改进的峰值检测反距离加权插值算法

李 超,陈 钱,顾国华,钱惟贤

(南京理工大学 近程高速目标探测技术国防重点学科实验室,江苏 南京 210094)

摘 要:采样频率限制和回波脉冲展宽是导致数字化激光脉冲测距峰值检测精度低的主要原因。传统的反距离加权插值算法只能解决低采样频率的问题,却无力解决回波脉冲展宽的问题。针对该问题,根据回波时间能量分布模型,从采样得到的峰值位置分别向上升沿和下降沿方向搜索,各自对搜索半径内的采样点按照距离远近赋予不同权重和插值,然后加权平均提取修正后的峰值时刻。该改进算法有效地解决了回波展宽的问题,减小了低采样频率和回波脉冲展宽带来的测量误差,通过实验论证了算法的有效性。

关键词:激光脉冲测距; 峰值检测; 反距离加权插值; 回波脉冲展宽

中图分类号:TN958.98 **文献标志码**:A **文章编号**:1007-2276(2013)02-0533-04

Improved inverse distance weighting interpolation algorithm for peak detection

Li Chao, Chen Qian, Gu Guohua, Qian Weixian

(Ministerial Key Laboratory of JGMT, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: Low sampling frequency and echo broadening are the main reasons for low peak detection accuracy in digital pulsed laser ranging. The traditional inverse distance weighted interpolation algorithm (IDW) for peak detection can only solve the problem of low sampling frequency. Aim at the problem, an improved inverse distance weighted interpolation algorithm(IIDW) was proposed. The sampling peak value is firstly located, then sampling spots within the researching radius of the rising edge and falling edge were assigned with different weight according to the different distance to the peak value separately, finally the peak time was corrected by weighted average. This algorithm reduces peak detection errors caused by restriction of sampling frequency and echo broadening effectively and improves the detection precision of digital pulsed laser ranging.

Key words: pulsed laser ranging; peak detection; inverse distance weighted interpolation; echo pulse broadening

收稿日期:2012-06-15; **修订日期**:2012-07-18

基金项目:国家自然科学基金(61101199);江苏省自然科学基金(BK2011699);南京理工大学自主科研计划(2011XQTR01,2011YBXM74)

作者简介:李超(1984-),男,博士生,主要从事光电探测与图像处理方面的研究。Email:lc19840928@163.com

导师简介:陈钱(1964-),男,教授,博士生导师,博士,主要从事光电信息探测与实时图像处理方面的研究。Email:chenq@mail.njust.edu.cn

0 引 言

激光脉冲测距是利用激光脉冲探测目标,基于飞行时间测量原理的非接触测量方式。随着对激光测距精度要求的不断提高和高速模数转换器的出现,数字化激光脉冲测距应运而生[1-2]。峰值检测通过检测高速采样得到的回波峰值位置作为截止时刻,很大程度上克服了模拟激光脉冲测距的缺陷和误差。国内外许多研究机构对激光回波脉冲的峰值检测技术做了深入研究,参考文献[3-4]采用可编程逻辑器件控制采样电路对回波脉冲进行高频采样,并对采样数据进行线性插值重建,利用重建图形判断回波脉冲的峰值时刻,参考文献[5]仅对采样得到的峰值位置附近的若干采样点进行插值运算,并根据采样点距离峰值位置的远近赋予不同的权重,然后进行加权平均,从而得到修正后的峰值时刻。参考文献[3-5]的主要工作都集中在如何改进插值算法来解决采样频率速度不够带来的问题,却忽视了回波脉冲展宽带来的影响。

针对低采样频率和回波脉冲展宽带来的峰值检测精度低的问题,文中根据回波时间能量分布模型对参考文献[5]提出的反距离加权插值算法进行了改进,以采样峰值定位向上升沿和下降沿方向对搜索半径内的采样点分别按照距离远近赋予不同权重和插值,然后加权平均提取修正后的峰值时刻。

1 采样频率和脉冲展宽对峰值检测的影响

激光脉冲测距通过测量激光束从发射到截止的飞行时间来实现对目标的探测。激光束的主要能量集中在光束的中心位置,可以将回波脉冲的峰值位置作为激光束的截止时刻[6-7]。峰值检测只适用于激光回波波形非饱和的情况,即回波顶部为平滑的圆弧形状。对于近距离目标,由于反射能量过强会导致回波出现平顶形状并且波形整体展宽。为了抑制回波饱和情况的出现,在激光接收部分应采取自增益放大电路。回波脉冲可以看成是激光发射脉冲经过延迟、衰减、展宽的结果。一般情况下,可以用激光发射脉冲的时间能量分布模型来近似回波脉冲时间能量分布模型。激光发射脉冲的近高斯模型如下[8]:

$$\mathbf{p}(t)=(t/\tau)^2\cdot\exp(-t/\tau) \tag{1}$$

式中:τ 是与脉冲半高全宽 FWHM 相关的参数,τ=FWHM/3.5。对公式(1)求二阶导数,可得:

$$\mathbf{p}''(t)=\left(\frac{2}{\tau^2}-\frac{4t}{\tau^3}+\frac{t^2}{\tau^4}\right)\cdot\exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \tag{2}$$

令公式(2)=0,则:

$$t=(2-\sqrt{2})\tau \tag{3}$$

则 $t=(2-\sqrt{2})\tau$ 对应回波脉冲的拐点即回波的峰值位置。该峰值位置即是理想情况下峰值检测需要提取的激光截止时刻。又有 τ=FWHM/3.5,则峰值时刻与回波脉宽之间的关系为:

$$t=2-\sqrt{2}/3.5\cdot FWHM=0.167FWHM \tag{4}$$

实际峰值检测中,通过采样只能得到回波脉冲上的一组离散点,记为:

$$\mathbf{p}(\mathbf{nT})=(\mathbf{nT}/\tau)^2\cdot\exp(-\mathbf{nT}/\tau) \tag{5}$$

式中:**T** 为采样周期;**n** 为采样点,**n**=1,2,…。其采样得到的峰值采样点可以表示为:

$$\mathbf{n}=\mathrm{round}((2-\sqrt{2})\tau/\mathbf{T})=\mathrm{round}(0.167FWHM/\mathbf{T}) \tag{6}$$

式中:round(·)表示对函数四舍五入取整。可以看出,峰值采样点 **n** 的大小不仅与回波脉宽 FWHM 有关,还与采样周期 **T**(采样频率)有关,其大小随脉冲宽度展宽而变大,随采样频率加快而变大。图 1(a)、(b)分别

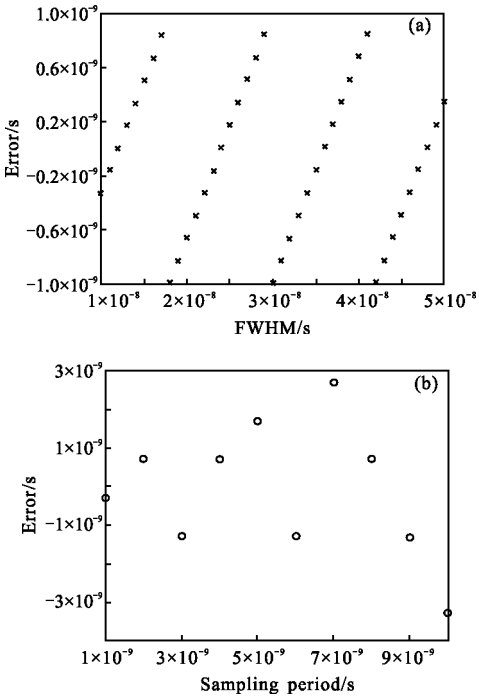

图 1 回波脉宽、采样周期引起的测量误差

Fig.1 Errors at different echo and different sampling period

反映了峰值采样的测量误差与回波脉宽 FWHM、采样周期 **T** 之间的关系。图 1(a)以 500 MHz 的固定采样频率对脉宽 10~50 ns 范围内以 1ns 间隔变化的回波脉冲进行采样,可以发现测量误差周期性变化,最大为 1 ns,为采样周期的一半。图 1(b)以 100 MHz 至 1 GHz、100 M 间隔变化的采样频率对固定脉宽 100ns 的回波脉冲进行采样,可以发现采样频率越高,测量误差越小,采样频率越低,测量误差越大。

2　反距离加权插值算法及其改进

反距离加权插值是一种简单的空间局部加权平均内插方法, 原理是通过计算待测点邻近的离散点进行加权平均来进行插值,根据相关性,在空间上距离待测点越近的离散点相关性越大,其权重也越大。权重是距离 **p** 次方的倒数($0\leqslant p\leqslant 2$),归一化的权重 λ_i 可以表示为:

$$\lambda_i=\frac{L_i^{-p}}{\sum L_i^{-p}} \tag{7}$$

式中:L_i 为待测点与采样点 x_i 的水平距离;**p** 为权重幂数,**p** 越大,内插结果越平滑。

假设待测点为 $O(x_o,f(x_o))$,其邻域的离散点为 $(x_i,f(x_i))$,$i=1,2,\cdots,N$,$N/2$ 是插值的搜索半径,则待测点的反距离加权插值表达式为:

$$f(x_o)=\sum \lambda_i f(x_i) \tag{8}$$

式中:$f(x_o)$为待测点 x_o 的幅值;$f(x_i)$为采样点 x_i 的幅值;λ_i 为采样点 x_i 的权重。

实际的激光回波峰值检测中, 需要确定的是激光峰值出现的时刻而并非峰值的幅值大小, 所以需要将采样得到的回波离散数据的自变量和应变量进行互换。而且激光回波时间能量分布在上升阶段的时间很短而下降阶段的时间很长, 即从采样点峰值横向邻域搜索上升沿的变化更快, 所以上升沿的采样点对峰值点插值的贡献比下降沿要大。因此,在反距离加权插值算法的基础上,为了更符合实际情况,改进后的激光回波峰值检测方法如图 2 所示。

图 2 中,采样得到的峰值点为 $O(f(t_o),t_o)$,以峰值点 **O** 定位, 同时向上升沿和下降沿方向以搜索半径 **m** 搜索采样点, 则修正后的峰值时刻如公式(9)所示。

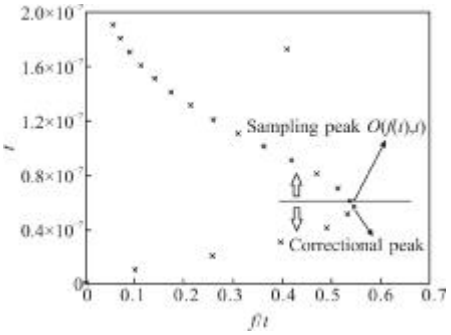

图 2 改进的激光回波峰值检测方法

Fig.2 Improved laser echo peak detection method

$$x_o=\sum_{i=0}^{m}\lambda_i x_i+\sum_{k=m}^{2m}\lambda_k x_k$$

$$\lambda_i=\alpha\cdot\frac{D_i^{-p}}{\sum_{0}^{m}D_i^{-p}},\ \lambda_k=(1-\alpha)\cdot\frac{D_i^{-p}}{\sum_{0}^{m}D_i^{-p}} \tag{9}$$

式中:λ_i、λ_k 分别为下降沿方向和上升沿方向的权重;α 为回波峰值的时间比例系数;$\alpha=0.167$,D_i 为采样峰值点与采样点 x_i 的采样点差值,权重幂数 $p=2$。

3　实验结果

IIDW 算法分为三个模块顺序执行: 第一模块完成原始数据的采集功能,根据采样周期和搜索半径定义数组大小,将采集到的原始数据存入数组 **a**;第二模块完成权重的计算功能,依据上升沿和下降沿搜索半径的权重公式分别计算采样数据的权重大小并存入数组 **b**;第三模块完成插值算法,利用数组 **a** 的原始数据和数组 **b** 的权重值对应数据乘以权重计算修正后的峰值时刻。整个算法实现的流程如图 3 所示。

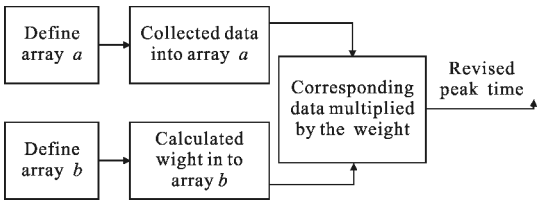

图 3 算法实现流程图

Fig.3 Flow diagram for realizing algorithm

采用 200 MHz 的 ADC 电路对同一目标, 利用 IIDW 算法进行多次数据采样,分析插值阶数和搜索半径两个参数对测量结果的影响。从表 1 可以看出,对于相同的插值阶数,搜索半径增大,标准差和极差

呈减小的趋势，修正后的峰值时刻越接近真实的峰值时刻,当搜索半径到达一定数值时,标准差和极差变化减缓。因此,搜索半径并不是越大越好,只要误差足够小搜索半径选取适中即可。

表 1 相同插值阶数不同搜索半径的指标结果

Tab.1 Comparing of STD,range with different search radius and same interpolation order

Search radius	10	20	40	80
STD	0.30	0.14	0.12	0.11
Range	0.82	0.26	0.23	0.22

从表 2可以看出,对于相同的搜索半径,插值阶数增大,标准差和极差呈减小的趋势,修正后的峰值时刻越接近真实的峰值时刻，当插值阶数到达一定值时,标准差和极差变化减缓,对修正后的峰值时刻影响不大,因此插值阶数并不是越大越好。

表 2 不同插值阶数相同搜索半径的指标结果

Tab.2 Comparing of STD,range with different interpolation order and same search radius

Interpolation order	1	2	4
STD	0.14	0.12	0.11
Range	0.26	0.22	0.21

以距离 10 m 的木板、迷彩服和黑板作为目标,与入射激光束成 90°放置，反射率分别为 0.38、0.28 和 0.07,多次测量取均值。三种处理方法得到的距离均值实验结果如表 3 所示。

表 3 不同反射率下三种方法得到的测量距离

Tab.3 Distance comparing of three processing methods with different reflectance

Reflectance	None/m	IDW/m	Improved IDW/m
0.38	10.34	10.20	10.08
0.28	10.68	10.28	10.08
0.07	10.94	10.45	10.10

可以看出,IDW 算法的波动性较大，采用 IIDW 算法波动性得到了一定的改善有效地提高测量精度。

4 结 论

将反距离加权插值算法应用于峰值检测，并根据回波时间能量分布模型对该算法进行了改进。通过改进的反距离加权插值算法修正峰值时刻，有效地解决了采样频率限制和回波脉冲展宽带来的峰值检测精度低的问题，提高了数字化激光脉冲测距的测距精度。

参考文献:

[1] Zhang He. Detection and Recognition [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2005.

[2] Blanquer E. LADAR proximity fuse study [D]. Stockholm: Royal Institute of Technology(KTH), 2007.

[3] Ari Kilpela, Juha Ylitalo, Kari Maatta, et al. Timing discriminator for pulsed time-of-flight laser rangefinding measurements [J]. Review of Scientific Instruments, 1998, 69(5): 1978-1984.

[4] Kou Songfeng, Chen Qian, Gu Guohua et al. Peak recognition technology based on linear-interpolation rebuilding method of echo signal[J]. Infrared and Laser Engineering, 2009, 38(6): 991-994. (in Chinese)

[5] Huang Qiaojie, Deng Huaqiu. Study on a new method for weak signal interpolation of pulsed laser ranging[J]. Laser & Infrared, 2010, 40(3): 312-314.

[6] Z Sun, J Deng, H Sang, et al. Detection system design and signal processing for digital pulsed laser fuse [J]. Infrared and Laser Engineering, 2009, 38(6): 1004-1007. (in Chinese)

[7] Buzzard G. Advanced laser proximity fusing [C]//NDIA 1st Annual International Missile & Rocket Symposium and Exhibition, San Diego, California, 2000.

[8] Steinvall O. Effects of target shape and reflection on laser radar cross section [R]. Stockholm, Sweden: Div of Sensor Technology, Defence Research Establishment, 1999.