

文章编号: 0258-7025(2006)07-0941-04

基于数字极性相关算法的激光脉冲测距

秦来贵, 霍玉晶, 何淑芳

(清华大学电子工程系, 北京 100084)

摘要 与直接阈值检测相比, 采用数字相关技术是提高激光脉冲测距系统灵敏度的有效途径。引入数字极性相关算法, 可以有效地减少相关函数处理所需的硬件支出, 在单个超大规模集成电路(VLSI)芯片上实现并行的相关运算, 提高数据吞吐量。通过仿真计算验证了此数字极性相关系统在弱信号激光测距中的效果, 分析了脉冲重复频率、起始处延时、脉冲间隔抖动、脉冲宽度以及采样频率对输出结果的影响, 为设计适用于数字相关检测的激光光源提供了理论依据。

关键词 激光技术; 激光脉冲测距; 弱信号检测; 数字极性相关; 信噪比

中图分类号 TN 958.98 **文献标识码** A

Study on Pulsed Laser Range Finder Based on Digital Polarity Correlation Algorithm

QIN Lai-gui, HUO Yu-jing, HE Shu-fang

(Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract The real-time signal processing of laser pulses is one of the key technologies in the laser rangefinding. The increased ability of anti-jamming and detectable distance are the main problems to be solved. Comparing with the direct threshold detection method, digital correlation techniques offer a good possibility for improving the sensitivity of pulsed laser ranging system. The digital polarity correlation function is introduced, which can effectively reduce the hardware expended and achieve the parallel correlation computations in a single very large scale integration (VLSI) chip to increase the data throughput. Based on this digital polarity correlation system, some simulations are presented to confirm the feasibility of estimating time-of-flight from the noisy echoes, and an analysis of the influences on correlation results caused by pulse repetition rate, arrival delay, interval jitter, pulse width and sampling frequency is carried out, which provides a theory basis for laser transmitter designs used in correlation-based measurement systems.

Key words laser technique; pulsed laser ranging; weak signal detection; digital polarity correlation; signal to noise ratio

1 引 言

目前激光脉冲飞行时间测距系统中, 常采用阈值检测的方法来实现时刻鉴别。这种方法实现起来比较简单, 但受脉冲幅度变化的影响较大, 且要求信号的最小信噪比(SNR)大于 5^[1]。而在实际的测距过程中, 目标的散射、大气传播过程中的衰减和展宽

以及接收端的各种噪声都会造成接收信号信噪比的恶化。一旦信噪比小于 5, 则阈值检测方法无法实现测距功能。

更为优化的飞行时间提取方法是使用互相关检测^[2,3], 它能充分利用信号波形的所有信息, 提高测距系统的灵敏度, 扩展其在弱信号下的应用范围。随着近几年超大规模集成电路的发展, 并行处理能

收稿日期: 2005-11-04; 收到修改稿日期: 2006-01-17

基金项目: 国家重点实验室基金(51456050103JW0103)资助项目。

作者简介: 秦来贵(1981—), 男, 四川成都人, 清华大学电子工程系硕士研究生, 主要从事激光弱信号检测和数字信号处理方面的研究。E-mail: qinlaigui99@mails. tsinghua. edu. cn

导师简介: 霍玉晶(1946—), 男, 河北秦皇岛人, 清华大学电子工程系教授, 博士生导师, 清华大学固体激光与光电子技术研究所所长, 长期从事固体激光与光电子技术的教学与科研工作。E-mail: hyj-dee@tsinghua. edu. cn

力的大幅度提高和硬件资源的不断丰富,使得在单个数字芯片上实现激光脉冲飞行时间测量成为可能^[4]。但已有的方法中,由于采用直接实现互相关函数的方法,信号采样与处理需要较大的计算量和硬件资源,难以实现大数据量的并行处理。

本文为解决直接实现互相关函数硬件设计上的困难,引入了数字极性相关算法,并以基于此算法的硬件结构为依据,分析和验证了不同特征的发射信号波形下数字极性相关处理从噪声淹没的信号中提取飞行时间的效果。

2 数字极性相关

采样信号序列 $u(t_i)$ 和 $v(t_i)$ 的互相关函数为

$$C_{uv}(\tau_l) = \sum_{i=1}^N u(t_i)v(t_{i+l}), \quad l = 1, 2, \dots, L \quad (1)$$

这里延时时间 $\tau_l = lT$, T 为采样间隔时间。基于实时性的考虑,通常需要采用多路并行计算以提高数据的吞吐量。但直接并行计算公式(1)将需要大量的数字电路,尤其每一路计算就需要一个乘法器,这是很大的硬件支出。另一方面,把数字相关运算应用在激光脉冲飞行时间测距中,由于激光脉冲脉宽极窄的特点,还需要一个高速高精度的模数转换器来进行采样,这是当前该系统实现的另一个难点。

为了克服这两个难点,采用极性相关函数来实现相关运算。它与直接相关函数的数学关系为^[5]

$$r_{puv}(\tau) = (2/\pi)\arcsin[\rho_{uv}(\tau)], \quad (2)$$

式中 $r_{puv}(\tau)$ 表示极性相关函数, $\rho_{uv}(\tau)$ 表示归一化的相关函数。数字极性相关函数定义为

$$r_{puv}(\tau_l) = (1/N) \sum_{i=1}^N (\text{sgn}[u_i] \text{sgn}[v_{i+l}]), \quad (3)$$

式中 u_i 和 v_{i+l} 分别表示第 iT 和第 $(i+l)T$ 时刻的信号采样值。

从(2)式可以看出,极性相关函数与直接相关函数将同时取得最大值,即采用极性相关函数来测量飞行时间可以获得与后者同样的结果。为了便于数字逻辑实现,将(3)式进行一系列线性变换可以得到与(1)式类似的表达式^[5]

$$D_A(\tau_l) = \sum_{i=1}^N u_k(t_i) \cdot v_k(t_{i+l}), \quad (4)$$

式中 $D_A(\tau_l)$ 为变换后的数字相关函数,其中

$$u_k(t_i), v_k(t_i) = \begin{cases} 1, & u(t_i), v(t_i) > 0 \\ 0, & u(t_i), v(t_i) \leq 0 \end{cases} \quad (5)$$

极性相关最大的特点是在相关处理前对信号进行了极化,即根据一个预设的电平将信号极化为 1 bit 的数字信号。这样,后接的乘法器可被一个与门替代,

加法器可被一个计数器替代,从而大大降低了硬件消耗。

实际的可编程逻辑实现也常常使用异或门,这只需对极性相关函数作如下线性变换

$$D_B(\tau_l) = \frac{1}{2}[1 + D_A(\tau_l)] = \sum_{i=1}^N \overline{u_k(t_i) \otimes v_k(t_{i+l})}, \quad (6)$$

式中 $D_B(\tau_l)$ 为变换后的数字相关函数,乘法运算通过异或逻辑门来实现。

图 1 为实际采用的一种典型的实现数字极性相关的硬件结构。本地信号 $u(t)$ 与接收的回波信号 $v(t)$ 各经过一个比较器极化为数字信号 $u_k(t)$ 与 $v_k(t)$ 。这里采用了并行的结构,包含 1024 个延时单元,每一个延时单元对应一个横向的处理模块独立地完成相关运算。在一定的计数时间之后,输出总线给出极化相关函数值最大的模块序号 n , 对应接收信号的飞行时间 $T = n \times T_s$ (采样时间间隔)。整个相关处理系统集成在一块数字芯片中,且充分利用了超大规模集成电路(VLSI)的逻辑门资源,具有并行化、集成化和稳定性高的优点。

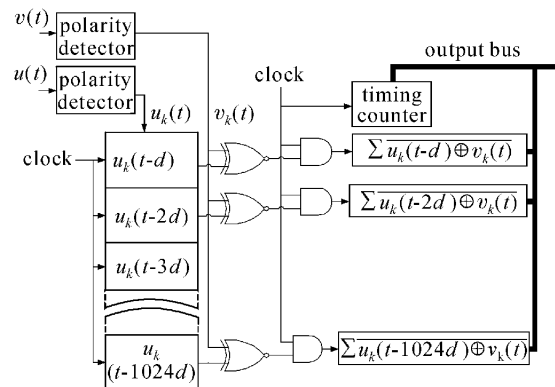


图 1 数字极性相关硬件结构

Fig. 1 Hardware structure of digital polarity correlation system

3 发射信号波形的设计

以图 1 的硬件结构为基础,对基于数字极性相关的数字信号处理部分进行了仿真分析,以充分说明数字极性相关技术在弱信号测距中的效果和优势。同时,由于数字相关是对整个波形进行采样处理,合理设计信号波形将对相关处理结果有重要影响,通过对发射信号波形进行灵活的控制,可以得到最大的信噪比优化。因此分别从脉冲重复频率、起始处延时、脉冲间隔抖动、脉冲宽度以及采样频率五个角度对发射信号波形设计分析。

仿真中噪声是利用科学计算软件 Matlab 中 Simulink 信号发生模块编程产生的带限高斯白噪声,其带宽主要受接收通道限制。信号参数设置采用了自行研制的主动控制被动调 Q 激光器输出脉冲的典型数值^[6]。可主动控制的被动调 Q 激光器是一类全新的脉冲激光器^[6~8],它克服了被动调 Q 激光器不能控制脉冲产生时刻、重复频率、脉冲宽度和峰值功率等参量的缺点,兼具主动调 Q 激光器和被动调 Q 激光器的优点。待处理信号信噪比为 -7.76 dB,有用信号被完全淹没在噪声中,使用通常的阈值检测法根本无法提取信号。这里采样频率为 100 MHz,计算时间为 500 μ s。

3.1 脉冲重复频率

单个调 Q 脉冲具有峰值能量高、前沿窄的优点,结合直接阈值探测很适于远距离测距、激光雷达等应用。但正如前面提到的,在某些测距条件下,很大程度上是传播通道、反射介质和接收机噪声限制了整个系统的测距性能。再强的激光脉冲经过雾天、水下的散射,经过粗糙反射表面的漫反射,都将衰减为很微弱的信号,以至于被接收机噪声所淹没。为了提高测距系统对弱信号的检测能力,采取相关信号处理的方法,在噪声中提取出被淹没的信号信息。在这种情况下,具有一定重复频率的脉冲串较单个脉冲更有利于检测与测量。

图 2 比较了单个脉冲、重复频率为 6.67 kHz 与 20 kHz 的脉冲串三种情况下,数字极性相关处理后的输出结果。其中,横坐标对应延迟时间,纵坐标为相应的数字极性相关结果,输出信噪比定义为输出峰值与旁瓣峰值的比值。单脉冲数字相关输出信噪比为 5.46 dB,信噪比改善了 13.22 dB,已经可以提取出脉冲飞行时间;在 $f = 6.67$ kHz 情况下,实际为 3 个脉冲极性相关,输出信噪比为 10.3 dB,信噪

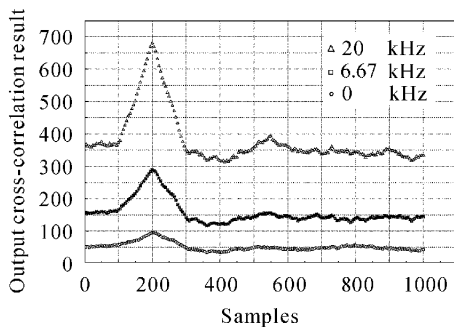


图 2 数字极性相关处理结果与脉冲重复频率的关系
Fig. 2 Output cross-correlation result versus pulse repetition rate

比改善了 18.06 dB; $f = 20$ kHz 为 7 个脉冲极性相关,得到了更佳的信噪比输出 (SNR = 17 dB),更有利于从背景噪声中提取信号。可见,光源处脉冲串的重复频率越高,实际参与数字相关积累的脉冲数量越多,越有利于弱信号下的脉冲激光飞行时间测距。

3.2 起始处延时

起始处延时即调 Q 过程中第一个激光脉冲的建立时间 t_p 。对于发射信号 $u(t_i)$ 和接受信号 $v(t_i) = u'(t_i) + n(t_i)$ 的互相关函数

$$C_w(t_i) = \sum_{i=1}^N u(t_i) [u'(t_{i+1}) + n(t_{i+1})] = \sum_{i=1}^N [u(t_i)u'(t_{i+1}) + u(t_i)n(t_{i+1})], \quad (7)$$

其中 $u'(t_i)$ 为发射信号衰减后的回波信号, $n(t_i)$ 表示其叠加的随机噪声。起始处延时变化后, (7) 式中括号内前一项根据相关函数的性质并不发生变化,后一项发射信号与随机噪声的互相关运算结果主要由脉冲宽度决定,所以总的相关输出值在原来基础上只是有所波动。这种波动是随机的,也是有限的,对信噪比影响不大。而对激光测距精度的影响取决于这个延时的稳定性,即是否可以作为系统误差消除,它由激光器源端的控制能力决定^[6]。

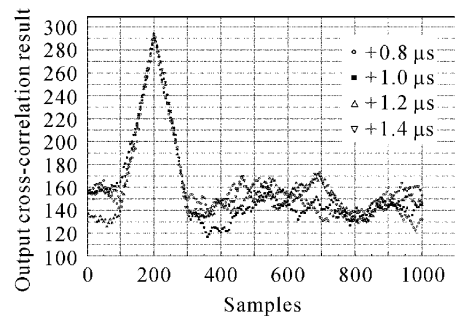


图 3 数字极性相关处理结果与脉冲起始处延时的关系
Fig. 3 Output cross-correlation result versus arrival delay

由图 3 可见,起始处延时变化可能引起脉冲数量的变化,即起始处延时增长,可以使计算时间内的脉冲减少甚至使脉冲跳出到运算时间之外,无法进行相关处理;起始处延时变短,相反地可以使计算时间内的脉冲增加,对相关处理起到积极作用。

3.3 脉冲间隔抖动

前面的讨论隐含了脉冲重复间隔一定的假设。实际上,100 MHz 采样率下,10 ns 的抖动都是可测的,所以需要考虑脉冲间隔抖动对相关输出的影响。

同起始处延时分析类似,脉冲间隔抖动也是使

数字相关输出结果产生少量的随机波动,通常可以忽略其影响。

3.4 脉冲宽度

与增加脉冲重复频率类似,增加脉冲宽度也可以提高脉冲数字相关积累的程度,达到提高输出结果信噪比的效果。图4显示了不同脉冲宽度下数字极性相关输出结果的比较。从图中也可以看到,若不考虑脉冲形变的影响,精度只受限于采样时间间隔,而与脉冲宽度无关。

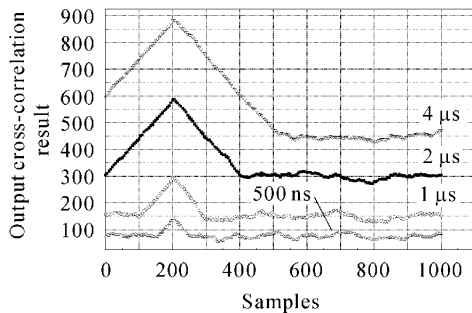


图4 数字极性相关处理结果与脉冲宽度的关系

Fig.4 Output cross-correlation result versus pulse width

由图4可见,在激光器输出能量有限的前提下,增加脉宽意味着降低激光脉冲峰值功率,从而会在接收端降低接收光信号强度,以致又减小了输出的信噪比。所以实际的数字相关测距系统通常不利用增加脉冲宽度来提高输出信噪比,而是更多地采用前面提到的多脉冲相关等方法。

3.5 采样频率

较高的采样频率可以对信号进行失真较少的采样,获得更高的输出信噪比。图5是不同采样频率下,数字相关输出结果的比较,其他仿真条件与前面相同。50 MHz采样下输出信噪比为6 dB,而

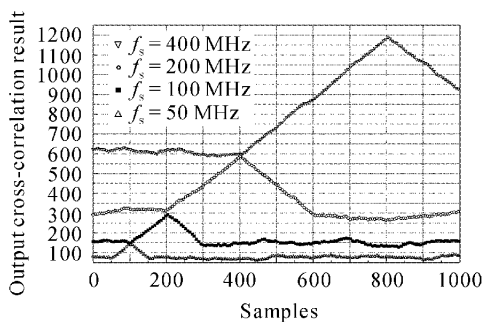


图5 数字极性相关处理结果与采样频率的关系

Fig.5 Output cross-correlation result versus sample frequency

400 MHz采样下输出信噪比已达到28.6 dB。可获得的最高采样频率受限于接受通道带宽和数字信号处理(DSP)模块的时钟频率。使用并行与流水线的设计有助于提高数字信号处理模块的时钟频率。

4 结 论

采用逻辑与(或异或)和计数器代替了乘加运算,使得充分利用超大规模集成电路芯片的逻辑门资源完成并行数字相关运算成为可能。从仿真结果中可以看到,采用1024路并行计算的数字极化相关处理系统成功地从信噪比为-7.76 dB的噪声信号中提取出测距飞行时间。另一方面,从信源发射信号波形设计角度来看,光源输出脉冲重复频率、起始处延时、脉冲间隔抖动、脉冲宽度以及采样频率等参数对最终的数字相关输出结果都有一定程度的影响。起始处延时和脉冲间隔抖动对结果影响最小,在通常情况下可以忽略。而增加脉冲重复频率和提高采样频率是提高输出结果信噪比的有效方法。

参 考 文 献

- 1 Thierry Bosch, Marc Lescure, Brian J. Thompson. Selected papers on laser distance measurement [C]. Vol. MS 115 of SPIE Milestone Series. Bellingham, Washington: SPIE, 1995
- 2 Thomas Kailath. Correlation detection of signals perturbed by a random channel [C]. *IRE Trans. Inform. Theory*, 1960, **6**(3):361~366
- 3 B. Barshan, B. Ayrulu. Performance comparison of four time-of-flight estimation methods for sonar signals [J]. *Electron. Lett.*, 1998, **34**(16):1616~1617
- 4 Zhang Zhengyu, Sui Xiaolin. Faint signal digital correlation detection of laser ranging: study and simulation [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(7):661~665
章正宇, 眭晓林. 激光测距弱信号数字相关检测技术的研究和仿真[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(7):661~665
- 5 Gao Jinzhan. Detection of Weak Signals [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004. 251~253
高晋占. 微弱信号检测[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004. 251~253
- 6 Xiaodong Yin, Chengwei Yang, Dalong Zhao *et al.*. Actively-controllable passively Q-switched laser [C]. *SPIE*, 2005, **5627**: 199~208
- 7 Yang Chenwei, Huo Yujing, He Shufang *et al.*. LD pumped high-efficiency high-repetition-rate Nd:YAG ceramic laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(5):593~596
杨成伟, 霍玉晶, 何淑芳等. 激光二极管抽运的高效高重复频率Nd:YAG陶瓷激光器[J]. *中国激光*, 2005, **32**(5):593~596
- 8 Feng Lichun, Huo Yujing, He Shufang *et al.*. LD-pumped acousto-optically Q-switched 473 nm laser with High Repetition Rate [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(8): 1027~1030
冯立春, 霍玉晶, 何淑芳等. 激光二极管抽运声光调Q高重复频率473 nm激光器[J]. *中国激光*, 2005, **32**(8):1027~1030