

文章编号: 0258-7025(2002)07-0661-05

激光测距弱信号数字相关检测技术的研究和仿真

章正宇^{1,2}, 眭晓林²

(¹ 西安电子科技大学技术物理学院, 陕西西安 710071; ² 华北光电技术研究所, 北京 100015)

摘要 针对激光远程测距或恶劣环境测距中回波弱信号信噪比低, 难以提取的困难, 提出运用数字相关检测技术进行处理, 并对单脉冲互相关、多脉冲互相关等数字处理技术作了介绍, 并结合激光雷达的测距系统进行一系列仿真和计算, 收到了良好效果。

关键词 激光测距, 弱信号, 数字相关检测

中图分类号 TN 247 文献标识码 A

Faint Signal Digital Correlation Detection of Laser Ranging : Study and Simulation

ZHANG Zheng-yu^{1,2}, SUI Xiao-lin²

(¹ Physics Technique College of Xidian University, Xi'an 710071)
(² North China Research Institute of Electro-optics, Beijing 100015)

Abstract The SNR of faint signal is very low in the long distance laser ranging or bad circumstance laser ranging, so it is very difficult to recognize the echo wave. This paper introduces digital correlation detection method and uses it to process the signal. Single signal correlation and multi signal correlation are simulated and calculated with laser ranging radar and a good results is got. This study will help to greatly improve the ability of laser ranging radar.

Key words laser ranging, faint signal, digital correlation detection

1 引言

目前, 激光测距机在直接探测基础上往往采取直接阈值检测方法来提取目标回波。激光测距机经典信号检测一直采用模拟电路来完成, 主要利用分离元件和小规模集成电路对回波进行放大、滤波、阈值触发、整形和计数。考虑到信号与噪声的独立性, 根据光电探测平方律和信噪比定义, 光电直接探测输出信噪比为^[1]

$$(SNR)_o = \frac{S_o}{n_o} = \frac{s_i^2}{2s_i n_i + n_i^2} = \frac{(s_i/n_i)^2}{1 + 2(s_i/n_i)} \quad (1)$$

式中, s_i/n_i 为探测器输入信噪比; s_o/n_o 为探测器输出信噪比。

从上式可以推得^[1], 直接探测方式与阈值检测适宜于强光信号(信噪比 > 5)探测, 而对远程目标回波存在弱信号探测难的问题。

在激光远程测距和 underwater、雾天等恶劣环境测距中, 回波信号幅值因介质衰减而大幅度变低, 脉冲波形因介质折射、散射而畸变展宽, 但散弹噪声、暗噪声以及热噪声等噪声信号幅度和频带特性基本不变, 所以目标回波淹没在噪声中, 接收信噪比较小, 用传统的阈值检测法根本无法提取目标信号。

现代雷达、声纳、语言通信等电子技术领域的实践已经证明信号数字化检测与传统模拟电路检测相比具有精度高、灵活性大、易于大规模集成等优点, 可靠性也相应提高。但与其他波段信号相比, 脉冲

收稿日期 2001-05-31; 收到修改稿日期 2001-11-05

作者简介 章正宇(1972—)男, 高级工程师, 现为西安电子科技大学在职博士研究生, 在华北光电技术研究所主要从事激光弱信号探测和激光水下目标探测研究。E-mail: zzy-1234@263.net

激光雷达脉宽很窄,将其进行 A/D 转换变为数字信号较为困难。另外在远程测距中对信号进行长时间高速率 A/D 转换,信号处理单元数据吞吐量极大,实时处理也很困难。但近年来,随着高采样率高带宽 A/D 器件的出现和大规模数字并行处理产品的高速发展,激光雷达信号数字处理技术逐渐走向实用。运用采样率 1 GHz,带宽 100 MHz 的 A/D 器件,现已能够实现脉冲激光回波信号的高保真数字化,高速 FPGA 和 DSP 可以直接通过并行算法实时处理大量数据。这样在传统模拟域中无法解决的弱信号探测问题有望在数字域中应用飞速发展的数字处理技术加以解决^[2,3]。

2 弱信号相关检测分析

弱信号与噪声的区别主要包括频谱特性、统计特征等方面,而不是它们的强度差别,这是弱信号检测关键技术的出发点^[3]。

利用信号有良好的时间相关性和噪声的时间不相关性(或仅在短时间内部分相关),对信号进行积累而对噪声不积累,把深埋于噪声中的信号提取出来,这种相关接收提取方法是弱信号检测的基础。在激光测距中,相关接收可以通过相干探测或相关检测方式来实现。

由于探测器的响应时间比一般光信号频率慢得多,所以相干探测(即光外差探测)时探测器对光频信号的响应在时间上可视为一个积分过程,其物理含义即是探测器响应信号光场和参考光场相干合成的光强,因此也属于一种互相关接收,能直接对弱光信号起到检测作用,但这种探测系统结构比较复杂,一般只有 CO₂ 气体激光器能满足要求^[4];考虑到测距仪系统的重量、体积、功耗、成本以及可靠性和稳定性,本文针对运用 1.06 μm Nd:YAG 激光抽运的 KTP 光参量振荡器发射机,认为采用直接探测基础上的弱信号相关检测比较适于大量实际应用。

由于在检测激光测距弱信号时,既需要判断回波信号的有无,又要对信号参量进行测量,因此互相关检测较符合使用要求,并且其抑制噪声能力比自相关要强。

2.1 单脉冲互相关检测技术

利用一个与待测信号 $s(t)$ 同频率(频带)的信号 $y(t)$,对被噪声干扰信号

$$x(t) = s(t) + n(t) \quad (2)$$

作运算(如图 1)。

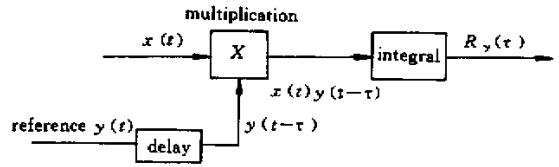


图 1 单脉冲互相关运算示意图

Fig.1 Schematic diagram of single signal correlation

最后输出信号为

$$R_{xy}(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T x(t)y(t-\tau)dt \quad (3)$$

把(2)式代入(3)式得

$$R_{xy}(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T [s(t) + n(t)]y(t-\tau)dt = \frac{1}{T} \int_0^T s(t)y(t-\tau)dt + \frac{1}{T} \int_0^T n(t)y(t-\tau)dt$$

即

$$R_{xy}(\tau) = R_{sy}(\tau) + R_{ny}(\tau) \quad (4)$$

在测距回波信号中信号与噪声互不相关,噪声与噪声在时间上也不相关,根据互相关函数的性质^[5]

$$R_{xy}(\tau) \cong R_{ss}(\tau) \quad (5)$$

$$R_{ny}(\tau) = 0 \quad (6)$$

这表明,经相关处理后,保留了目标信号,抑制了噪声。

2.2 多脉冲互相关处理

三个脉冲互相关的 FPGA 硬件结构如图 2。

由图 2 可清楚地看到,进行三个脉冲互相关需 $3 \times n$ 次加法。 n 为采样点数,由下式决定

$$n = k \frac{2L}{c} \quad (7)$$

其中 k 为采样速率,在激光雷达应用中, $k \geq 1$ GHz; L 为最大测程,对于远程测距(漫反射目标) $L \geq 60$ km; c 为空气中的光速,单位 km/s。

设作一个加法的指令周期为 CLK,若用传统串行算法,需用时 $3 \times n \times \text{CLK}$ 。而图 2 所示的 FPGA 硬件结构采用并行算法,只用一个指令周期 CLK 即可完成。由(7)式得 n 的数量级为 10^5 ,可见大容量 FPGA 的出现使多脉冲互相关实时处理成为可能。

对于(2)式,由噪声的特性可知^[5]

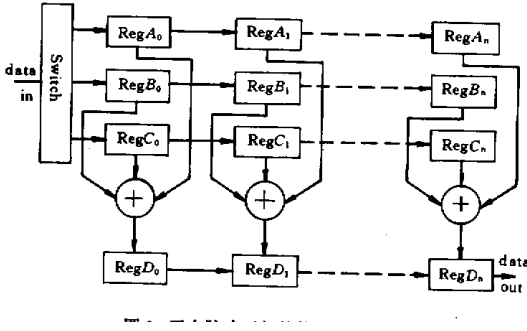


图 2 三个脉冲互相关的 FPGA 硬件结构

Fig. 2 Hardware structure of FPGA for 3 pulses correlation

$$\epsilon \{n_i(t)\} = 0 \tag{8}$$

$$\epsilon \{n_i(t) + n_j(t)\} = \epsilon \{n_i(t)\} + \epsilon \{n_j(t)\} \quad (i \neq j) \tag{9}$$

$$\epsilon \{n_i(t) \times n_j(t)\} = \epsilon \{n_i(t)\} \times \epsilon \{n_j(t)\} \quad (i \neq j) \tag{10}$$

$\epsilon \{ \}$ 表示期望算符。

定义功率信噪比为

$$P = \text{SNR}^2 = \frac{s^2(t)}{\epsilon \{n^2(t)\}} \tag{11}$$

如果对 M 个信号进行平均互相关, 可得

$$\overline{s(t)} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M [s(t) + n_i(t)] \tag{12}$$

功率信噪比将变为

$$\overline{P} = \frac{s^2(t)}{\epsilon \left\{ \left[\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M n_i(t) \right]^2 \right\}} \tag{13}$$

利用(9)式及(10)式可得

$$\overline{P} = \frac{M^2 s^2(t)}{\epsilon \left\{ \sum_{i=1}^M n_i^2(t) \right\} + \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^M \epsilon \{n_i(t)\} \epsilon \{n_j(t)\}} \tag{14}$$

式(15)分母中第二项为零; M 个噪声来源于相同的样本集, 分母中第一项求和式中每项相同, 可得

$$\overline{P} = \frac{M^2 s^2(t)}{M \epsilon \left\{ \sum_{i=1}^M n_i^2(t) \right\}} = MP \tag{15}$$

$$\overline{\text{SNR}} = \sqrt{\overline{P}} = \sqrt{M} \sqrt{P} = \sqrt{M} \text{SNR} \tag{16}$$

可见经过互相关后, 信噪比提高了 \sqrt{M} 倍。

利用周期性信号的重复性, 采用取样积分器, 在每个周期内对信号可能出现部分(由最大期望测程决定)采样, 然后经过多脉冲间同步积累取出平均值, 处理后可以达到如下效果:

1) 由于噪声的不相关性, 均值为 0 或接近于 0, 而信号在积分后获得良好的积累效果, 从而凸现目标, 抑制噪声;

2) 由于噪声的随机性, 每次信号受噪声和介质

散射影响畸变不同, 信号多次重复把受到不同畸变的信号叠加, 可有效展现待测信号真实波形, 对激光本身“拍”波形也可起到拟合作用。

由(16)式得, 在该技术中, 帧扫描时间越长, 信号取样积累次数 M 越多, 信号再现和信噪比改善效果越佳, 但 M 值要受到激光发射机性能和被测目标相对运动速度的限制^[6]。

3 仿真研究及测距能力分析

3.1 相关检测仿真

由于均在数字域中处理问题, 在输入信号参数与实际相一致的情况下, 计算机仿真结果与实际系统运行结果具有一致性。以下将通过计算机 MATLAB 软件仿真^[7]充分说明激光远程测距中弱信号数字相关检测的效果与优势。噪声与信号是用 MATLAB 软件中 Simulink 的信号发生器编程产生的, 对信号的处理程序调用了 MATLAB 信号处理工具箱中的相关函数。仿真中所讨论的弱信号(信噪比 < 5)采用传统提取方法是难以解决的。

目标信号模板的选取参照激光主波波(半宽为 10 ns)的采样, 仿真程序可改变信号幅度和下降沿缓度, 在水下探测研究中还要考虑水体散射带来的回波畸变, 噪声模板的选取考虑受探测器和前放的带宽限制, 为 80 M 带通白噪声, 本文已经考虑到信号带宽和噪声带宽的相近性, 因此上述参量与直接探测的激光雷达系统相符^[8]。仿真结果如图 3 ~ 8 所示。

根据仿真程序计算, 图 3 中与噪声合成的原始

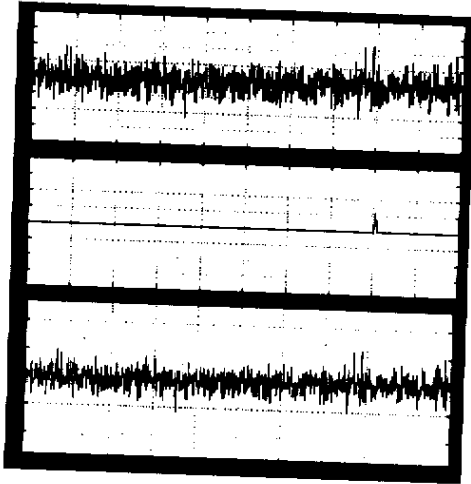


图3 80 MHz 带通白噪声(上)信号(中)和与噪声合成的原始信号(下)

Fig.3 80 MHz band pass white noise (up), signal (middle) and original signal with noise (down)

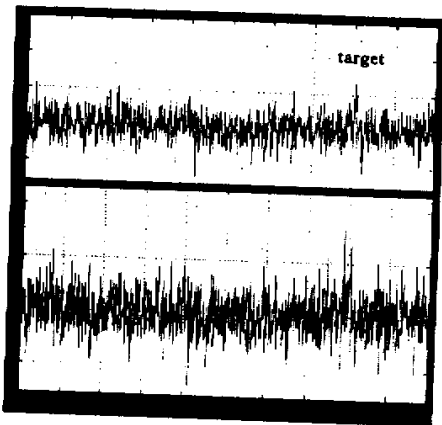


图4 8脉冲原始信号互相关平均值(上)和3脉冲原始信号互相关平均值(下)

Fig.4 Average of 8 pluses original signal multi correlation (up) and average of 3 pluses original multi correlation

信号的信噪比 S/N 为 0.516,直接阈值检测方法根本无法提取目标;经8脉冲原始信号互相关后取平均值,如图4(上),信噪比为 1.5,目标可见。但要实现这种方法,需要激光器提供很高的重复频率,或者目标运动速度极低或为零,因此实际应用有一定困

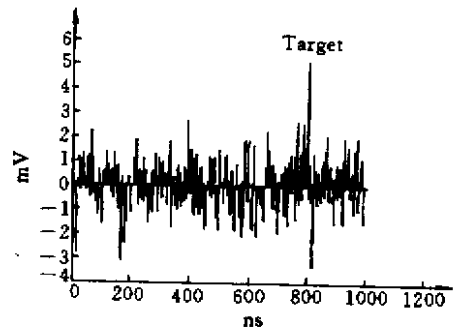


图5 在图4(下)基础上作单脉冲互相关结果,目标凸现

Fig.5 A result of single signal correlation basing on Fig.4 (down). Target is clear

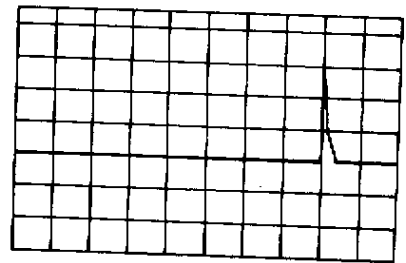


图6 介质散射而发生畸变展宽的信号波形

Fig.6 Distortion waveform of signal due to medium scatter

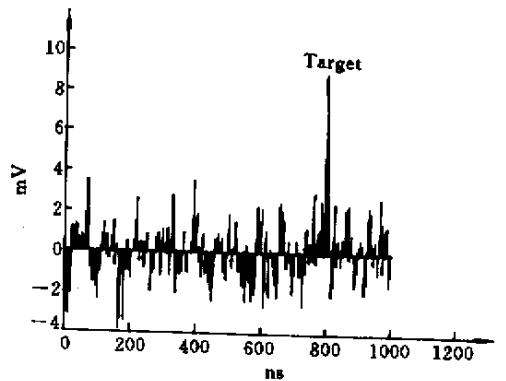


图7 对图6波形的互相关处理结果,噪声与处理程序与上同

Fig.7 A result of single signal correlation basing on Fig. 6. Noise and program are same with above figure. Target is clear

难,我们采取3个极短间隔脉冲一组的处理序列,该发射器指标与美国的门警TBM测距系统发射机^[8]一致,较符合实际需要,3脉冲原始信号互相关后,

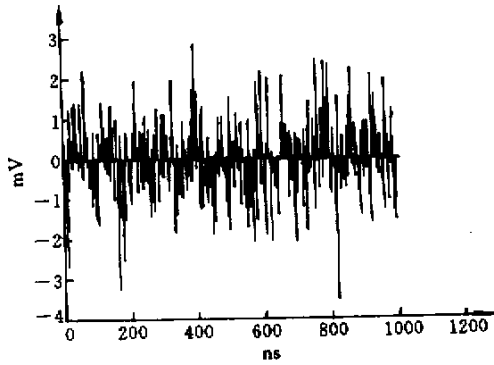


图8 信号幅度更低时的互相关处理结果,噪声与处理程序与上同

Fig.8 A result of more feeble single signal correlation. Noise and program are same as above figure

结果如图4(下),目标探测的信噪比为0.9,仍难以提取回波,再对该合成信号作单脉冲互相关处理,即可获得如图5的目标回波,目标凸现。

由于大气或海水介质散射造成回波沿,特别是后沿变缓,如图6,对于相关处理的影响本文也作了仿真,在噪声及3脉冲处理程序与前相同情况下,处理结果如图7,与图5对比可表明如果不考虑幅值降低的因素,波形畸变对互相关处理结果并没有负面影响,反而有助于信噪比的提高,这个结果对于激光雷达的远程测距具有实际意义,远距离目标激光回波不仅峰值急剧降低,而且大气散射将导致目标回波波形,特别是下降沿被大幅展宽。

3.2 相关检测对测距能力提高的计算

主动探测距离方程为

$$L = \left[\frac{P_s(\lambda) K D_0^2 D^*}{4\Omega(\frac{V_s}{V_n}) \sqrt{A_d \Delta f}} e^{-2k(\lambda)L} \right]^{1/4} \quad (18)$$

式中 L 为探测距离, $P_s(\lambda)$ 为发射功率, K 为利用效率, D_0 为光学系统接收口径, D^* 为探测器的比探测度, Ω_1 为激光发散角, V_s/V_n 为信噪比, A_d 为探测器面积, Δf 为系统带宽, $k(\lambda)$ 为大气衰减系数。

设传统阈值检测法可测距离为 L_1 , 信噪比为 SNR_1 , 脉冲相关法可测距离为 L_2 , 信噪比为 SNR_2 。在其他条件相同的情况下,由(18)式得

$$\frac{L_2}{L_1} = \left[\frac{\text{SNR}_2}{\text{SNR}_1} \right]^{1/4} \left[\frac{e^{-2k(\lambda)L_2}}{e^{-2k(\lambda)L_1}} \right]^{1/4} \quad (19)$$

在能见度较好的情况下 $[k(\lambda) \approx 0.01]$, 且 $L_2 \leq 3L_1 \leq 70 \text{ km}$ (19)式中 $\left[\frac{e^{-2k(\lambda)L_2}}{e^{-2k(\lambda)L_1}} \right]^{1/4} \approx 1$ 则可得

$$\frac{L_2}{L_1} = \left[\frac{\text{SNR}_2}{\text{SNR}_1} \right]^{1/4} \quad (20)$$

结合实际工程情况, $\text{SNR}_1 \geq 6^{[1]}$, 常规测距机 $L_1 = 30 \text{ km}$, 按本文所讨论的信号 $\text{SNR}_2 \leq 0.516$, 由(20)式可得

$$L_2 \geq 64.6 \text{ km}$$

上述仿真及计算已充分证明数字相关检测对弱信号的检测能力已大大超过直接阈值检测,能大幅提高测距能力。但如果信号太弱,处理起来也非常困难,必须用更多极短间隔脉冲^[7]互相关处理或采用镜像共轭数字滤波器进行处理才会更有效。因此具体互相关处理算法对高速运动目标也有一定的适用距离范围。

4 结 论

本文针对激光测距中弱信号信噪比低难以提取的困难,运用数字相关检测技术进行处理,并作了研究和仿真尝试,收到良好的效果。清楚地表明,相关处理技术对激光回波弱信号检测具有稳定性好、实用性强、结构简单等特点,有助于大幅度提高目前激光雷达的测距能力和远程探测概率,有效拓宽激光测距的应用范围。

参 考 文 献

- 1 An Yu-ying. Principle of Photoelectric Detection [M]. Xi'an: Xidian University Publishing Company, 1995. 89 ~ 90 (in Chinese)
- 2 Jürgen Schäfer, Otto Schrems, Georg Beyerle. A modular and mobile multi purpose lidar system for observation of tropospheric and stratospheric aerosols [C]. SPIE, 1995, 2581:130 ~ 135
- 3 John J. Degnan, Jan F. McGarry. SLR2000: Eyesafe and autonomous single photoelectron satellite laser ranging at kilohertz rates [C]. SPIE, 1997, 3218:68 ~ 74
- 4 Zhang Cheng-quan. Manual of Fremdness Military Laser Instrument [M]. Beijing: Weapon Industry Publishing Company, 1989. 30 ~ 33 (in Chinese)
- 5 Sheng Zhou, Xie Shi-qian, Pan Cheng-yi. Probability and Stationary [M]. Beijing: High Education Publishing Company, 1995. 350 ~ 352 (in Chinese)
- 6 Stephen M. Hannon, J. Alex Thomson, Sammy W. Henderson et al.. Agile multiple pulse coherent lidar for range and micro-Dopper measurement [C]. SPIE, 1998, 3380:260 ~ 264
- 7 Chen Gui-ming, Zhang Ming-zhao, Qi Hong-yu. Using MATLAB for Digital Signal and Imaging Processing [M]. Beijing: Science Press, 2000. Chapter 5 (in Chinese)
- 8 Sean McKena, John Yoder. Laser radar technology for airborne theater missile defense [C]. SPIE, 1995, 2472:50 ~ 61