

doi:10.3788/gzxb20184712.1228003

大动态范围激光雷达回波信号饱和和处理算法

朱世贤^{1,2}, 赵毅强^{1,2}, 叶茂^{1,2}, 李杰^{1,2}, 夏显召^{1,2}, 谢绍禹¹, 周国清¹

(1 天津大学 微电子学院, 天津 300072)

(2 天津市成像与感知微电子技术重点实验室, 天津 300072)

摘 要:对激光雷达距离探测中的回波信号建模,提出一种窗宽自适应形心修正算法,根据窗宽与饱和度的关系建立窗宽自适应模型以获取形心,并采用中位数修正,实现高精度饱和波形时刻提取.利用 Matlab 进行仿真分析,结果表明当信噪比为 10 dB 时,窗宽自适应形心修正算法精度为 0.3 ns,相比于传统形心算法提高 92%,可有效解决形心漂移问题.利用板级系统实测波形验证算法,并针对实测波形的微小畸变修正该算法,结果表明在饱和和波形下该算法时间精度可达 0.5 ns,可实现 7.5 cm 的测距精度,有效增大测距动态范围,降低系统复杂度.

关键词:激光雷达;距离测量;形心算法;饱和回波;窗宽自适应;时刻提取

中图分类号:TN958.98

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2018)12-1228003-7

Saturated Echo Signal Algorithm for Wide Dynamic Range Lidar

ZHU Shi-xian^{1,2}, ZHAO Yi-qiang^{1,2}, YE Mao^{1,2}, LI Jie^{1,2}, XIA Xian-zhao^{1,2}, XIE Shao-yu¹, ZHOU Guo-qing¹

(1 *The School of Microelectronics, Tianjin University, Tianjin 300072, China*)

(2 *Tianjin Key Laboratory of Imaging and Sensing Microelectronic Technology, Tianjin 300072, China*)

Abstract: An adaptive window width centroid correction algorithm is proposed based on echo signal modeling for lidar distance detection. An adaptive window width model is established to obtain centroids based on the relationship between window width and saturation. The algorithm is adjusted by the median, and achieves high-accuracy time extraction of saturated waveforms. The simulation is carried out through Matlab, and the results show that when the SNR reaches 10 dB, the accuracy of the adaptive window width centroid correction algorithm is 0.3 ns. Compared with traditional waveform centroid algorithms, the accuracy of the proposed algorithm is improved by 92% and the problem of centroid drift can be effectively solved. The algorithm is verified utilizing board-level measured waveforms and is corrected for distortion of the measured waveforms, the results show that the time accuracy of algorithm can reach 0.5 ns, and ranging accuracy can achieve 7.5 cm in case of saturated waveforms. The proposed algorithm can effectively increase the dynamic range of ranging and reduce system complexity.

Key words: Lidar; Distance measurement; Waveform centroid algorithm; Saturation echo; Adaptive window width; Timing abstracting

OCIS Codes: 280.3640; 010.3640; 120.1880; 150.5670; 140.3538

0 引言

激光雷达(Laser Detection and Ranging, LADAR)是一种主动式探测技术,被广泛应用于目标测量、地形测绘和导航制导等方面^[1,2].激光雷达中脉冲激光测距技术主要基于飞行时间法(Time of Flight, TOF),通过记录发射和接收激光脉冲之间的时间差来计算目标距离,从而计算出物体的三维坐标^[3-5],具有测量效

基金项目:广西创新驱动发展专项(No.桂科 AA18118038)资助

第一作者:朱世贤(1993-),男,硕士研究生,主要研究方向为激光雷达数据采集和处理.Email: zhu_shixian@tju.edu.cn

导师(通讯作者):赵毅强(1964-),男,教授,博士,主要研究方向为光电探测.Email: yq_zhao@tju.edu.cn

收稿日期:2018-06-21;录用日期:2018-08-30

<http://www.photon.ac.cn>

率高、灵活性高等特点。

在人工智能、自动驾驶以及其他探测领域,激光雷达需要几米到几百米的动态范围^[6],如自动驾驶典型工作范围为 5~150 m,则回波功率动态范围可达 78.16 dB,在满足远距离测距要求时,会导致近距离处接收电路响应的回波信号饱和,造成系统的探测精度严重下降,从而降低了雷达的动态范围。目前激光雷达主要采用多套雷达系统协同工作,成本较高,实现较复杂。如何减少硬件系统,在算法上实现大的动态范围是一个亟待解决的问题。

脉冲激光雷达飞行时间测量方法主要采用基于时间数字转换器的(Time-to-Digital Converter, TDC)时刻鉴别法或基于模数转换器(Analog to Digital Converter, ADC)全波形采样的时间测量方法。当地物、地形较复杂或进行大动态范围探测时,回波幅度变动较大,通过预先设定阈值来实现时间测量的 TDC 技术已不再适用,漂移误差会导致较大测距误差^[7-8]。基于 ADC 的全波形技术则可以根据回波信息提取准确的回波时间。基于 ADC 的全波形算法主要有波形形心算法和高斯拟合算法等,利用多点信息,充分考虑回波的形状,运用更复杂的算法进行计算,突破采样率的限制,理论上精度更高且抗噪性能更强^[9]。高斯拟合算法根据回波波形设定初始高斯参数,利用最小二乘法更新迭代高斯波形参数,从而得出最优解,拟合迭代耗时较长,实现复杂,不易在硬件实现,目前仅停留上位机。波形形心算法是利用时间加权平均法来进行回波时刻的提取,由于算法简单、执行速度快,被广泛采用和研究^[10-11]。

目前大多数全波形算法仅仅基于非饱和波形进行研究,而针对近距离处回波信号幅值过大,超出 ADC 输入量化范围的波形饱和情况,传统形心算法已不能满足系统要求,造成较大范围的探测盲区。为了减小激光雷达探测盲区,提高算法的精度和鲁棒性,实现激光雷达回波饱和和波形高精度时刻提取,本文对脉冲回波信号进行建模,分析形心算法在回波饱和或者幅值过大超出 ADC 输入量化范围时的误差,在此基础上提出窗宽自适应形心修正算法,对该算法的精度进行仿真,并基于板级实测波形进行验证。

1 传统形心算法与误差分析

1.1 脉冲回波信号建模

脉冲激光雷达发射的脉冲波形近似为高斯波形^[12-14],采用高斯函数及特征参数近似表示,即

$$P(t) = P_r \sqrt{\frac{k}{\pi}} \exp\left(-k \frac{(t-t_r)^2}{2T_0^2}\right) + N_n \quad (1)$$

式中, P_r 为激光回波功率,常数 k 为 $4\ln 2$, t_r 为回波时刻, T_0 为激光脉冲宽度, N_n 为噪声,包括背景噪声、电路噪声等非理想因素,其中激光回波功率可以由激光朗伯体反射传输模型得到^[14],即

$$P_r = \frac{P_t \cdot S_t \cdot T_r \cdot T_t \cdot A_r \cdot \cos\theta}{\pi \cdot R^2} \exp(-2 \cdot U_a \cdot R) \quad (2)$$

式中, P_t 为激光发射功率, S_t 为目标反射率, T_r 为接收光学系统效率, T_t 为发射光学系统效率, A_r 为接收光学面积, θ 为入射光线与法线的夹角, R 为目标与系统之间的距离, U_a 为大气衰减系数。

由式(2)可知,接收功率 P_r 与距离 R 的平方成反比,与目标反射率成正比,如图 1,纵坐标 $y = P_r/P_t$,近距离 $R = 5$ m 且高反射率处和远距离 $R = 150$ m 且低反射率处回波功率比值约为 8 100,动态范围为 78.16 dB,近距离高回波功率会造成波形幅值过大或者饱和,超出 ADC 的输入量化范围。

1.2 传统形心算法

形心是图形目标的几何中心,被认为是可以平衡波形形状的存在于回波中的一个虚拟的点,通常采用形心识别算法获取形心,因此,对于激光回波电压波形而言,脉冲波形的形心^[16]计算表达式为

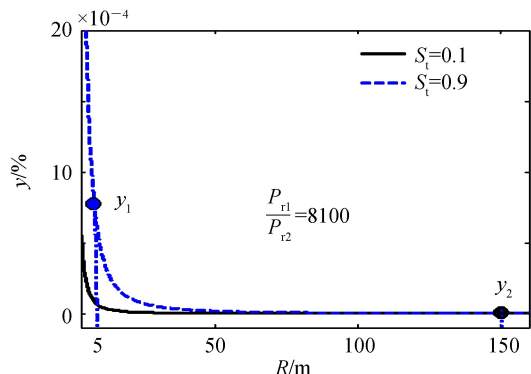


图 1 回波功率与距离的关系

Fig.1 The relationship between echo power and distance

$$X_c = \frac{\sum_{y=1}^N \sum_{x=1}^N x \cdot f(x, y)}{\sum_{y=1}^N \sum_{x=1}^N f(x, y)} \quad (3)$$

式中, $f(x, y)$ 为回波信号函数, X_c 为脉冲波形形心的时间位置. 用式(1)对脉冲激光波形建模, 激光雷达形心算法基于式(3)计算形心, 为了降低信号中噪声对形心计算的影响, 在对采样点进行滤波预处理后, 通过滑窗找到波形位置, 根据形心计算理论分别计算发射波的形心位置 x_t 和回波的形心位置 x_r , 距离信息的计算公式为

$$L = \frac{c \times (x_r - x_t)}{2 \times F_s} \quad (4)$$

式中, c 为光速, x_r 和 x_t 分别为接收回波形心的时间坐标和发射脉冲形心的时间坐标, F_s 为采样频率.

窗宽的选取与脉冲激光信号的回波脉宽和采样速率有关, 在脉宽和采样速率一定的情况下, 选取的窗宽大小的变化会对形心计算的精度产生影响, 因此在非饱和和波形计算时, 需要设定固定的窗宽来提高精度. 窗宽确定后, 精度主要受量化和噪声对形心造成的微小漂移影响, 但是当波形幅度过大造成超出 ADC 量化范围, 超出的部分为饱和部分, 当窗宽比饱和部分小时, 形心位置将会发生偏移, 偏移随着饱和部分的增加而增大, 从而造成精度严重下降. 如图 2, 图中虚线和虚线框表示未被采样前的波形和滑窗, X_c' 为实际的形心, 实线和实线框表示 ADC 采样之后的波形和滑窗, X_c 为饱和波形计算的形心, 可以看出形心计算存在明显偏差. 如图 3, 传统形心算法的误差在饱和度超过 200% 时不断增大, 在饱和度达到 1 000% 时, 误差会达到 3.76 ns, 这里饱和度为激光回波幅值与 ADC 输入量化范围的比值.

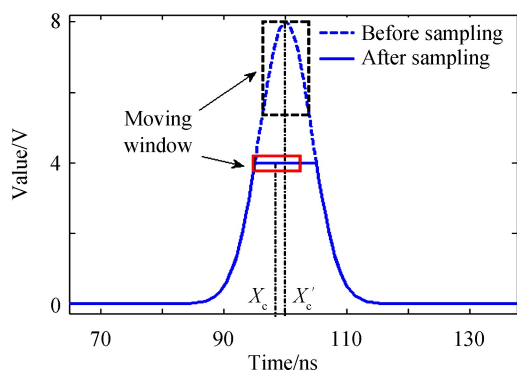


图 2 饱和波形与滑窗

Fig.2 Saturation waveform and moving window

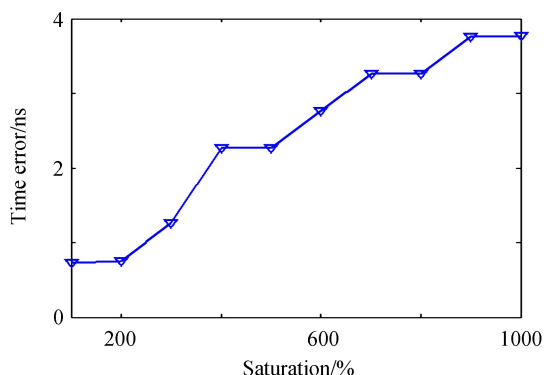


图 3 误差随着饱和度的变化

Fig.3 The error varies with the saturation

2 窗宽自适应形心修正算法与仿真

2.1 窗宽自适应形心修正算法

传统的固定窗宽是造成饱和波形下精度下降的重要原因, 为有效减小饱和波形下的计算精度偏差, 在饱和波形下采用可调滑窗宽度, 使得算法具有更好的稳健性和更高的精度.

滑窗宽度的取值与饱和度存在一定联系, 图 4 为最优滑窗宽度与饱和点数的关系, 当饱和点数小于初始窗宽 W_0 时, 最优窗宽在初始窗宽周围波动, 当饱和点数大于 W_0 时, 最优窗宽与饱和点数大致成线性关系.

如图 5, 通过窗宽自适应形心修正算法对 ADC 采样得到的原始数据点 $f(x, y)$ 饱和点进行判断, f_s 是 ADC 的饱和值, 若 $f(x, y) = f_s$ 则视为饱和点, 记录饱和点的数目 m , 图中三个波形的饱和点数分别为 m_0 、 m_1 、 m_2 , 窗宽自适应形心修正算法利用饱和点数 m 和非饱和波形的原始窗宽 W_0 . 根据图 4 所示的关系自动调整窗宽以适应饱和波形, 调整后的窗宽为

$$W = \begin{cases} W_0, & m \leq W_0 \\ \left[\frac{(N-m) \cdot W_0}{N} + a \cdot m \right] + K_c, & m > W_0 \end{cases} \quad (5)$$

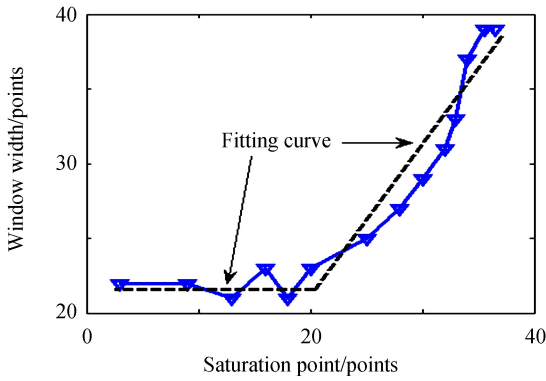


图4 最优窗宽和饱和点数的关系

Fig.4 Relationship between optimal window width and saturation points

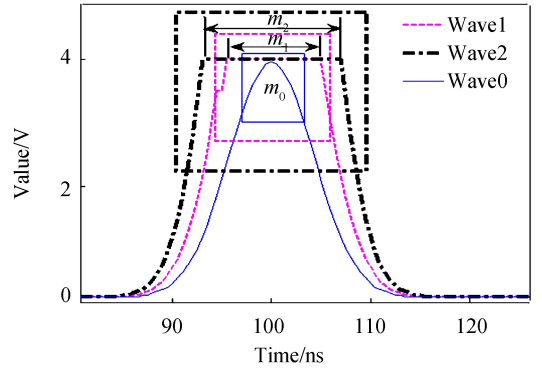


图5 窗宽自适应

Fig.5 Adaptive window width

式中, N 为脉冲波形的总的采样点, m 为饱和点数, a 为线性系数, c 为修正偏移量. 通过窗宽自适应形心修正算法对原始数据进行预处理滤波, 并根据不同饱和度和波形的饱和点获得适应本波形的窗宽, 进而以调整后的窗宽滑窗取样, 获得窗宽 W 的数据 $\mathbf{x} = [x_a \ x_{a+1} \ \dots \ x_{a+W}]$ 和 $\mathbf{y} = [y_a \ y_{a+1} \ \dots \ y_{a+W}]$, 对获得的波形数据求加权和并与前一次比较, 在滑窗过程中获得形心计算的起始位置 x_t

$$x_t = \begin{cases} x_a, & \sum_{i=0}^W y_{a+i} > \sum_{i=0}^W y_{a+i-1} \\ x_{a-1}, & \sum_{i=0}^W y_{a+i} \leq \sum_{i=0}^W y_{a+i-1} \end{cases} \quad (6)$$

通过 x_t 以及窗宽 W 采用式(3)对脉冲信号的形心进行初始定位, 得到形心 X_c . 同时基于 x_t 以及窗宽 W 计算其中位数 $X_m = \text{median}([x_t \ x_{t+1} \ \dots \ x_{t+W}])$, 计算形心 X_c 和 X_m 的差值 $d = X_c - X_m$, 并根据差量与临界值 ϵ 的关系对形心计算结果进行修正得到 X_{new}

$$X_{\text{new}} = \begin{cases} X_c - \Delta x, & d \leq -\epsilon \\ X_c + \Delta x, & d \geq \epsilon \\ X_c, & -\epsilon < d < \epsilon \end{cases} \quad (7)$$

窗宽自适应形心修正算法兼容了饱和波形和非饱和波形的处理, 在处理非饱和波形时, 其发挥传统形心算法的优势获取形心位置, 在处理饱和波形时, 能够根据回波波形的饱和程度进行窗宽自调整以及中位数修正, 提高算法精度.

2.2 算法仿真分析

记录传统形心算法和窗宽自适应形心修正算法对同一波形的仿真结果, 再将其与真值的差作为误差. 仿真基于 10 ns 脉冲宽度, ADC 采样率为 2G SPS, ADC 的量化输入范围是 0~400 mV, 两种算法对饱和度在 50%~1 000% 的波形在不同的信噪比 (Signal-to-Noise Ratio, SNR) 条件下分别进行 5 000 次仿真, 分析算法的精度, 统计在不同饱和度和 SNR 条件下的最大误差, SNR 指 ADC 输入量化范围和噪声比值.

图 6 中, x 轴表示饱和度, y 轴表示信噪比, z 轴表示测距时间精度, E_1 、 E_2 分别表示窗宽自适应形心修正算法和传统形心算法的最大误差, 可以看出随着饱和度的提高, 当饱和度超出 200% 时, 传统算法的精度开始出现偏差, 之后偏差不断增大, 不能

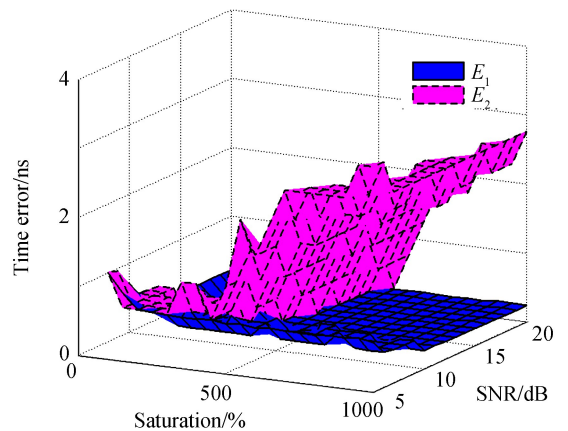


图6 算法精度与饱和度和信噪比的关系

Fig.6 The relation between algorithm precision and saturation and signal-to-noise ratio

满足系统测距精度的要求;在信噪比为 10 dB、饱和度为 1 000%时,传统形心算法的最大误差为 3.76 ns,窗宽自适应形心修正算法最大误差为 0.3 ns,相比于传统形心算法精度提高 92%。

进一步统计了在信噪比为 10 dB 时,两种算法的误差标准差,见表 1,传统形心算法的误差标准差从 0.44 ns到 3.2 ns 逐渐增大,窗宽自适应形心修正算法误差标准差从 0.35 ns 到 0.08 ns 逐渐减小,窗宽自适应在饱和和非饱和波形下均适用。

表 1 算法误差标准差
Table 1 Algorithmic error's standard deviation

| Saturation/% | Traditional waveform centroid algorithm/ns | Adaptive window width centroid correction algorithm/ns |
|--------------|--|--|
| 50 | 0.444 2 | 0.358 0 |
| 100 | 0.241 8 | 0.187 3 |
| 200 | 0.246 8 | 0.131 1 |
| 300 | 0.317 5 | 0.124 3 |
| 400 | 0.317 5 | 0.115 5 |
| 500 | 1.906 0 | 0.112 7 |
| 600 | 2.264 7 | 0.116 5 |
| 700 | 2.573 8 | 0.102 5 |
| 800 | 2.804 2 | 0.115 8 |
| 900 | 3.050 0 | 0.110 8 |
| 1 000 | 3.250 3 | 0.086 2 |

3 板级实测波形验证算法

为了验证算法对实际电路产生的波形的适用性,搭建半导体激光发射和单元雪崩光电二极管(Avalanche Photo Diode, APD)激光接收板级测试平台,采集实测不同饱和度的波形在上位机进行运算.激光发射电路产生脉冲宽度为 10 ns 的 1 064 nm 激光经准直照射到目标物,线性 APD 接收回波信号产生脉冲电流,经过跨阻放大器和模拟放大电路产生脉冲电压信号,通过控制激光发射功率和目标反射物的距离获得不同饱和度的波形,由波形采集平台对饱和度 50%~1 000%的实测波形进行采集,在上位机运算。

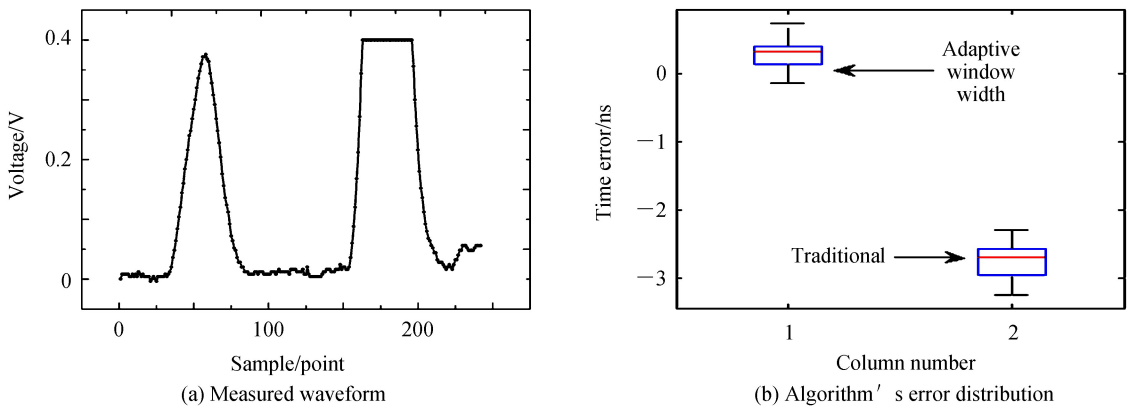


图 7 实测波形和基于实测波形的算法误差分布

Fig.7 Measured waveform and algorithms' error distribution based on measured waveform

实测距离采用商用精度为 1 mm 的激光测距仪定标,图 7(a)为实际采样到的波形,前一个为激光发射波形,后一个为接收回波波形,饱和度为 500%。图 7(b)中传统形心算法、窗宽自适应形心修正算法的误差频率分布分别为 $-3.3 \sim -2.4$ ns、 $0 \sim 0.7$ ns,窗宽自适应形心修正算法精度有较大提升,但由于实测波形的微变形导致误差范围偏移.在饱和度 50%~1 000%下计算窗宽自适应形心修正算法误差平均值 E_c ,并基于实测波形对偏移进行修正,即

$$x_f = x_c - a_0 \cdot \exp\left[\frac{b_0 \cdot m \cdot (m + k_0)}{M^2}\right] \quad (8)$$

式中, x_f 为修正后的形心位置, x_c 为修正之前的形心位置, a_0 、 b_0 、 k_0 为修正系数, M 为最大接收饱和点数目, m 为实测饱和点数目. 如图 8, E_c 为修正前误差平均值, E_f 为修正后误差平均值.

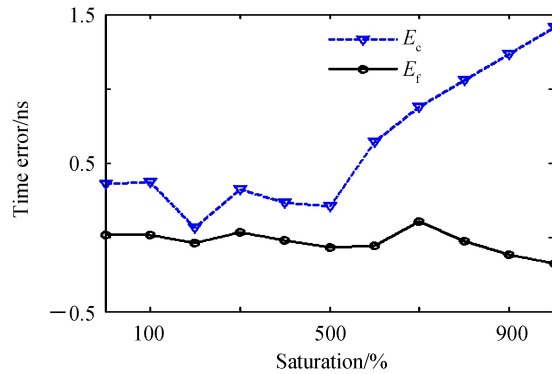


图 8 形心偏移和修正

Fig.8 Centroid offset and correction

表 2 算法误差范围

Table 2 Error range of the algorithms

| Saturation/% | Traditional waveform centroid algorithm/ns | Adaptive window width centroid correction algorithm/ns |
|--------------|--|--|
| 50 | -0.6~0.6 | -0.5~0.5 |
| 100 | -0.6~0.25 | -0.5~0.46 |
| 200 | -1.8~0.7 | -0.49~0.42 |
| 300 | -2.8~-1.9 | -0.39~0.47 |
| 400 | -3.4~-2.4 | -0.43~0.49 |
| 500 | -3.3~-2.4 | -0.44~0.29 |
| 600 | -3.5~-2.7 | -0.3~0.47 |
| 700 | -3.8~-3.0 | -0.36~0.50 |
| 800 | -4.0~-3.2 | -0.48~0.35 |
| 900 | -4.2~-3.4 | -0.3~0.42 |
| 1 000 | -4.5~-3.7 | -0.44~0.40 |

对两种算法在饱和度 50%~1 000% 下的误差范围进行统计, 见表 2, 窗宽自适应形心修正算法在非饱和波形下与传统形心算法有相似的误差范围, 对于饱和波形误差范围在 $-0.5 \sim 0.5$ ns 之间, 可实现 7.5 cm 的测距精度.

4 结论

针对激光雷达大动态范围全波形探测, 提出窗宽自适应形心修正算法. 仿真结果表明窗宽自适应形心修正算法能较好地处理饱和波形, 提高算法的精度和稳健性, 在信噪比为 10 dB、饱和度为 1 000% 时, 可实现 0.3 ns 的理论精度, 相比传统形心算法精度提高 92%. 基于板级实测波形对该算法进行验证, 并且针对实测波形的微小畸变修正算法, 结果表明该算法可达到 0.5 ns 的时间精度, 可实现 7.5 cm 的测距精度. 窗宽自适应形心修正算法利用时间加权平均法进行回波时刻的提取, 主要包括判断、加减乘除等基本运算, 易于在 FPGA 上实现, 未来的研究将基于硬件实现算法的高速实时测量.

参考文献

- [1] ZHAO Ming-bo, HE Jun, FU Qiang. Simulation modeling and analysis of full-waveform lidar signatures[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(6): 246-259.
赵明波, 何峻, 付强. 全波形激光雷达回波信号建模仿真与分析[J]. *光学学报*, 2012, 32(6): 246-259.
- [2] ZHU F, GONG K, HUO Y. A wide dynamic range laser rangefinder with cm-level resolution based on AGC amplifier structure[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2012, 55(2-3): 210-215.
- [3] YANG C, HUO Y, CHEN Q, et al. Time-of-flight measurement in self-triggering pulsed laser ranging[J]. *Optical Engineering*, 2005, 44(3): 034201.

- [4] 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): 1-15.
- [5] HUANG Min-shuang, LIU Xiao-chen, MA Peng. Periodic error compensation of pulsed time-of-flight laser ranging system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, **47**(3): 229-233.
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): 229-233.
- [6] LI Jie, ZHAO Yi-qiang, YE Mao, *et al.* Multi-channel processing technology for wide dynamic range signal in airborne lidar bathymetry[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(03): 0301002.
李杰, 赵毅强, 叶茂, 等. 机载激光测深雷达中大动态范围信号的多通道处理技术[J]. *光子学报*, 2018, **47**(03): 0301002.
- [7] ZHA Bing-ting, WANG De-li, ZHANG Le-qi, *et al.* Study on the compensation of drift error in laser fuze composite time identification method[J/OL]. *Chinese Journal of Lasers*, (2018-05-24)[2018-05-30]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1339.TN.20180524.1421.008.html>.
查冰婷, 王德利, 张乐琪, 等. 激光引信复合时刻鉴别法漂移误差补偿研究[J/OL]. *中国激光*, (2018-05-24)[2018-05-30]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1339.TN.20180524.1421.008.html>.
- [8] KURTTI S, NISSINEN J, KOSTAMOVAARA J. A wide dynamic range CMOS laser radar receiver with a time-domain walk error compensation scheme[J]. *IEEE Transactions on Circuits & Systems I Regular Papers*, 2017, **64**(3):550-561.
- [9] LI X L, YANG B W, XIE X H, *et al.* Influence of waveform characteristics on LiDAR ranging accuracy and precision. [J]. *Sensors*, 2018, **18**(4):1156.
- [10] KE Xi-zheng, LEI Si-chen, YANG Pei-song. Beam coaxial alignment detection in atmospheric laser communication[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, **43**(6): 0606003.
柯熙政, 雷思琛, 杨沛松. 大气激光通信光束同轴对准检测方法[J]. *中国激光*, 2016, **43**(6): 0606003.
- [11] XUE Wen-jia, ZHAO Yi-qiang, YE Mao, *et al.* Correction and hardware verification of echo centroid algorithm for airborne LADAR[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2018, **50**(05): 116-120.
薛文佳, 赵毅强, 叶茂, 等. 机载激光雷达回波形心算法修正及硬件验证[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2018, **50**(05): 116-120.
- [12] HUANG Ke, LI Song, MA Yue, *et al.* Research on detection probability model of single photon laser altimetry and its range accuracy[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, **43**(11): 1110001.
黄科, 李松, 马跃, 等. 单光子模式激光测高探测概率模型与精度分析[J]. *中国激光*, 2016, **43**(11): 1110001.
- [13] ABDALLAH H, BAGHDADI N, BAILLY J S, *et al.* Wa-LiD: a new LiDAR simulator for waters[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2012, **9**(4): 744-748.
- [14] SUN Jun-ling, MA Peng-ge, SUN Guang-min, *et al.* Multi-pulse laser radar target signal simulation based on target echo waveform model[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, **45**(7):0726006.
孙俊灵, 马鹏阁, 孙光民, 等. 基于目标波形模型的多脉冲激光雷达目标信号模拟[J]. *红外与激光工程*, 2016, **45**(7): 0726006.
- [15] XU Xiao-bin, ZHANG He, CHEN Shan-shan. Plane target echo characteristics of pulsed laser circular-viewing detection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, **37**(4): 0414003.
徐孝彬, 张合, 陈杉杉. 脉冲激光周向探测平面目标回波特性[J]. *光学学报*, 2017, **37**(4): 0414003.
- [16] MUSS J D, AGUILAR-AMUCHASTEGUI N, MLADENOFF D J, *et al.* Analysis of waveform lidar data using shape-based metrics[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2013, **10**(1): 106-110.

Foundation item: Guangxi Innovative Development (No. Guike AA18118038)

引用格式: ZHU Shi-xian, ZHAO Yi-qiang, YE Mao, *et al.* Saturated Echo Signal Algorithm for Wide Dynamic Range Lidar[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(12): 1228003

朱世贤, 赵毅强, 叶茂, 等. 大动态范围激光雷达回波信号饱和处理算法[J]. *光子学报*, 2018, **47**(12): 1228003