

锁相检测技术在靶场光电测试中的应用

蔡荣立, 燕冲

(西安工业大学 光电工程学院, 西安 710021)

摘要: 现有的靶场光电测试设备, 虽然能够满足靶场测试中对大口径、高速动态目标的测试需求, 但也具有一定局限性, 如天幕靶测速设备为被动式测量原理, 因此主动式测量能够扩展光电测试设备的应用领域。采用一字线型半导体激光器作为主动光源, APD 器件作为光敏接收元件, 通过锁相检测技术获取有效信号。设计了系统总体方案以及相关信号处理电路, 通过理论分析、仿真和实验, 验证了该方法的可行性, 为靶场光电测试技术的深入应用奠定了一定的基础。

关键词: 锁相检测; 微弱信号; 靶场测试; APD

本文引用格式: 蔡荣立, 燕冲. 锁相检测技术在靶场光电测试中的应用[J]. 四川兵工学报, 2014(2): 1-4.

中图分类号: TJ306

文献标识码: A

文章编号: 1006-0707(2014)02-0001-04

Application of Phase-Locked Detection Technology on Testing for Range Optoelectronic

CAI Rong-li, YAN Chong

(School of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710032, China)

Abstract: Existing range optoelectronic test equipment, to some extent, can meet the range tests requirements on large-caliber, high-speed dynamic target. Active measure can extend the optoelectronic test equipment field of application. Using linear semiconductor laser as the initiative light source, APD device as a photosensitive receiver components, we obtain effective signal, design overall system solutions and related signal processing circuit through lock detection technology. Through theoretical analysis, simulation and experiment, we test the feasibility of the method which lays a certain foundation for depth application of the range optoelectronic testing techniques.

Key words: phase-locked detection; weak signal; range test; APD

Citation format: CAI Rong-li, YAN Chong. Application of Phase-Locked Detection Technology on Testing for Range Optoelectronic[J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2014(2): 1-4.

在现代的靶场测试中, 对于高速动态目标, 如弹丸、炮弹等速度的测量, 常用的测量方法按测量原理可分成3类, 即瞬时速度测量法、多普勒原理测量法和平均速度测量法^[1]。其中, 平均速度测量法有很高的精度以及稳定性, 因此它是目前各类弹丸以及炮弹初速度测定的主要方法, 比较典型的光电测试装置为光幕靶与天幕靶, 由于它们的基本工作原理为被动式探测, 因此在应用中具有局限性。随着技术发展, 有研究者提出主动式光电靶, 采用激光反射式原理进行目标探测, 虽然在一定程度上满足了靶场测试中全天候的需求,

但当高速动态目标穿过探测光幕时, 反射及漫反射信号十分微弱, 甚至淹没于噪声中, 信噪比的不足制约了后续信号处理电路的设计, 另一方面, 直接反射式测量也极易受外界杂散光的干扰。因此需要采用有效的方法检测、提取、并放大微弱的回波信号。

根据微弱信号各自的特点, 一般有3种途径将其检测出来: 一是就探测传感器本身而言, 可以降低其和放大器本身的固有噪声, 从而提高其信噪比; 二是结合实际需要研制适合微弱检测原理并能满足要求的器件(如锁相放大器、超导

收稿日期: 2013-10-20

基金项目: 国家自然科学基金(60972005); 西安工业大学“兵器光电测试技术与仪器”科研创新团队资助; 陕西省教育厅基金项目(2013JK1055)。

作者简介: 蔡荣立(1974—), 男, 副教授, 主要从事靶场光电测试技术研究。

红外探测器);三是研究并采用各种微弱信号检测技术,最后提取信号^[2,3]。锁相放大器具有很强的噪声抑制能力,可以将深埋在噪声中的微弱信号检测出来,它是微弱光电信号检测的一种有效手段。本文结合锁相放大技术,考虑到信号的动态特性,设计了基于动态目标主动式光电探测的锁相检测技术及相应的处理电路,成功的捕获、提取了高速动态目标的过靶信号。

1 锁相检测基本原理

锁相检测技术的基本原理为锁相放大器,锁相放大器是一种对交变信号进行相敏检波的放大器。它利用和被测信号有相同频率和相位关系的参考信号作为比较基准,只对被测信号本身和那些与参考信号同频(或者倍频)、同相的噪声分量有响应。因此,能大幅度抑制无用噪声,改善检测信噪比。它主要由信号通道、参考通道和相关器3大部分组成,如图1所示。

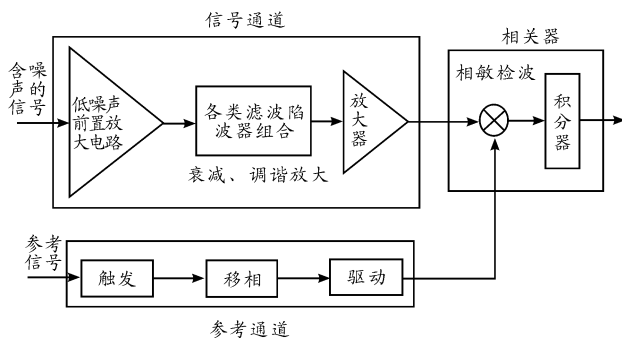


图1 典型锁相放大器原理

相关器是锁相放大器的核心,主要由一个相敏检波(PSD)与一个积分器组成,相敏检波实际上就是一个乘法器,它是相关器的重要组成部分。在放大器工作时,设 $X(t)$ 是伴有噪声的周期信号,其表达式为

$$X(t) = S(t) + N(t) = A\sin(\omega t + \varphi) + N(t) \quad (1)$$

其中: $S(t)$ 为有用信号,其幅值为 A ,角频率为 ω ,初相位角为 φ ; $N(t)$ 为随机噪声。

假设参考信号为

$$Y(t) = B\sin\omega(t + \tau) \quad (2)$$

式中 τ 是时间位移。则两者的相关函数 $R_{xy}(\tau)$ 为

$$R_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T B\sin\omega(t + \tau) [A\sin(\omega t + \varphi) + N(t)] dt = \frac{AB}{2} \cos(\omega\tau + \varphi) + R_{ny}(\tau) \quad (3)$$

由于参考信号 $Y(t)$ 与随机噪声 $N(t)$ 互不相关,所以 $R_{ny}(\tau) = 0$ 于是就有

$$R_{xy}(\tau) = \frac{AB}{2} \cos(\omega\tau + \varphi) \quad (4)$$

由式(4)可知, $R_{xy}(\tau)$ 正比于有用信号的幅值。利用参考信号与有用信号具有相关性^[4-6],以及参考信号与噪声相互独立、互不相关的特性,通过互相关运算削弱噪声的影响。

2 运动目标激光回波检测

2.1 设计方案总体分析

图2所示为总体设计方案,光敏探测元件采用APD雪崩光电二极管,配合光学镜头扩展探测视场,激光器选用半导体激光器。

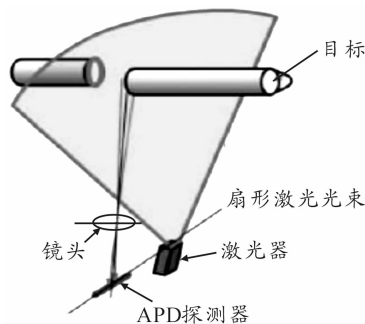


图2 整体设计方案示意图

如图2所示,有效探测光敏面是由激光光幕面及APD接收视场共同决定的,即当运动目标穿过激光光幕时,其回波信号能够反射到APD光敏探测器上。图2中的激光器为一字线型半导体激光器,将APD光电探测器放置在与光幕在同一平面内,并在其上方放置一聚光镜头,当高速运动目标穿过被调制的激光光幕时,其表面反射的激光回波信号通过光学镜头汇聚到APD探测器上,再由APD实现光电转换进行后续信号处理。

2.2 信号处理分析

通过相关理论分析可知APD探测器所探测的信号十分微弱,将会淹没于噪声中,一般有以下3种信号处理方案来对回波信号进行提取。

方案一,设计2个探测电路,同时在激光光幕中放置一分光棱镜,激光光波经分光棱镜后,一部分光返回光敏探测器1并实时探测,另一部分激光光波通过棱镜向外发射,当高速物体通过激光光幕时,由高速物体本身反射的回波信号被光敏探测器2探测,将2个探测信号进行实时的相关处理,可以得到高速物体经过激光光束的信号;

方案二,设计一个探测电路,对信号进行分时采集,先采集静态目标时直接反射的回波信号,再采集高速动态目标穿过光幕时的信号。根据相关检测原理,静态目标回波信号作为参考信号,动态目标回波信号作为被测信号,将这两路信号进行相关处理,得到运动目标穿过光幕时的信号;

方案三,设计一个探测电路,将回波信号经过滤波、放大等处理后,直接与激励调制激光器的调制信号进行锁相检测,通过后续的电路处理,最后得到所需信号。

对以上3种方案进行对比分析,方案一结构较为复杂,需要设计2个探测电路,并且两信号处理电路参数也需要严格的一致,以及放置分光镜,在进行结构设计以及具体实验时有一定的难度,而且激光光束经过分光镜后,透射与反射的激光光波都会相对原来发射激光光波减弱,使得APD所

探测的信号也变弱;对于方案二中,虽然只需要一个探测器件,但需要将回波信号进行存储,然后在进行相关处理,最大的缺点是对探测信号的检测缺少了实时性,同时也需要选择合适的存储芯片,增加相应的外围电路,使得成本增加;方案三中,它很好的克服了方案一与方案二中的不足之处,只需选择一个 APD 探测电路以及相应的处理电路,避免了 2 个电路由于参数不同给最后结果带来的影响,同时结构简单,便于探测与实验,相比方案二,它具有很高的实时性,能准确、实时地处理物体通过激光光束时的探测信号,最终选择方案三,并进行理论分析、仿真与实验。

3 理论分析与仿真

用调制频率为 1MHz 的调制电路来激励半导体激光器,使其产生 1MHz 的正弦激光光波,当高速目标穿过扇形激光光束面时,目标表面反射与漫反射回波信号被 APD 探测器转化为电信号,经后续电路处理与参考调制信号进行相关检测。但是由于激光从发射到经反射被光电探测器所探测,需要经历一段很短的时间,所以相对参考信号会有一定的相位差 φ ,设目标穿过激光光束时与激光发射距离为 h ,则回波信号需“多走” $2h$ 距离,可以计算从发射激光光波到探测到回波信号所经历的时间为 $t = 2h/c$, c 为光速。由公式 $\varphi = \omega t$, $\omega = 2\pi f$,所以相位差 $\varphi = 2\pi ft$,整理有 $\varphi = 4\pi fh/c$,显然 $\varphi \propto h$ 。当激光调制频率一定时,假设 $h = 1.5$ m 时,代入公式有 $\varphi = 2\pi \times 10^{-2}$ rad,即 $\varphi = 3.6^\circ$;若 $h = 3$ m, $\varphi = 7.2^\circ$; $h = 6$ m, $\varphi = 14.4^\circ$ 。通过仿真发现,将所探测的回波信号所产生的相位差考虑在内,由于与标准信号相位之间的相位差较小,理论仿真显示将相位差考虑在内对最后结果几乎无影响。假设调制信号振幅 $A = 1$ V,频率 $f_1 = 1$ MHz,初相位 $\varphi_0 = 0$,如下表达式

$$y_1 = A \sin(\omega t + \varphi_0) = \sin(2\pi t \times 10^6) \quad (5)$$

当高速目标通过所产生的调制激光光波光幕时,回波信号很微弱,设其振幅为 10 mV,弹丸穿过激光光束时与激光发射距离为 h ,那么激光回波信号被探测时相对于发射出的激光光波会有一定的相位差 φ ,回波信号从发射到被探测所经历的时间为 $t = 2h/c$, c 为光速,由公式 $\varphi = \omega t$, $\omega = 2\pi f$,所以相位差 $\varphi = 2\pi ft$,整理有 $\varphi = 4\pi fh/c$,显然 $\varphi \propto h$,若 $h = 3$ m,带入公式得 $\varphi_1 = 7.2^\circ$,设激光回波信号振幅 $B = 0.01$ V,频率 $f_1 = 10^6$ Hz,则其表达式为

$$y_2 = B \sin(\omega t + \varphi_1) = 0.01 \sin(2\pi t \times 10^6 + 7.2^\circ) \quad (6)$$

设扇形激光光束面的厚度 $d = 1$ mm,弹丸长度为 $L = 5$ mm,弹丸速度为 $v = 150$ m/s,则弹丸通过扇形光束面的时间: $t = (d + L)/v = 40 \mu\text{s}$,可设弹丸通过扇形光束面时产生的信号为一正弦信号,有效时间 $40 \mu\text{s}$,设幅值 $C = 0.01$ V,频率 $f_2 = 12.5$ kHz,则其表达式为

$$y_3 = C \sin(\omega_2 t + \varphi_1) = 0.01 \sin(25\,000\pi t) \quad (7)$$

由于在自然状态下存在噪声,在信号的处理过程中会夹杂着噪声,甚至会将所需要有效信号淹没在噪声中,设噪声幅值为 1 V 的白噪声(高斯),回波信号将会淹没于噪声中。当高速目标通过激光光束面时,反射回波信号弹丸信号

与有效信号叠加,在不考虑噪声情况下,其表达式为

$$y_4 = y_2 + y_3 = 0.01[\sin(2\pi t \times 10^6 + 7.2^\circ) + \sin(25\,000\pi t)] \quad (8)$$

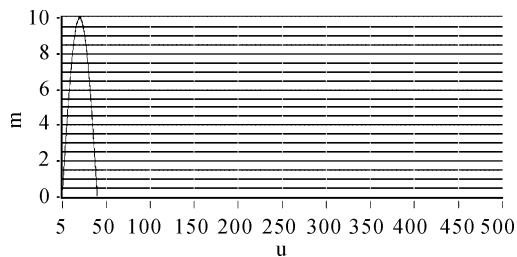


图3 目标信号

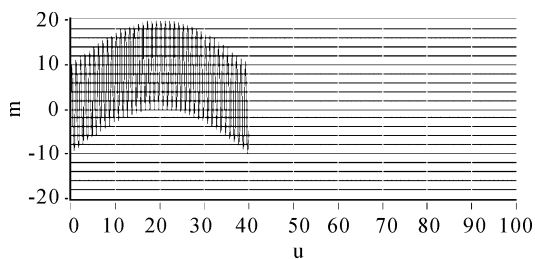


图4 回波叠加信号

由于存在白噪声,弹丸信号、有效回波信号与噪声信号叠加,其中 $N(t)$ 表示噪声信号

$$y_5 = 0.01[\sin(2\pi t \times 10^6 + 7.2^\circ) + \sin(25\,000\pi t)] + N(t) \quad (9)$$

将淹没于噪声中的信号与标准调制信号通过乘法器进行信号处理,其中有效回波信号、弹丸信号以及噪声信号将与标准调制信号进行乘法运算,最后所得的信号

$$y_6 = y_5 \times y_1$$

$$y_6 \approx 0.005[1 - \cos(4\pi t \times 10^6)] + 0.01 \sin(25\,000\pi t) \times \sin(2\pi t \times 10^6) + N(t) \times y_1 \quad (10)$$

采用二阶低通滤波器,其截止频率 12.5 kHz,将经相敏检波器的信号通过所设置的低通滤波器后得到如下所需信号,如图 5 所示,然后再根据实际需要将此信号放大即可。

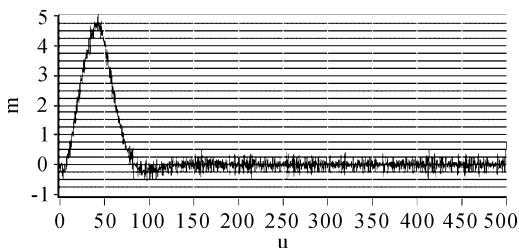


图5 有效信号

4 电路设计

由于 APD 所探测的信号非常微弱不能够进行直接后续处理,因此首先需对探测到的微弱信号进行前置放大处理。APD 工作电路及一级放大电路如图 6 所示。

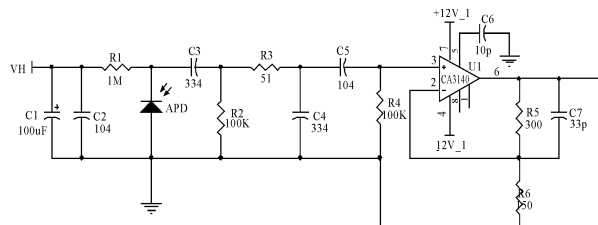


图6 APD工作电路及一级放大电路

图6中,由于APD工作电压为150~300V,经过查阅相关资料以及实验,在进行实验时给APD供电 $VH = 208V$ 的电压, $R1$ 为偏置及限流电阻,APD输出的信号经过带通滤波器(由 $C3$ 、 $C4$ 、 $C5$ 、 $R2$ 、 $R3$ 、 $R4$ 组成)由运算放大器CA3140进行一级放大并输出。

图6输出的信号为带有调制波的高速目标信号,为获取有效信号,依据仿真理论,选用BB公司的模拟乘法器即相敏检波器MPY634,将探测到的信号与激光调制信号分2路同时输入MPY634,经过MPY634乘法运算后的信号再通过二阶无源低通滤波器,得到有效信号。图7为设计的相关器处理电路。

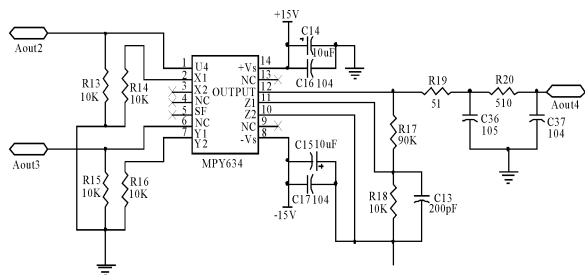


图7 相关器处理电路

经过图7相关器处理后的信号由于比较微弱,因此选用INA103设计二级放大电路对所得信号进行二级放大处理。图8为二级放大电路图。

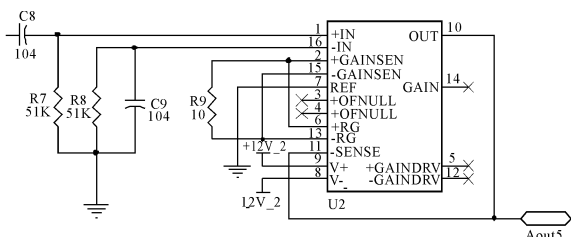


图8 二级放大电路

5 实验与结果分析

为验证设计的正确性,在实验室搭建实验平台:高速运动目标采用电磁发射装置,其发射的目标速度为30 m/s左右,激光器调制频率为30 kHz的正弦信号。实验得到目标穿过激光光幕时带调制的激光回波信号如图9所示,经后续电路处理所得的有效信号如图10所示。

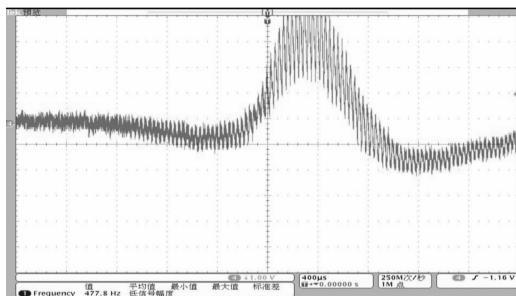


图9 带调制信号的弹丸信号

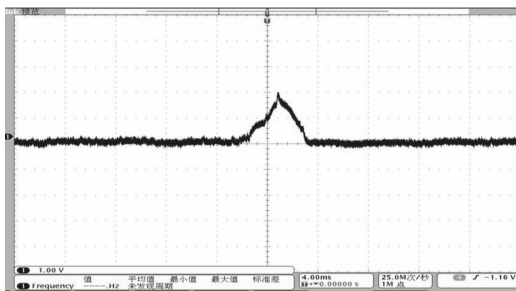


图10 处理后的有效信号

实验结果与分析;通过对所选取的方案进行理论仿真以及现场试验,可见仿真波形图4与实验所得波形图9基本一致,得到带调制的目标信号,经后续电路处理所得的仿真图5与实验所得波形图10基本一致。实际靶场测试应用时,可以通过提高激光调制频率实现更高速目标的测试。

6 结束语

本文将锁相检测技术应用于靶场光电测试中,有效解决了反射式光电测试系统有效信号信噪比不足的问题,成功获取了高速动态目标瞬时信号。针对所提出的设计方案,设计了相关的检测电路与信号处理电路,具有较高的带宽以及良好的信噪比,能够将运动目标反射的微弱回波信号从噪声中提取并放大,最终得到理想的信号。

参考文献:

- [1] 黄战华,刘森.高速动态目标的光电精密测速系统误差分析[J].光电工程,2006(3):58.
- [2] 何兆湘.光电信号处理[M].武汉:华中科技大学出版社,2007:95-96.
- [3] 林凌,王小林.一种新型锁相放大器检测电路[J].天津大学学报,2005(1):1-2.
- [4] 杨汉祥.微弱信号检测技术的研究[J].科技广场,2009(1):27-28.
- [5] 陈兴旺.大口径弹丸光幕靶测速技术[J].四川兵工学报,2012(12):7-8.
- [6] 蔡荣立.基于光幕靶的曳光弹速度测量系统[J].弹道学报,2011(6):92-93.