硅基光电探测器件及组件

DOI:10.16818/j.issn1001－5868.20241209002

一种基于BiCNN的ToF测距精度补偿方法

亓 林*,高传顺,林珑君,伍明娟,曹 飞,朱 斌,吴海游
(重庆光电技术研究所,重庆 400060)

摘 要: 基于飞行时间法(ToF)的脉冲激光测距技术,凭借其脉冲宽度窄、峰值功率大等特性,已在非合作目标探测领域获得广泛应用。然而,现有基于阈值判别的测距系统仍存在以下技术瓶颈:1)回波光功率波动引起回波信号前后沿产生游走误差;2)波形抖动和时钟漂移引发测量数据异常波动或信号丢失;3)系统时延导致固定测量误差。针对以上问题,提出了一种基于双向卷积神经网络的ToF测距精度补偿方法,该方法首先通过双向长短期记忆网络的多层约束信息实现脉宽异常检测,继而采用一维卷积神经网络进行回归分析以实现自适应精度补偿。在4～110 m量程范围内重复测距实验中,系统测距偏差稳定在0.05～0.33 m区间,相较传统多项式拟合方法,测量精度提升率达72.5%,有效验证了所提方法的工程实用性。

关键词: ToF;深度学习;精度补偿;激光测距
中图分类号: TN247;TP391.4 **文章编号:** 1001－5868(2025)01－0016－07

A ToF Ranging Accuracy Compensation Method Based on BiCNN

QI Lin, GAO Chuanshun, LIN Longjun, WU Mingjuan, CAO Fei, ZHU Bin, WU Haiyou
(Chongqing Optoelectronics Research Institute, Chongqing 400060, CHN)

Abstract: Pulse laser ranging technology based on time of flight (ToF) is widely used to detect non-cooperative targets due to its narrow pulse width and high peak power. In a conventional ranging system based on threshold discrimination, the measurement accuracy is limited by the range walk error of the echo signal, waveform jitter, clock drift, and system delay, resulting in power fluctuation of the echo signal, measurement data exception and error. To solve these problems, in this study, a ranging accuracy compensation based on ToF is proposed using a bi-directional convolutional neural network. The method enables anomaly detection for the pulse width with the bi-directional long short-term memory network using multi-layer constraint information, and adaptive accuracy compensation through one dimensional convolutional neural network regression analysis. In the experimental demonstration, the ranging error is 0.05～0.33 m for a measurement range of 4～110 m. Compared to the polynomial fitting method, the measurement accuracy is improved by 72.5%, which verifies the effectiveness of the proposed method.

Key words: ToF; deep learning; precision compensation; laser ranging

0 引言

激光测距[1]有三角法[2]、干涉法[3]和飞行时间法(ToF)[4]三种方式,其中ToF因辅助设备少、无工作时段限制被广泛应用在航空、航天等军事领域。ToF可分为相位测距[5]和脉冲测距[6]两种方法。脉

收稿日期:2024－12－09.
基金项目:微弱激光非合作目标探测识别算法研究项目(K－QNKXJ2024004).
*通信作者:亓 林

冲激光测距技术因其脉冲宽度窄、峰值功率大等特点被广泛应用于非合作目标探测领域，其基本原理是采用峰值功率高的极窄脉冲对空间中的非合作目标进行照射，采集目标反射或散射的信号回波与发射信号之间的时间差，利用飞行时间计算目标的距离。

ToF 测距误差主要分为计时误差、时间抖动和游走误差。Gammoh 等[7]根据延迟锁定环（DLL）的循环动力学原理，使用 DLL 来线性化 SPI-TDC，以减小计时误差，同时降低硬件和功耗开销。Koskin 等[8]采用离散时间模型进行稳态分析，将全数字锁相环驱动自采样模型后进行线性近似，以补偿时间抖动误差。随着深度学习技术的发展，美国罗德岛大学的 Yao 等[9]基于卷积神经网络（CNN）开发出一种移动平均校正的测距补偿方法。Fang 等[10]将 Kalman 滤波与强化学习相结合，建立在线智能校正模型，以提升测量稳定性。

在实际应用过程中，传统基于阈值判别的测距系统仍存在一些问题。首先，回波光功率变化引起回波信号前后沿游走误差；其次，受波形抖动和时钟漂移误差影响，测量数据产生异常波动或信号丢失；此外，系统延时可能导致固定的测量误差。目前解决因回波光强变化引起的回波信号前后沿游走误差的方法有恒比定时[11]、双阈值[12]、全采样[13]等方式。其中，恒比定时法的实现电路较复杂，且受脉宽波动的影响大；双阈值补偿中高低阈值的自适应是其主要技术难点；全采样可对波形信息进行全面处理，但高速 ADC 采样电路复杂且成本较高，该方法通常适用于高精度远距目标探测。其次，在测距过程中，受波形抖动和时钟漂移误差的影响，测量数据可能出现奇异值或无数据输出现象，目前工程上大多采用多种阈值检测的方式提出异常值，但阈值的设定不灵活，难以适应多种测距模式。

为解决以上问题，提出了一种基于双向卷积神经网络（Bidirectional Convolutional Neural Network，BiCNN）的测距精度补偿方法，该方法采用基于双向长短时记忆神经网络（Bi-directional Long Short Term Memory Network，Bi-LSTM）的多层约束信息脉宽异常检测器剔除并修正异常数据，采用基于一维卷积神经网络（One Dimensional Convolutional Neural Network，1D-CNN）的脉宽补偿方法抑制回波前沿游走误差，实现自适应精度补偿功能，提高测距精度。

1　脉冲激光测距基本原理及误差分析

1.1　系统组成及基本原理

基于脉冲激光测距系统的组成框图如图 1 所示。

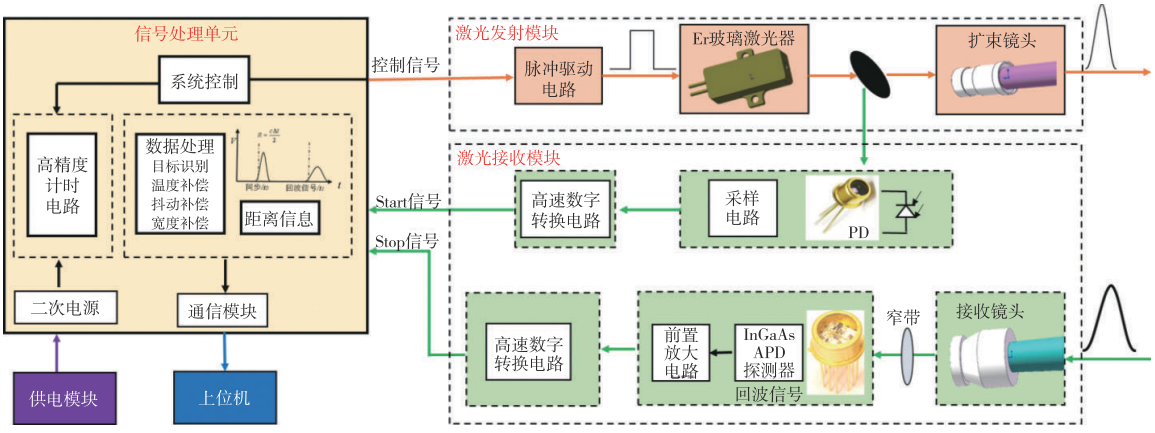


图 1　ToF 脉冲激光测距系统示意图

脉冲激光测距系统主要包括激光发射模块、激光接收模块、信号处理单元、供电模块和上位机五部分。工作时，Er 玻璃激光脉冲信号（1535 nm）一部分进入 PD 探测器转化为模拟电信号，经过高速数字转换电路转换成数字信号 Start；另一部分经扩束后打到非合作目标上，信号经过接收镜头汇聚到 APD 探测器转化为模拟电信号，然后经过高速数字转换电路转换成数字信号 Stop。两路数字信号通过高精度计时电路测量时间间隔和脉冲宽度，输送至 FPGA 进行数据补偿和校正，通过通信模块输出距离计算结果至上位机。

脉冲激光测距的基本原理为通过向非合作目

标发射一系列窄脉冲，测量光脉冲从发射到返回接收模块的时间差，利用ToF[14]计算目标距离：

$$R = c\triangle t/2 \tag{1}$$

式中，光速 $c=3\times10^8$ m/s；$\triangle t$ 为光往返一次所需时间，即脉冲激光飞行时间；R 为目标距离。

1.2 测距误差分析

影响测距精度的因素包括随机游走误差和系统误差。随机游走误差一般服从高斯分布，包含时间间隔测量误差、波形异常误差、比较器上升沿抖动、时刻鉴别抖动等误差。其中，时间间隔测量主要依靠同步计数器来实现，目前计时芯片的精度可达到10 ps，引入的距离误差为1.5 mm，在远距离测量中可忽略不计；波形异常误差受不规则目标、脉冲峰值抖动、外部干扰等因素影响，无法进行准确校正；比较器上升沿抖动受电源纹波、阻抗不匹配等因素影响，可通过LVPECL和LVTTL电路实现20 ps的精度，引入的距离误差为3 mm，可忽略不计；时刻鉴别误差受噪声叠加影响，可产生纳秒级别的误差，恒比定时法能一定程度抑制由激光脉冲回波幅度起伏而引起的定时误差，但恒比定时法对于脉冲脉宽的变化敏感，且其实现电路极其复杂。

系统误差包含硬件固定延时误差、时钟漂移误差、回波光功率漂移误差等。固定延时是一个固定偏差，不随目标距离远近变化，通常采用定标方法消除；时钟漂移误差的来源为计时芯片受温度和供电变化产生的误差，通常通过温度补偿和高精度供电系统来减小该误差；而回波光功率变化会引起光电探测器的脉冲前沿和后沿朝着不同方向展宽，从而产生游走误差，该游走误差是限制脉冲激光测距近距离探测精度性能的主要因素。

为研究回波光功率对探测精度性能的影响，需寻找回波特征参量。根据雷达方程[15]：

$$P_r = 4P_t\frac{A_rA_t}{\pi^2R^4\theta^2}\tau_r\tau_t\rho\tau_u^2 \tag{2}$$

式中，P_t 表示发射功率，A_r 为接收机有效接收孔径面积，A_t 为目标有效面积，τ_r 为接收光学系统透过率，τ_t 为发射光学系统透过率，ρ 为目标反射率，τ_u 为单向传输路径透过率，θ 为发射束散角。

在实际使用过程中，发射和接收信号在时域内以高斯函数进行调制[16]，其计算式为：

$$P_t(t) = V_te^{-t^2/2s_i^2} \tag{3}$$

$$P_r(t) = V_re^{-(t-\Delta t)^2/2s_r^2} \tag{4}$$

式中，V_t 为激光发射脉冲的峰值；s_i^2 为激光发射脉冲的波形方差；V_r 为激光接收脉冲峰值；$s_r^2=s_i^2+s_o^2$，表示激光接收脉冲的波形方差，即发射波形和后向散射脉冲方差的平方和；Δt 为脉冲激光飞行时间。

接收脉冲波形的峰值可表示为：

$$V_r = V_t\cdot\frac{\tau_r\tau_t\pi\rho\tau_u^2A_rA_t}{4R^2}\cdot\frac{s_i}{s_r} \tag{5}$$

由公式(5)可知，激光接收脉冲峰值与激光发射峰值功率、大气参数、目标反射特性以及目标距离直接相关，在应用中可将接收脉冲峰值作为回波功率的直接体现。在本研究固定阈值的测距系统中，激光脉冲宽度定义为超过阈值电压 V_{th} 的回波脉冲波形前后沿两点在时间轴上的差值，表达式为：

$$BW(i) = 2\sqrt{-2s_r^2\ln\left(\frac{V_{th}}{V_r(i)}\right)} \tag{6}$$

式中，$BW(i)$ 为激光接收脉冲的宽度，V_{th} 为高速比较器设定的电压阈值，s_r^2 为激光接收波形的方差，$V_r(i)$ 为接收回波的脉冲峰值。因此，激光接收波形的脉冲宽度可直接体现回波功率。

从光电探测器的机理分析，在非合作目标由外及内进入探测视场的过程中，固定位置处的目标会使光电探测器芯片产生光生载流子。随着目标的接近，这些光生载流子数量逐渐增加，进而出现溢出和泄放现象。这一过程对应前放电路的线性放大区、临近饱和、浅饱和以及深度饱和四个状态，如图2所示。波形1和波形2为光电探测器线性放大区，该过程中波形幅值增大，脉宽展宽较少，前后沿略有行走趋势；波形2和波形3为光电探测器浅饱和状态，该过程中波形幅值不变，前沿展宽较少，后沿随着光功率游走趋势明显；波形3和波形4为光电探测器进入深度饱和状态，该过程中波形幅值不变，前沿前向移动较大，后沿游走相对减小。该变化导致鉴别时刻的游走漂移误差。

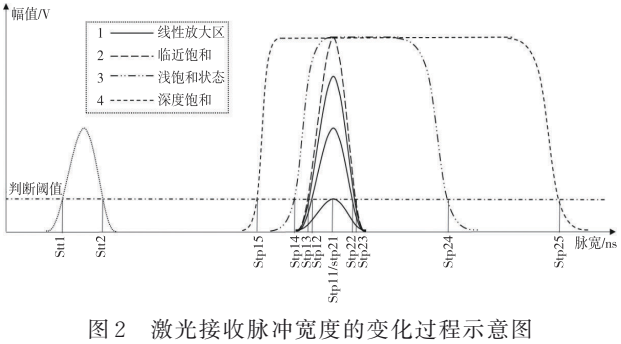


图2 激光接收脉冲宽度的变化过程示意图

2　测距精度补偿方案

本文所提出的测距精度补偿方案主要由异常数据检测与修正、脉宽补偿、精度校正三部分组成。

2.1　异常数据检测与修正

在测距场景下，受波形抖动和时钟漂移误差的影响，测量数据会产生异常波动或无数据输出。针对这一问题，设计了基于Bi-LSTM深度学习网络的多层约束信息脉宽异常检测器，该检测器能够结合光电传感器的原始数据层和特征层信息，对测距机获取的回波信号脉宽和相对前移量进行更加精确的异常值修正。多层约束信息脉宽异常检测的Bi-LSTM网络结构[17]如图3所示。

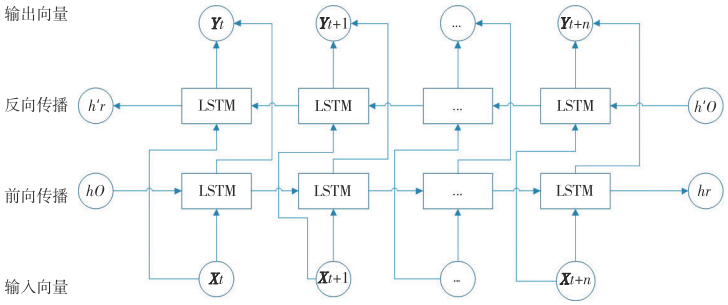


图3　多层约束信息脉宽异常检测的Bi-LSTM网络结构

当Bi-LSTM网络正向传播时，更新参数定义如公式(7)～(9)所示：

$$\begin{cases} f_k=\sigma\cdot(W_f\cdot[\boldsymbol{h}_{k-1},\boldsymbol{X}_k]+b_f) \\ i_k=\sigma\cdot(W_i\cdot[\boldsymbol{h}_{k-1},\boldsymbol{X}_k]+b_i) \\ \tilde{C}_k=\tanh\cdot(W_C\cdot[\boldsymbol{h}_{k-1},\boldsymbol{X}_k]+b_C) \\ o_k=\sigma\cdot(W_o\cdot[\boldsymbol{h}_{k-1},\boldsymbol{X}_k]+b_o) \\ h_k=o_k\cdot\tanh(C_k) \end{cases} \tag{7}$$

$$\sigma(x)=\frac{1}{1+e^{-x}} \tag{8}$$

$$\tanh(x)=\frac{1-e^{-2x}}{1+e^{-2x}} \tag{9}$$

式中，i_k,f_k和o_k分别表示输入、遗忘和输出单元，$\boldsymbol{X}_k$表示Bi-LSTM在时间戳k的输入向量，$\boldsymbol{h}_k$为隐藏状态向量，o_k被视为该时刻Bi-LSTM模型的输出，σ表示sigmoid激活函数，tanh表示tanh激活函数，$\boldsymbol{C}_k$表示候选向量，与输出向量结合作为时间戳k的记忆状态。

当反向传播时，采用均方误差函数作为损失函数，表达式为：

$$Loss=\frac{1}{n}\sum(x_i-y_i)^2 \tag{10}$$

式中，$Loss$表示MSE损失函数，n表示样本数量，x_i表示第i个样本的真实值，y_i表示模型对第i个样本的预测值。

具体的Bi-LSTM网络输入向量$\boldsymbol{X}_k$被建模为以下原始数据和特征参量：

(1)PD光电传感器的Start1，Start2和参考回波脉宽值BW_{PD}：

$$BW_{PD}=stt_2-stt_1 \tag{11}$$

(2)APD光电传感器的Stop1，Stop2和信号回波脉宽值BW_{APDi}：

$$BW_{APDi}=stp_{2i}-stp_{1i} \tag{12}$$

(3)APD光电传感器前沿位置变化量tt_{APDi}：

$$tt_{APDi}=stp_{1i}-\min\sum_{1}^{n}stp_{1i} \tag{13}$$

(4)APD光电传感器输出的脉宽方差${BW_{APD}}^2$：

$${BW_{APD}}^2=\sum_{j=1}^{n}[(BW_{APD}(j)-\overline{BW_{APD}(j)})^2]/(n-1) \tag{14}$$

(5)APD光电传感器前沿位置变化量方差：

$${tt_{APD}}^2=\sum_{i=1}^{n}[(tt_{APDi}-\overline{tt_{APDi}})^2]/(n-1) \tag{15}$$

(6)APD光电传感器输出的直接距离值：

$$R_{APDi}=(stp_{1i}-stt_{1i})\times 1000/150 \tag{16}$$

(7)APD光电传感器输出直接距离值的四分位距：

$$IQR_{R_{APD}}=Q_3^{R_{APD}}-Q_1^{R_{APD}} \tag{17}$$

在训练阶段，Bi-LSTM的输入向量被建模为两个光电传感器中提取特征值的组合：输出向量通过softmax分类成两个结果，使用1和0表示。其中0代表无异常，1代表有异常，有异常的值通过对应的$BW_{APD(i)}=(BW_{APD(i-1)}+BW_{APD(i+1)})/2$，$tt_{APD(i)}=(tt_{APD(i-1)}+tt_{APD(i+1)})/2$代替。在预测阶段，建模的向量直接作为输入向量，通过训练好的Bi-LSTM网络来自主预测并输出异常检测结果。

2.2 基于1D-CNN的脉宽补偿方法

在剔除了异常数据后，脉宽与前沿位置变化量的拟合程度决定了测距精度的关键因素。设计了基于1D-CNN的回归分析方法拟合回波信号前沿的偏移量随脉宽变化的趋势。输入向量由TDC采集到的InGaAs APD光电传感器输出波形的特征建模得到，计算前沿位置的移动量作为1D-CNN网络的输出向量。搭建的1D-CNN网络结构[18]如图4所示。

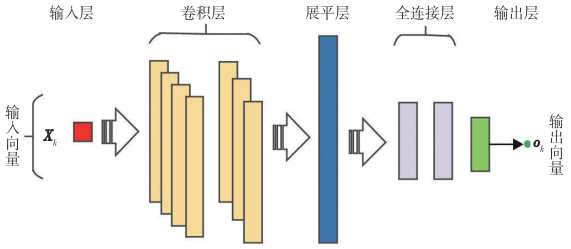


图4 1D-CNN网络结构

1D-CNN网络的输入和输出向量之间的关系式为：

$$O_S = f\left(\sum_{i=1}^{N} x_i \times k_{is} + b_s\right) \tag{18}$$

式中，x_i为输入特征；k_{is}为核权重；b_s为偏置；$f(\cdot)$为激活函数，本节所用激活函数为ReLU函数；O_s为1D-CNN学习得到的输出特征。具体的1D-CNN网络输入向量为信号回波脉宽值BW_{APDi}，$BW_{APDi} = stp_{2i} - stp_{1i}$；输出向量被建模为InGaAs APD光电传感器前沿位置变化量tt_{APDi}，$tt_{APDi} = stp_{1i} - \min\sum_{1}^{n} stp_{1i}$。

2.3 精度校正

由电路系统固定延时引起的测距误差称为系统误差，该误差不随测量距离而变化，通常通过定标的方式进行补偿，本研究采用定标方法进行补偿，补偿公式为：

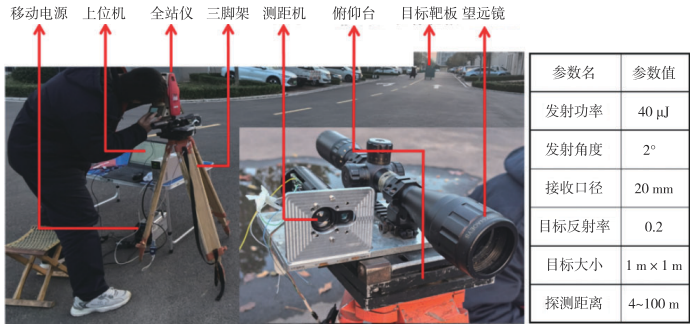
$$R = \gamma \times f(i) + R_Z \tag{19}$$

式中，γ为权重，$f(i)$为实测距离值，R_Z为真值。

3 实验结果

3.1 硬件系统搭建与原始数据获取

原始数据获取系统实物图如图5。测距机与全站仪固定在带有俯仰台的三角支架上，全站仪的测量精度为±2 mm，作为测量真值；测距机的发射视场角为2°，目标靶板反射率$r = 0.2$，直径为1 m。移动电源给测距机供电，测量过程为调整俯仰台使得探测场从空中位置移动至目标靶板，上位机记录初始Start1，Start2，Stop1，Stop2值，待后期信息处理。



参数名	参数值
发射功率	40 μJ
发射角度	2°
接收口径	20 mm
目标反射率	0.2
目标大小	1 m×1 m
探测距离	4~100 m

图5 原始数据获取系统实物图

3.2 异常数据剔除

首先，将获取的不同距离的测试数据分为训练集和测试集，将检测异常值点与真实异常值点的对应比值（检测精度）、检测异常值个数与实际异常值个数的比值（检测率），作为精度指标进行评估，使用阈值方法和所提出方法进行检测，其结果如表1所示。

由表1可知，两种算法对异常个数的检测率指标均为100%；所提出的Bi-LSTM深度学习网络实现了更高的位置检测精度，为91%，与传统阈值方法相比，时间检测精度提高了21%。

表1 异常数据检测准确率

算法名称	位置精度/%	检测率/%
阈值法	75	100
Bi-LSTM	91	100

3.3 脉宽补偿与精度校正

对异常检测修正过的测量数据进回归分析，采用线性拟合、多项式拟合和1D-CNN的方法进行拟

合，其结果如图6所示，补偿RMS结果如图7所示。

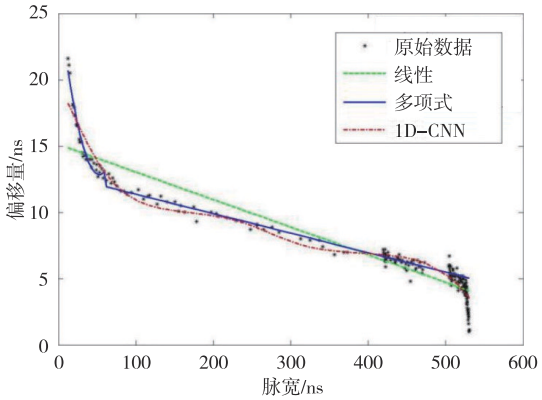


图6　不同脉宽补偿结果拟合曲线

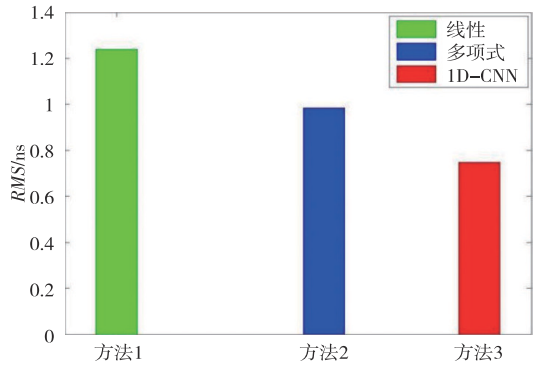


图7　不同脉宽补偿方法的RMS结果

图6为采用线性拟合、多项式拟合、1D-CNN回归分析三种不同方法获得的脉冲前沿前移量与脉宽的拟合曲线，1D-CNN拟合曲线比分段拟合曲线更贴近原始数据的散点趋势。图7显示了不同拟合方法的RMS结果，其中线性拟合RMS为1.24 ns，多项式拟合RMS为0.98 ns，1D-CNN拟合RMS为0.74 ns，比线性拟合精度高40.3%，比多项式拟合精度高24.5%，具有更好的补偿效果。

为验证脉宽补偿和精度修正方法对测距精度提升的效果，随机选择50.57 m的测量点，对采集的原始数据按照第2节的方法进行处理，处理结果如表2所示。

从表2可知，在50.57 m的真值距离下，原始数据计算的距离最大误差为4.22 m；采用1D-CNN脉宽补偿方法后，精度提升了55.01%，采用精度修正后进一步提升了一个数量级，最终测距精度在0.05 m。

表2　50.57 m真值下精度修正结果

参数值	原始数据	脉宽补偿(1D−CNN)	精度修正
误差最大值/m	4.22	3.07	0.38
误差最小值/m	3.68	0.15	0.00
均值/m	3.89	1.75	0.05
标准差/m	0.097	1.183	0.065

为验证不同距离下的测距精度，在4～110 m动态范围内随机采集不同回波能量下的测距数据，采用文献[19]的方法和所提出的BiCNN方法进行对比，其结果如表3所示。

表3　测距能力范围内精度测试结果

真值/m	分段拟合[19]		BiCNN	
	平均值/m	差值/m	平均值/m	差值/m
4.75	5.8	1.05	4.80	0.05
9.77	11.02	1.25	9.83	0.06
19.89	20.69	0.80	20.08	0.19
41.00	39.5	−1.50	41.08	0.08
50.57	51.53	0.96	50.73	0.16
63.03	62.13	−0.90	63.11	0.08
72.39	71.57	−0.82	72.32	−0.07
83.04	83.99	0.95	83.16	0.13
93.33	94.27	0.94	93.66	0.33
100.79	99.96	−0.83	101.08	0.29

由表3可知，采用文献[19]的分段拟合方法的测距精度在0.8～1.5 m，而采用BiCNN方法经过脉宽补偿和精度修正方法后，测距结果偏差在0.05～0.33 m，精度提升率达到72.5%，验证了所提方法的有效性。

4　总结

采用测距硬件平台和智能算法结合的方式获取非合作目标的距离信息，是实现高精度激光测距的有效方法。针对测量数据异常波动或无数据输出和回波光强变化引起的回波信号前后沿游走误差的问题，本文提出了一种基于BiCNN测距精度补偿方法。设计了Bi-LSTM检测器，结合光电传感器的原始数据层和特征层信息对测距机获取的回波信号的脉宽和相对前移量进行更加精确的异常值修正；设计1D-CNN的脉宽补偿方法抑制前沿游走误差；通过在4～110 m量程范围内重复测距实验，测距结果偏差在0.05～0.33 m，相较于多项式拟合方法，精度提升率达72.5%，这验证了所提方法的有效性，为智能测距系统提供理论参考。

参考文献：

[1]　Salmins K, Kaulins J. Characterisation of hybrid photodetector

signals for satellite laser ranging application[J]. Latvian Journal of Physics and Technical Sciences, 2024, 61(4): 58-66.

[2] 赖慧敏, 刘 杰, 刘红海, 等. 激光雷达接收机中时刻鉴别模块的研究和设计[J]. 半导体光电, 2024, 45(2): 303-307.
Lai Huimin, Liu Jie, Liu Honghai, et al. Design of Time Discrimination Module in LiDAR Receiver[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2024, 45(2): 303-307.

[3] 闫语畅, 陈潇洒, 薛蔺洋, 等. 一种扫频干涉激光测距系统设计[J]. 光学学报, 2024, 44(18): 1800011.
Yan Yuchang, Chen Xiaosa, Xue Linyang, et al. Design of Frequency Scanning Interferometry Laser Ranging System[J]. Acta Optica Sinica, 2024, 44(18): 1800011.

[4] Zygmunt M, Jakubaszek M, Sdek B, et al. Real-time measurement technique of the echo signal magnitude in ToF laser scanners[J]. Measurement, 2023, 208: 112453.

[5] 虞 静, 涂 朴. 一种TDC结合相位的激光测距研究与实现[J]. 自动化技术与应用, 2023, 42(1): 51-54.
Yu Jing, Tu Pu. Research and Implementation of Laser Ranging Based on TDC and Phase [J]. Techniques of Automation and Applications, 2023, 42(1): 51-54.

[6] 赵 旭, 苏 中, 李连鹏, 等. 脉冲激光飞行时间测距误差补偿技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(23): 2300001.
Zhao Xu, Su Zhong, Li Lianpeng, et al. Research Progress of Error Compensation Technology for Pulsed Laser Time-of-Flight Ranging[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(23): 2300001.

[7] Gammoh K, Peterson C K, Penry D A, et al. Linearity theory of stochastic phase-interpolation time-to-digital converter[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2020, 67(12): 4348-4359.

[8] Koskin E, Bisiaux P, Galayko D, et al. Jitter optimisation in a generalised all-digital phase-locked loop model [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2021, 68(1): 77-81.

[9] Yao Z Y, Mauldin T, Xu Z Y, et al. An integrated OFDR system using combined swept-laser linearization and phase error compensation[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 1-8.

[10] Fang B, Zhong S C, Zhang Q K, et al. Full-range line-field optical coherence tomography for high accuracy measurements of optical lens[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 69(9): 7180-7190.

[11] 张建鹏, 杨斌卫, 张 莲. 基于恒比定时甄别的引信测试系统定时点优化方法[J]. 科技创新与应用, 2024, 14(30): 1-6.
Zhang Jianpeng, Yang Binwei, Zhang Lian. Optimization Method for Timing Point of Fuze Testing System Based on Constant Ratio Timing Discrimination [J]. Technology Innovation and Application, 2024, 14(30): 1-6.

[12] 吴培鹏, 蔡文郁, 唐国栋, 等. 激光测距动态多阈值误差修正技术研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(7): 170-177.
Wu Peipeng, Cai Wenyu, Tang Guodong. Laser range measuring system based on dynamic multi-threshold error correction method[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(7): 170-177.

[13] 梅 超, 向雨琰, 于文博, 等. 高重频激光地面足印探测器峰检电路的设计[J]. 半导体光电, 2024, 45(2): 280-285.
Mei Chao, Xiang Yuyan, Yu Wenbo, et al. Design of Peak Detection Circuit for High Heavy Frequency Laser Terrestrial Footprint Detector [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2024, 45(2): 280-285.

[14] 任彦儒, 宗思光, 梁善永, 等. 水下激光通信系统接收机倾角及位置对接收光功率的影响研究[J]. 半导体光电, 2022, 43(6): 1184-1189.
Ren Yanru, Zong Siguang, Liang Shangyong, et al. Study on the Influence of Receiver Tilt Angle and Position on the Received Optical Power in Underwater Laser Communication Systems[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2022, 43(6): 1184-1189.

[15] 陈慧敏, 贾晓东, 蔡克荣. 激光引信技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2016.
Chen Huimin, Jia Xiaodong, Cai Kerong. Laser Fuze Technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2016.

[16] 谢庚承. 飞行目标激光测距技术研究[D]. 北京: 中国工程物理研究院, 2018.
Xie Gengcheng. Research on laser ranging technology of flying target[D]. Beijing: China Academy of Engineering Physics, 2018.

[17] 王乐乐, 秦 岭, 胡晓莉, 等. 基于Bi-LSTM神经网络的室内可见光定位方法[J]. 光通信技术, 2024, 48(2): 36-41.
Wang Lele, Qin Ling, Hu Xiaoli, et al. Indoor visible light positioning method based on Bi-LSTM neural network[J]. Optical Communication Technology, 2024, 48(2): 36-41.

[18] Zhu M, Hu S, Yang K, et al. GMSK demodulation combining 1D-CNN and Bi-LSTM network over strong solar wind turbulence channel[J]. Radio Science, 2023, 58(1): 1-15.

[19] 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.
Huang Minshuang, Liu Xiaochen, Ma Peng. Periodic error compensation of pulsed time-of-flight laser ranging system [J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(3): 0317004.

作者简介:

亓 林(1988—),女,山东省临沂市人,博士,高级工程师,信号与信息处理专业,主要研究方向为激光引信、激光测距。