

基于循环平稳随机序列的脉冲激光测距方法

姜博, 黄民双*, 关在辉

北京石油化工学院光机电装备技术北京市重点实验室, 北京 102617

摘要 脉冲定时误差会使测距精度恶化, 为此, 提出了一种基于循环平稳随机序列的脉冲激光测距方案。该方案首先将回波脉冲定时信号映射在周期基准信号上, 由此构造出一个循环平稳的随机序列, 将对脉冲定时时间的测量转化为对循环平稳随机序列的参数估计。该方法利用了循环平稳随机过程在时间上呈现为周期性平稳变化的特征, 从携带时间抖动等误差的测量数据中高精度地估计参数, 从而获得高精度的目标距离。为了获得循环平稳随机序列测量数据, 提出了一种遍历欠采样方法, 以解决在采样频率与信号频率相差很大的条件下进行等效间隔采样的困难。以此原理研制出的脉冲激光测距仪具有精度高、原理结构简单等优点, 测试后可知, 在激光出瞳平均功率为 1 mW 的条件下, 当信噪比为 10 时, 无合作目标测程为 300 m, 测距精度为 $\pm(2 \text{ mm} + 2 \times 10^{-6} D)$ 。

关键词 测量; 激光测距; 激光脉冲; 循环平稳随机序列; 相移估计

中图分类号 TN247

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.0101004

Pulsed Laser Ranging Method Using Cyclostationary Random Sequences

Jiang Bo, Huang Minshuang*, Guan Zaihui

Opto-Mechatronic Equipment Technology Beijing Area Major Laboratory, Beijing Institute of Petrochemical Technology, Beijing 102617, China

Abstract To avoid deterioration in the ranging accuracy caused by pulse-timing errors, a pulsed laser ranging method using cyclostationary random sequences is proposed. In this method, echo pulse-timing signals are mapped onto periodic reference signals to construct cyclostationary random sequences, which converts measurements of pulse-timing moments into parameter estimation of these sequences. The use of periodic stationary changes in time for cyclostationary stochastic processes enables the accurate estimation of parameters from the measurement data with timing jitter errors. High-precision target distances can then be obtained. An ergodic undersampling method is also proposed to overcome the difficulty of using equivalent and equally-spaced sampling for obtaining the measurement data of cyclostationary random sequences when the sampling and signal frequencies are very different. A pulsed laser rangefinder based on these principles is developed with the advantages of high accuracy and simple structure. When the laser exit pupil average power is 1 mW and the signal-to-noise ratio is 10, tests show that the non-cooperative target range is 300 m and the range accuracy is $\pm(2 \text{ mm} + 2 \times 10^{-6} D)$.

Key words measurement; laser ranging; laser pulse; cyclostationary random sequence; phase-shift estimation

OCIS codes 120.6085; 140.3538; 140.3518; 120.1880

1 引 言

脉冲激光具有持续时间短、能量集中和瞬时功率大等特点, 其在激光测距方面具有测程长、目标捕获能力强和适合运动目标的识别等优势, 在工业测量、机器人导航、3D 测量等^[1-2]无合作目标测距中得到了广泛应用。

脉冲激光测距仪精度的提高会受到脉冲定时误

差的制约, 定时误差不仅与叠加在信号上的噪声导致的时间抖动有关, 还与由回波脉冲光电流幅值变化导致的时间游动效应有关, 即激光脉冲经目标漫反射返回到探测器, 回波光强与目标表面反射率、形状、粗糙度及距离等^[3]有关, 使得探测光电流脉冲幅值发生变化, 从而产生时间游走效应。也就是说, 不同幅度(或上升时间)的脉冲经过时检电路之后会在输出时间上产生差异, 这一效应随激光脉冲宽度增

收稿日期: 2019-08-15; 修回日期: 2019-09-05; 录用日期: 2019-09-26

* E-mail: huangminshuang@bipt.edu.cn

加或接收通道带宽的降低而恶化。因此,高精度脉冲激光测距应在消除时间抖动和克服时间游动效应上找到突破口。

研究人员在早期脉冲激光测距仪的研究中,借助了核电子学中的时间分析方法,即采用脉冲前沿定时甄别器。最简单的方法是用高速电压比较器,将脉冲前沿与固定阈值电压相比较产生定时信号,该方法具有宽动态范围和高速的特点,但存在时间游走效应,最大定时误差可达一个脉冲宽度。例如,采用 5 ns 脉宽激光二极管(LD)时,最大距离误差可达 0.75 m。采用浮动阈值的方法可以消除时间游走效应,即将阈值电压设定为与脉冲峰值电压成比例(通常选择在前沿 10%~90%的线性区间内),从而较准确地提取输入信号的时间信息。过零时刻甄别^[4]也是消除时间游走效应的一种有效方法,其原理是对输入信号进行微分或积分等处理,将单极性脉冲转换为双极性脉冲信号,然后通过双阈过零甄别器^[5]产生定时信号。上述两种方案仅适用于测程较短的场合,因为测距脉冲与核脉冲不同,幅值变化范围非常大(1:100000),会导致电路结构复杂,从而限制了测程的提升。

消除时间游走效应的另一个思路是采用补偿方法,即通过测量脉冲峰值^[6]、脉冲上升时间^[7]或脉冲宽度^[8]等脉冲参数,对几何走离误差进行补偿,其单发脉冲测距精度可达几十厘米。由于在补偿量的计算中假设脉冲前沿是线性的,存在较大的残余游走误差,因此其精度只能达到厘米量级。另外,还需要测量出精确的脉冲参数,导致电路结构复杂。

时间抖动具有随机性,通过多脉冲测量后进行平均处理,可以减小或消除这一误差。本研究组最近提出了共振多脉冲探测方法^[9],即先将回波脉冲光电流进行窄带放大预处理,从频域上滤除噪声,然后再进行数字相关处理,进一步提高信噪比,在 1500 m 的测程范围内,获得了测距精度为 $\pm(10 \text{ mm} + 10 \times 10^{-6} D)$ 的结果。其中,测距精度中的前一项是由仪器确定的固定误差,后一项表示与距离成比例的误差系数, D 为测量距离(单位为 km)。但是,激光脉冲在发射、传输和探测过程中,均存在未知的、时变的噪声干扰,这些噪声会叠加在信号上,仅采用多脉冲平均处理无法将其消除。

为此,本文在共振多脉冲探测方法的基础上,将回波脉冲光电流定时信号映射在周期基准信号上,通过发射多脉冲构建一个循环平稳的随机序列,然后利用参数估计的方法获得准确的目标距离。

2 基本原理

2.1 理论模型

为了理解构造循环平稳随机序列的技术原理,以将定时信号映射到正弦基准信号上为例进行说明。如图 1 所示,设正弦基准信号为 $x(t) = x_0 \times \exp(j2\pi f_0 t)$,其中 x_0 为幅值, f_0 为频率, t 为时间,假设在一个周期 $T_0 = 1/f_0$ 内等间隔地发射 N 个脉冲,即以时间间隔 $T_s = 1/(Nf_0)$ 发射激光脉冲,则在接收端由定时甄别器产生时间间隔为 T_s 的定时脉冲序列,采样器输出的信号可表示为

$$x_s(k) = x_0 \exp[j(2\pi f_0 k T_s + \varphi)], \quad k = 0, 1, 2, 3, \dots, N - 1, \quad (1)$$

式中: φ 为对应于发射时刻为正弦基准的 0 点(初相位为 0)的相移。测出相移 φ ,就可以计算出脉冲飞行时间,从而获得目标距离,这样就将对脉冲定时时间的测量转化为对正弦波的参数估计。

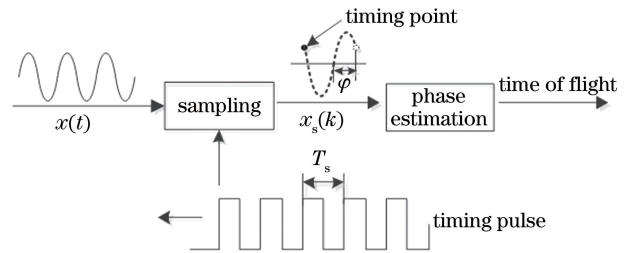


图 1 定时信号在正弦基准信号上的映射
Fig. 1 Mapping of timing signal for sinusoidal reference signal

在采样时刻 $t_k = kT_s$,采样 $x(t)$ 可以看作是一个狄拉克 δ 脉冲的调制过程,采样信号 $x_s(k)$ 可以表示为

$$x_s(k) = \sum_{k=0}^{N-1} x(t) \delta(t - t_k). \quad (2)$$

定时误差会严重污染采样信号 $x_s(k)$,设定定时误差为 Δt_k ,则 $t_k = kT_s + \Delta t_k$, (1)式变为

$$x_s(k) = u(k) \exp[j(2\pi f_0 k T_s + \varphi)], \quad (3)$$

式中: $u(k) = x_0 \exp(j2\pi f_0 \Delta t_k)$ 为复信号的幅值,说明定时误差 Δt_k 可用正弦信号幅值 $u(k)$ 的误差来表征。假设 Δt_k 相对于正弦波周期 $1/f_0$ 非常小,即 $\Delta t_k < T_s \ll 1/f_0$,将函数 $u(k)$ 作泰勒展开,并忽略高阶项,则构造出的测量数据序列模型可表示为

$$x_s(k) \approx x_0 \cos(2\pi f_0 t_k + \varphi) + n(k), \quad (4)$$

式中: $n(k) = 2\pi x_0 f_0 \Delta t_k \cos(2\pi f_0 t_k + \varphi)$ 。 $n(k)$ 可视为零均值随机噪声,统计平均值 $m_x(t) = E[x(t)] = x_0 \cos(2\pi f_0 t + \varphi)$,很显然,均值是时间

的周期函数,说明该信号是频率为 f_0 的循环平稳随机序列。虽然不能直接使用时间平均来估计该循环平稳信号的均值,但可用样本平均来估计均值,因为以上述 T_s 为周期进行采样,采样值满足遍历性。

2.2 相位估计

(4)式的数据模型是含噪声的正弦波,也就是说测量数据 $x_s(k)$ 中包含了误差成分,因此可以采用正弦信号参数估计方法来精确地估计相移 φ 。为此,国内外研究人员提出离散傅里叶变换法、最大似然估计法、Rife-Jane 插值法、Quinn 插值法等方法。本文采用最大似然估计法,因为被采样信号 $x_s(k)$ 是被噪声污染了的信号,信噪比只有 10,而最大似然估计法的估计误差的方差可达到 Cramer-Rao 的下限,是最优的估计。

在(4)式中,误差 $n(k)$ 不仅包含了回波脉冲的定时误差,还包含了叠加在正弦基准信号上的其他噪声,也就是说,脉冲激光发射时间抖动、脉冲光在大气中传播和经过目标散射后产生的光学噪声以及电路噪声等都对误差 $n(k)$ 有贡献。上述噪声服从统计规律,不妨假设 $n(k)$ 是均值为 0、方差为 σ^2 的高斯白噪声序列,因此对于给定参数 α 的样本向量 \mathbf{X} 的联合概率密度分布为

$$f(\mathbf{X}, \alpha) = \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \right)^N \exp \left\{ -\frac{1}{2\sigma^2} \sum_{n=0}^{N-1} [x_s(k) - x(k)]^2 \right\}, \quad (5)$$

式中:向量 $\alpha = [x_0 \ f_0 \ \varphi]^T$; 样本向量 $\mathbf{X} = [x_s(0) \ x_s(1) \ x_s(2) \ \dots \ x_s(N-1)]^T$ 。当 N 较大时,在向量 α 未知的情况下, Fisher information 矩阵 \mathbf{J} 近似表示为

$$\mathbf{J} \approx \frac{1}{2\sigma^2} \begin{bmatrix} (x_0 T_s)^2 \frac{N(N-1)(2N-1)}{6} & 0 & x_0 T_s \frac{N(N-1)}{2} \\ 0 & N & 0 \\ x_0^2 T_s \frac{N(N-1)}{2} & 0 & x_0^2 N \end{bmatrix}, \quad (6)$$

其中,参数估计的方差下限 $\text{Var}(\hat{a}_i) \geq J^{ij}$, 这里 J^{ij} 为 Fisher information 矩阵 \mathbf{J} 的逆矩阵的第 i 个主对角线元素。可推出相位 θ_0 的估计方差下限为

$$\text{Var}(\hat{\theta}_0) \geq \begin{cases} \frac{2\sigma^2}{A_0^2 N}, & \text{frequency is known} \\ \frac{4\sigma^2(2N-1)}{A_0^2 N(N+1)}, & \text{frequency is unknown} \end{cases}, \quad (7)$$

式中: A_0 为幅值估计值; $\hat{\theta}_0$ 为相位估计值。

在测距仪设计中,正弦基准信号通常由温度补偿晶体振荡器(TCXO)产生。现有 TCXO 产品的频率一般为十几兆赫兹,频率稳定度为 $\pm 0.1 \times 10^{-6} \sim \pm 5 \times 10^{-6}$,因此频率波动对测距精度的影响可以忽略,可视频率为已知。由(6)式容易得到 φ 的估计精度,进而求出测距精度:

$$\text{Var}(\hat{d}) = \frac{C \cdot \text{Var}(\hat{\varphi})}{4\pi f_0} \geq \frac{C}{2\pi f_0 N \cdot R_{SN}^2}, \quad (8)$$

式中: \hat{d} 为距离估计值; R_{SN} 为信噪比, $R_{SN} = \frac{A_0^2}{\sigma^2}$; C 为光速。由(8)式可以看出测距精度与信噪比的平方成反比,与一个周期内的采样点数成反比,如图 2 所示。在信噪比 $R_{SN} = 10$ 时,若取 $N = 100$,正弦基

准频率 $f_0 = 15$ MHz,则可计算出测距精度为 0.318 mm。

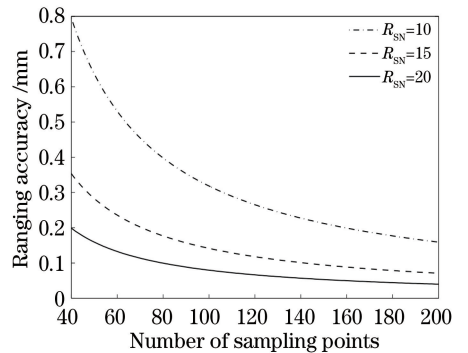


图 2 测距精度随信噪比和采样点数的变化

Fig. 2 Ranging accuracy as a function of signal-to-noise ratio and number of sampling points

2.3 解模糊方法

由于正弦基准为周期函数,因此相移 φ 的整周期数不能由相位估计得到。相位估计得到的是不足一个周期的部分,例如当正弦基准频率为 15 MHz 时,不模糊距离为 10 m。相移 φ 的整周期数的不确定性限制测距仪在许多领域的应用,为此这里提出利用计数法来测量整周期数。如图 3 所示,设高频时钟周期为 T_0 ,脉冲在正弦基准信号的上升沿过零时刻 t_{star} 发射并触发计数器,过零点触发计数器计

数加 1,直到脉冲返回时刻 t_{stop} 为止,这个计数值 n 即为正弦基准信号的整周期数,其中周期 $T_0 = 1/f_0$ 。

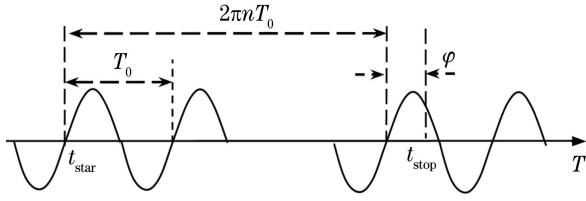


图 3 计数法的解模糊原理

Fig. 3 Principle of defuzzification using counting method

3 实现方法

采用上述 T_s 采样时,若取 $N = 100$,正弦基准频率 $f_0 = 15$ MHz,则可计算出采样时间间隔为 $T_s = 0.67$ ns,这就要求模/数转换器的转换速率大于 1.5 GHz,导致硬件成本大幅增加。脉冲发射时间间隔由测程和半导体激光二极管(LD)的脉冲发射重复频率决定,现有 LD 最高脉冲重复频率约为 100 kHz,显然不能满足均匀采样的要求。特别是由于激光脉冲发射间隔远大于正弦基准信号周期(因而也远大于 T_s),因此在电路中难以通过现有的欠采样技术来实现。为此,本文提出了一种遍历欠采样的新方法,其原理如下。

对于周期为 T_1 的信号(取 $T_1 = \frac{M}{M+1}T_0$, M 为整数),设置采样时间间隔为 T_1 的整数倍(LT_1),即欠采样,则有

$$LT_1 = \frac{M}{M+1}LT_0. \quad (9)$$

(9)式右边表示采样时间间隔对应于 $\frac{M}{M+1}L$ 个 T_0 周期,可以用整数 m_c 和小数 Δm_c 来表征,即

$$\frac{M}{M+1}L = m_c + \Delta m_c. \quad (10)$$

通过选取 L 、 M 值,使 $\Delta m_c \times 100$ 为一个 2 位素数,则通过连续采样 100 个值,就可以构造出等效、等间隔的一个完整周期的正弦基准信号(间隔为 $T_s = \frac{1}{100}T_0$)。例如,设 $M = 99$, $L = 771$,则 $\Delta m_c \times 100 = 29$,用序数 $0, 1, 2, 3, \dots, 99$ 遍乘 29,取乘积的后两位数 p ,其结果如表 1 所示。

由表 1 可以看出,乘积的后两位数 p 包含了整数 $0, 1, 2, 3, \dots, 99$,且为一一对应关系,说明采样数据具有遍历性,因此将这种方法称为遍历欠采样法。但 p 是跳跃的,不是顺序连续的,因此通过对测量数据序列进行重新排序,就可以得到等效的等间隔数据序列。

表 1 采样序数与等效采样间隔的转换关系

Table 1 Conversion relationship between sampling serial number and equivalent sampling interval

Serial number	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
p value	0	29	58	87	16	45	74	3	32	61	90	19	48	77	6	35
Serial number	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
p value	64	93	22	51	80	9	38	67	96	25	54	83	12	41	70	99
Serial number	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47
p value	28	57	86	15	44	73	2	31	60	89	18	47	76	5	34	63
Serial number	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63
p value	92	21	50	79	8	37	66	95	24	53	82	11	40	69	98	27
Serial number	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79
p value	56	85	14	43	72	1	30	59	88	17	46	75	4	33	62	91
Serial number	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95
p value	20	49	78	7	36	65	94	23	52	81	10	39	68	97	26	55
Serial number	96	97	98	99												
p value	84	13	42	71												

4 实验系统及结果

4.1 测距系统

激光测距系统框图如图 4 所示。测量系统主要由脉冲激光发射部分、接收通道、时刻鉴别部分、数据采集处理部分以及控制部分组成。晶振选用温度

补偿晶体振荡器,其频率为 15 MHz,频率稳定度为 $\pm 0.1 \times 10^{-6}$ ($-30 \sim +85$ °C);半导体激光二极管的波长为 870 nm,峰值功率为 10 W,脉宽为 5~10 ns,最高脉冲发射重复频率大于 100 kHz;光电探测器 APD 的中心波长为 800 nm,响应度为 50 A/W;模数转换器为 12 位,最大转换速率 5 MSa/s,采样和保持

延时时间分散性为 0.6 ps。采样时刻点的准确性由 AD 采样和保持延时时间分散性这一参数决定,在本系统中,1 mm 距离对应的时间为 6.7 ps,因此 AD 采样环节产生的定时误差可以忽略。晶振输出信号中的一路经过滤波器产生正弦基准信号,另一路经过锁

相环输出频率为 $f_1 = 1/T_1$ 的脉冲波,经过分频后控制脉冲激光发射,脉冲激光经目标漫反射后,经过接收通道和时刻甄别器,产生定时信号,以此定时信号触发采样器 ADC 采集正弦量化时钟信号,最后根据相位估计值和计数值计算出目标距离。

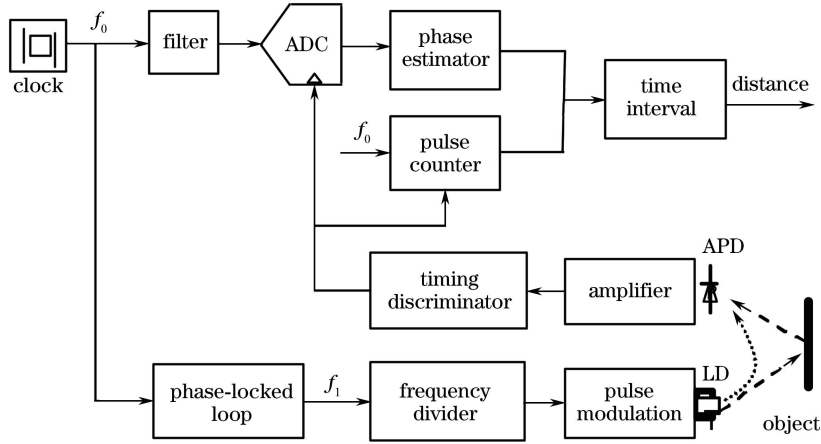


图 4 利用循环平稳随机序列的激光测距系统

Fig. 4 Laser ranging system using cyclostationary random sequences

4.2 循环平稳随机序列构建的实验验证

为了验证循环平稳随机序列构建方案的可行性,实验中取脉冲发射频率为 8.5 kHz,对连续发射的 2500 个脉冲进行测量,然后取平均,相当于每点采样 25 次后取平均,并对采集到的随机序列值进行重新排序,得到等效顺序时间序列,如图 5 所示,此随机过程的周期为 67 ns,即正弦基准信号周期。频谱主要是频率为 15 MHz 的成分,从而可以判定图 5 所示的时间序列为一阶循环平稳;通过对图 5 所示的序列进行二次变换,同样可以

判定其为二阶循环平稳,验证了上述循环平稳随机序列构建理论和实现方法的可行性。经过频谱分析发现在信号上叠加了时变的、未知的系统误差,如果采用传统的对多脉冲测量结果取平均的方法进行处理,则这一误差成分将直接导致测距产生误差,其中的部分周期误差可以通过误差补偿来消除^[10]。而本文可以利用循环平稳随机方法并通过参数估计来消除这一误差的影响,预期将在不进行周期误差补偿的情况下获得比传统方法更高的测距精度。

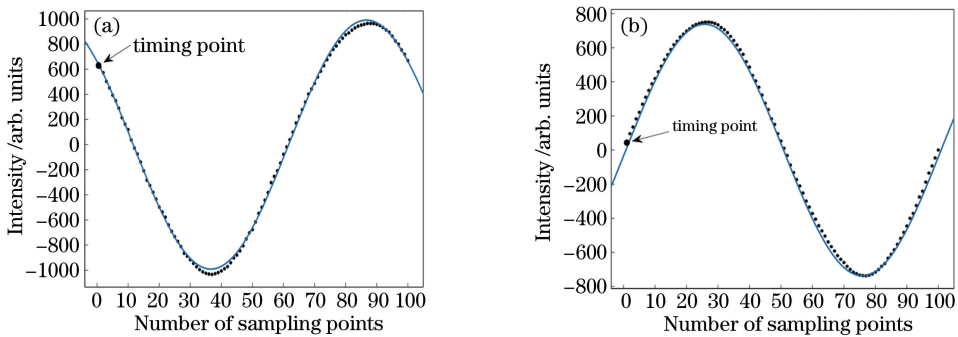


图 5 采集到的等效顺序时间序列波形。(a)测量距离为 8.75 m;(b)测量距离为 14.50 m

Fig. 5 Acquired waveforms of equivalent sequential timing sequences. (a) Measuring distance is 8.75 m;

(b) measuring distance is 14.50 m

4.3 目标距离测量实验

在测距系统中设置内光路,以消除电路温漂对测距精度的影响,按照内-外-外-内光路循序测量 4 组参数,计算出距离值,测距仪中采用 32 位 ARM

单片机加 FPGA(Field Programmable Gate Array)芯片来实现测距过程的控制、采样、数据处理及实时距离显示等功能。在软件中采用中断采样方式的前后台程序结构,以同时进行数据采样和数据处理,减

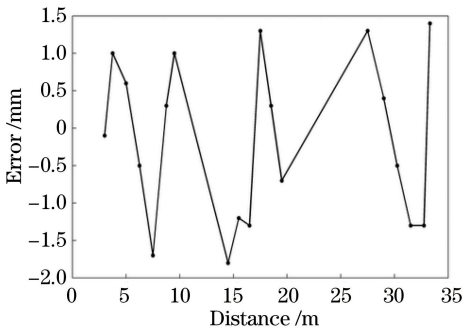


图6 在1.5~35 m内的距离误差测量曲线

Fig. 6 Measured curve of distance error within 1.5~35 m

少单次测量时间。在对较远目标进行测量时,大气折射率将导致测量精度恶化。影响大气折射率的因素有很多,考虑到天气因素和操作的便利性,本系统通过温度和气压值来修正因大气折射率变化而造成的测距误差。

将研制的测距系统装配在全站仪产品上,在某仪器公司的测距仪基线上进行了测距精度的测量实验,在1.5~35 m内设置了多个距离目标,并用高精度测距仪进行了校准。图6为距离误差测量曲线,可以看出距离误差在 ± 2 mm内。在室外对测距仪进行了测量验证实验,以白色柯达灰度表面(漫反射表面)为目标(非合作靶标),天气条件为低强度阳光,没有热闪烁,在300 m范围内设置多个距离目标,用精度为 $\pm(1 \text{ mm} + 2 \times 10^{-6} D)$ 的相位法棱镜测距仪进行对比测试实验,经过测试,在无合作目标下测量距离可达300 m,测距精度为 $\pm(2 \text{ mm} + 2 \times 10^{-6} D)$,单次测距时间为1.3 s,这个结果优于本课题组之前在文献[11]中给出的测距实验结果 $\pm(3 \text{ mm} + 2 \times 10^{-6} D)$ 。这说明利用循环平稳随机方法来提高测距精度的方案是可行的。需要说明的是,上述理论计算出的测距精度为0.318 mm,而本系统的测距精度仅为 ± 2 mm,说明系统中还存在均值不为0的系统误差。在后续的工作中,如何进一步减小系统误差,提高系统的性能,是研究重点之一。

5 结 论

本课题组提出的利用循环平稳随机序列的脉冲激光测距方法,不仅可以消除时间抖动产生的随机误差,还可以克服测距仪中部分时变的、未知的系统误差,并且在本系统中不需要周期误差补偿就可以实现高精度测距。此外,对研制的测距仪进行了测试,在300 m的测程内,测距精度为 $\pm(2 \text{ mm} + 2 \times$

$10^{-6} D)$,这一实验结果较本课题组之前得到的测距精度更优。本课题组提出的遍历欠采样方法可以在采样频率与信号频率相差很大的条件下实现等效的等间隔采样,电路结构简单,容易实现。该测距仪可被应用于大型工程结构(如公路、桥梁)、建筑结构、工业现场等方面的测量。

参 考 文 献

- [1] Luo Y, He Y, Geng L M, et al. Long-distance laser ranging lidar based on photon counting technology [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(5): 0514001.
罗远, 贺岩, 耿立明, 等. 基于光子计数技术的远程测距激光雷达 [J]. 中国激光, 2016, 43(5): 0514001.
- [2] Kostamovaara J, Huikari J, Hallman L, et al. On laser ranging based on high-speed/energy laser diode pulses and single-photon detection techniques [J]. IEEE Photonics Journal, 2015, 7(2): 7800215.
- [3] Huang M S, Long T Y, Liu H H, et al. A high-precision pulsed laser ranging time interval measurement technology based on sine curves method [J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(8): 0808002.
黄民双, 龙腾宇, 刘慧慧, 等. 基于正弦曲线的高精度脉冲激光测距时间间隔测量技术 [J]. 中国激光, 2014, 41(8): 0808002.
- [4] Kurtti S, Kostamovaara J. Laser radar receiver channel with timing detector based on front end unipolar-to-bipolar pulse shaping [J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2009, 44(3): 835-847.
- [5] Nissinen J, Nissinen I, Kostamovaara J. Integrated receiver including both receiver channel and TDC for a pulsed time-of-flight laser rangefinder with cm-level accuracy [J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2009, 44(5): 1486-1497.
- [6] Palojarvi P, Ruotsalainen T, Kostamovaara J. A 250-MHz BiCMOS receiver channel with leading edge timing discriminator for a pulsed time-of-flight laser rangefinder [J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2005, 40(6): 1341-1349.
- [7] Cho H S, Kim C H, Lee S G. A high-sensitivity and low-walk error LADAR receiver for military application [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2014, 61(10): 3007-3015.
- [8] Kurtti S, Kostamovaara J. An integrated laser radar receiver channel utilizing a time-domain walk error compensation scheme [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2011, 60(1):

146-157.

- [9] Huang M S, Ma P, Liu X C. Multi-pulse laser ranging method for pre-detection with high frequency resonance[J]. Acta Physica Sinica, 2018, 67(7): 074202.

黄民双, 马鹏, 刘晓晨. 高频共振预探测多脉冲激光测距方法[J]. 物理学报, 2018, 67(7): 074202.

- [10] Huang M S, Liu X C, Ma P. Periodic error compensation of pulsed time-of-flight laser ranging system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47

(3): 0317004.

黄民双, 刘晓晨, 马鹏. 脉冲飞行时间激光测距系统中周期误差补偿[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(3): 0317004.

- [11] Huang M S, Guan Z H. A fast and high-precision pulse laser ranging method based on cursor principle [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(5): 0510001.

黄民双, 关在辉. 基于游标原理的快速高精度脉冲激光测距方法[J]. 中国激光, 2019, 46(5): 0510001.