping interferometer based on order tracking technique [J]. *Acta Optica Sinica* (刘哲, 刘志刚, 邓忠文, 等. 扫频干涉测距光频率非线性阶次跟踪抑制方法. *光学学报*), 2016, **36**(01):140-148.
- [13] 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.
- [14] Liu Guo-Dong, Xu Xin-Ke, Liu Bing-Guo, et al. Dispersion compensation method based on focus definition evaluation functions for high-resolution laser frequency scanning interference measurement [J]. *Optics Communications*, 2017, **386**:57-64.
- [15] SHI Guang, Zhang Fu-Min, Qu Xing-Hua, et al. Absolute distance measurement by high resolution frequency modulated continuous wave laser [J]. *Acta Physica Sinica* (时光, 张福民, 曲兴华, 等. 高分辨率调频连续波激光绝对测距研究. *物理学报*), 2014, **63**(18):184209.
- [16] QU Xing-Hua, ZHI Guang-Tao, ZHANG Fu-Min, et al. Improvement of resolution of frequency modulated continuous wave laser ranging system by signal splicing [J]. *Optics and Precision Engineering* (曲兴华, 职广涛, 张福

- 民, 等. 利用信号拼接提高调频连续波激光测距系统的分辨力. *光学精密工程*, 2015, **23**(1):40-47.
- [17] SHI Chun-Zhao, ZHANG Fu-Min, PAN Hao, *et al.* Dispersion correction in large-length range finding of frequency modulation continuous wave (FMCW) based on phase compensation [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (史春钊, 张福民, 潘浩, 等. 基于相位补偿的调频连续波大长度测距中的色散校正. *红外与毫米波学报*), 2018, **37**(5): 642-648.
- [18] YUAN Guo-Liang. Principle of optical fiber communication [M]. Beijing: Tsinghua University Press (袁国良. 光纤通信原理. 北京: 清华大学出版社), 2004.
- [19] Stone J A, Stejskal A, Howard L. Absolute interferometry with a 670-nm external cavity diode laser [J]. *Applied Optics*, 1999, **38**(28):5981-5994.
- [20] 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.
- [21] Thomas D, George N. Large-volume, low-cost, high-precision FMCW tomography using stitched DFBs [J]. *Optics Express*, 2018, **26**(3):2891-2904.