

文章编号: 1001-3806(2006)02-0212-03

数字正交检波技术在主动探测中的应用研究

赵铭军^{1,2}, 周彬², 胡永钊², 曾晓东^{1*}

(1. 西安电子科技大学 技术物理学院, 西安 710071; 2 中原电子技术研究所, 郑州 450005)

摘要: 提出基于光学系统的“猫眼”效应, 应用单频调制的连续激光, 对扫描式红外热成像目标进行有效探测的新方法。分析了光学系统的后向反射特性, 针对回波信号特征, 提出利用回波信号的相位信息, 采用直接采样的数字正交检波技术实现对低信噪比回波信号的可靠检测, 并在外场试验中应用该方案对实际目标回波信号获得了满意的检测结果。

关键词: 激光技术; 光电对抗; 扫描成像系统; 红外; “猫眼”效应; 正交检波

中图分类号: TN976 **文献标识码:** A

Study of digital quadrature techniques applied in active laser surveillance

ZHAO Ming-jun^{1,2}, ZHOU Bin², HU Yong-zhao², ZENG Xiao-dong¹

(1. School of Technical Physics Xidian University, Xi'an 710071, China; 2 Zhongyuan Research Institute of Electric Technology, Zhengzhou 450005, China)

Abstract Based on the optical system's "cat's eye" effect, a new technique working with single frequency modulated CW laser against IR scanning imaging systems is provided. The retrodirective reflection of the optical systems against the incident laser is discussed and based on the analysis of echo signals' characteristics, a digital quadrature coherent detector is used to detect such signals with low SN ratio and the expected results is obtained in experiments.

Key words laser technique; optoelectronic countermeasures; scanning imaging system; infrared; "cat's eye" effect; quadrature coherent detector

引 言

目前, 红外成像设备已广泛应用于警戒、侦察、火控等领域^[1]。由于该类设备采用被动工作方式, 其自身的辐射特性与周围环境温度相同, 无法从辐射特征上将它与背景区分开; 同时它又与雷达设备不同, 对外没有电磁辐射。这种工作特点使其具有很强的隐蔽性。因此, 在光电对抗技术中, 如何对抗被动工作的红外侦察系统是该领域的一个难题。

1 探测系统原理及组成

1.1 光学系统的后向反射特性^[2,3]

虽然红外系统有很强的隐蔽性, 但它并非是完全隐身、不可探测的, 也存在着自身的弱点。即所有型号的热成像系统都是通过一定口径的光学系统将收集到的目标辐射汇聚到一个高灵敏度的光电传感器上。任何光电传感器都不可能做到对入射光百分之百的吸

收, 它在吸收入射光的同时, 会将部分光信号按原路反射回去。激光主动侦察就是利用光学系统的后向反射特性, 通过对目标反射激光信号的探测实现对目标的有效侦察。光学系统的后向反射特性见图 1。

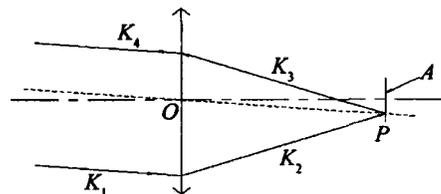


Fig 1 Principle of "cat's eye" effect

在图 1 中, A 为光电传感器的光敏面或望远镜系统分划板的分划面, 该面位于理想正透镜的焦面上, K_1 为某一入射光线, 过 O 点作一直线平行于 K_1 , 交 A 面于 P 点, 根据几何光学成像原理, K_1 经光学系统折射后的光线 K_2 必定经过 P 点; K_2 被 A 面反射后的光线 K_3 可以看作是由 P 点发射出来的光线, 根据几何光学成像原理, K_3 经过光学系统后的出射光线 K_3 也平行于直线 OP, 即 K_3 平行于 K_1 而方向相反。也就是说主动探测激光被目标光学系统反射后仍按原入射方向返回。这个特征与入射激光的方向 K_1 无关, 其限制条件就是入射光 K_1 经过光学系统后能成像在位于系统焦

作者简介: 赵铭军 (1972-), 男, 博士研究生, 主要从事激光雷达、光电对抗方面的工作。

* 通讯联系人。E-mail: xdzeng@xidian.edu.cn

收稿日期: 2005-01-04 收到修改稿日期: 2005-02-25

面上的传感器光敏面上或分划板上并由其反射。

1.2 探测系统组成

根据光学系统的后向反射特性,利用单频调制的连续激光对目标进行探测,同时对目标的反射光信号进行接收、放大和处理。系统组成如图 2 所示。探测

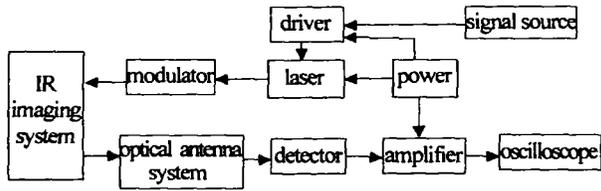


Fig 2 Layout of the experimental system

系统采用连续射频激励 CO₂ 激光器,循环水冷却;应用声光调制技术对发射激光进行单频正弦调制;接收采用透射式光学系统,探测器选用单元光伏 MCT 器件,应用窄带接收技术,增益可控,并通过示波器对接收机输出信号进行观测。

实验中选取射频激励波导 CO₂ 激光器为光源,工作波长 10.6 μm ± 0.1 μm,功率 20W。选用某型号国产红外热像仪作为目标。该型号热像仪帧频约 40Hz 为小双线阵二维扫描成像工作,视场为 6° × 6°。

2 回波信号特征及检测方法研究

2.1 回波信号特征

利用图 2 所示试验系统,对红外热成像系统的实际探测波形如图 3 所示。

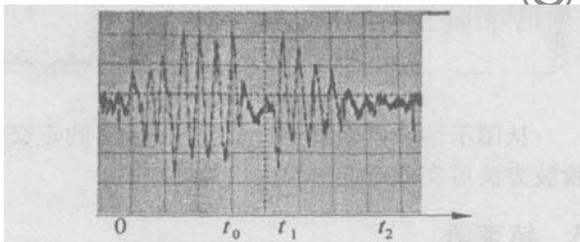


Fig 3 Waveform of echo signals

对该波形的频谱特性进行分析,可以看出该信号是一个有突变点的窄带信号。一个窄带信号的波形方程为: $s(t) = a_s(t) \cos[\omega_0 t + \varphi_s(t)]$ (1) 式中, $f_0 = \omega_0 / (2\pi)$ 称为载波频率,简称载频; ω_0 为载波角频率, $a_s(t)$ 和 $\varphi_s(t)$ 分别称为限带信号的振幅调制波和相位调制波,在一般情况下,它们都是时间的函数,这两部分携带需要的信息。如果信号 $s(t)$ 的频谱

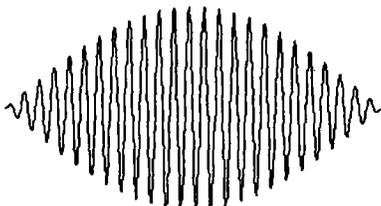


Fig 4 Waveform of narrow band signals

主要成分局限于载频 f_0 附近一个很小的范围内,则信号 $s(t)$ 称为窄带信号。图 4 所示即为振幅调制波 $a_s(t)$ 为正弦信号时的 $s(t)$ 波形。

分析图 3 与图 4 波形的不同,可以发现图 3 波形在中间部分幅值较小,产生了凹点。正是由于该凹点的产生使得实际回波信号的波形函数成为分段函数:当 $0 \leq t \leq t_1$ 时, $s(t) = a_s(t) \cos[\omega_0 t + \varphi_s(t)]$; 当 $t_1 \leq t \leq t_2$ 时, $s(t) = 0$ 当 $t_2 \leq t \leq t_3$ 时, $s(t) = a_s(t) \times \cos[\omega_0 t + \varphi_s(t)]$ 。该信号中由于含有突变点,信号的频谱成分增加,但仍可应用窄带信号处理方法对之进行检测。

2.2 检测方法

2.2.1 正交相干检波^[4,5] 一个窄带随机相位信号可以表示为:

$$s(t) = a(t) \cos[\omega_0 t + \varphi_s] = a(t) \cos\omega_0 t \cos\varphi_s - a(t) \sin\omega_0 t \sin\varphi_s = s_i(t) \cos\omega_0 t - s_q(t) \sin\omega_0 t \quad (2)$$

式中, $s_i(t)$ 和 $s_q(t)$ 称为 $s(t)$ 的两个正交分量, $f_0 = \omega_0 / 2\pi$ 为载频, $a(t)$, φ_s 分别为包络和相位,且有如下关系:

$$a(t) = \sqrt{s_i^2(t) + s_q^2(t)} \quad (3)$$

$$\varphi_s(t) = \arctan \frac{s_q(t)}{s_i(t)} \quad (4)$$

$$s_i(t) = a(t) \cos\varphi_s \quad (5)$$

$$s_q(t) = a(t) \sin\varphi_s \quad (6)$$

在该信号中,两正交分量的幅度、相位关系反映了信号特征,在解调过程中,两正交分量的相对关系必须严格保持,两通道的幅度一致性及采样信号的正交性是获得高质量信号的两个重要因素。

2.2.2 模拟正交相位检波方法^[6] 对模拟窄带信号实现正交处理的传统方法是零中频双通道正交检波技术,如图 5 所示。它通过对模拟正交相位检波器的输

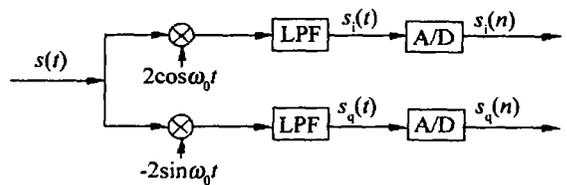


Fig 5 Principle of an analog quadrature coherent detector

出进行 A/D 转换得到数字化正交数据。先对输入中频信号乘以本振信号 $2\cos(\omega_c t)$,经低通滤波器(LPF)滤除 $2\omega_0$ 分量以后,得到正交双路低频信号。

对于同相支路,有:

$$s_i(t) = s(t) \times 2\cos\omega_0 t = 2a(t) [\cos\omega_0 t \cos\varphi_s - \sin\omega_0 t \sin\varphi_s] \cos\omega_0 t = 2a(t) \left[\frac{1}{2} (1 + \cos 2\omega_0 t) \cos\varphi_s - \frac{1}{2} \sin 2\omega_0 t \sin\varphi_s \right] \quad (7)$$

上式的结果通过低通滤波器滤除 $2\omega_0$ 的分量,得:

$$s_i(t) = a(t) \cos\varphi_s \quad (8)$$

类似地对正交支路有:

$$s_q(t) = a(t) \sin\varphi_s \quad (9)$$

两正交分量既保留了信号的幅度信息,又保留了信号的相位信息,且:

$$a(t) = \sqrt{s_i^2(t) + s_q^2(t)} \quad (10)$$

$$\varphi_s(t) = \arctan \frac{s_q(t)}{s_i(t)} \quad (11)$$

这就是零中频处理技术。在这种处理方法中,由于解调、滤波都是用模拟器件实现,精度、稳定性和两路正交信号的一致性都不高,混频器存在直流偏移, A/D 转换器之间也难以保持一致,采样后两路信号不可避免的存在相位不正交和幅度不平衡现象,会对后端的信号检测带来较大误差。

2.2.3 数字直接采样方法 为从根本上解决模拟正交相位检波方法两路信号间正交误差和幅度不平衡问题,伴随着高速 A/D 的出现,与传统的方法不同,可以使输入信号通过带通滤波器 (BPF) 后,对中频信号进行直接采样,再对变换后的数字信号进行处理得到所需的正交双通道数据的处理方法。如图 6 所示。

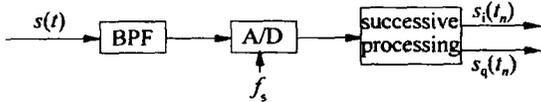


Fig 6 Layout of direct digital sampling

要对中频信号进行直接采样,首先要保证采样后的信号频谱不发生混叠,这就要求信号的载频、带宽 (绝对带宽而非 3dB 带宽) 和采样频率 f_s 之间应满足一定的关系。根据采样定理,采样频率与信号带宽之间关系为 $f_s \geq 2B$, 同时采样频率和信号载频 f_0 之间还应满足下面关系:

$$f_0 = (2M - 1)f_s/4 \quad (12)$$

式中, M 为任一整数,但取值不应太大,以避免载波频率较高时在 A/D 转换器的孔径时间内产生不确定性,一般取 $M = 1$ 或 2 。同时在中频采样时为实现方便,一般取 $f_s = 2B$ 或 $4B$, 前者为采样定理要求的最低采样速率,在实际应用中更多的是取 $4B$, 这有利于后端的滤波处理。

2.3 检测方案及结果

2.3.1 实验检测方案 在本系统的信号检测中,由于载波信号频率较低,故无须进行零中频处理,采用数字直接采样正交处理方法,如图 7 所示。

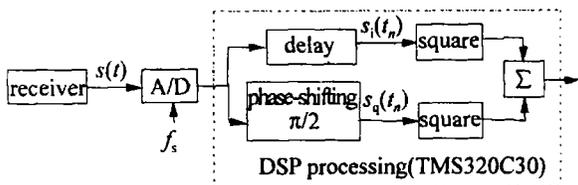


Fig 7 Structure of experimental detection scheme

接收机输出信号:

$$s(t) = a(t) \cos[\omega_0 t + \varphi_s] \quad (13)$$

经采样、延迟后得到:

$$s_i(t_n) = a(t_n) \cos[2\pi f_0 \frac{t_n}{f_s} + \varphi_s] \quad (14)$$

对之移相 $\pi/2$ 后得到:

$$s_q(t_n) = a(t_n) \cos[2\pi f_0 \frac{t_n}{f_s} + \varphi_s + \frac{\pi}{2}] = -a(t_n) \sin[2\pi f_0 \frac{t_n}{f_s} + \varphi_s] \quad (15)$$

二者平方求和后,得到:

$$s(t_n) = \sqrt{s_i^2(t_n) + s_q^2(t_n)} = a(t_n) \quad (16)$$

2.3.2 检测结果 针对图 3 所示回波信号,通过高速 A/D 对输出波形进行采样。图 8a 图 8c 为根据 A/D 转换器输出数据还原图形,其单个波形扩展后与图 3 相同;图 8b 图 8d 为根据检测方案得到的仿真检测图形。

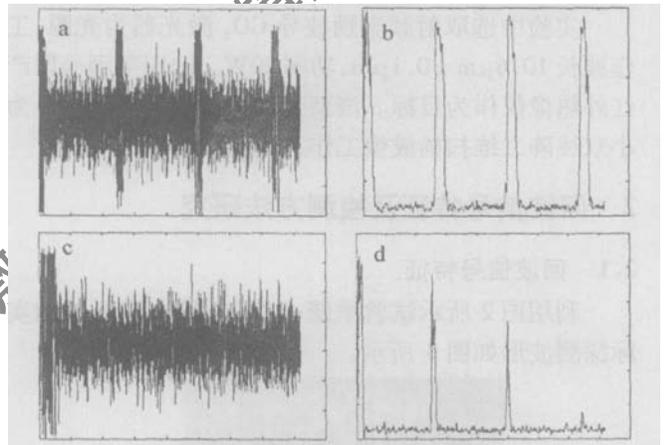


Fig 8 Echo signals' detection results

从图示结果可以看出,采用直接采样的正交相位检波方法可实现对低信噪比信号检测。

3 结束语

利用红外热成像设备光学系统存在的后向反射特性,应用连续调制的激光技术可以实现对目标的有效探测。在回波信号检测中,不同于传统的模拟正交检波方法,可采用直接采样的数字正交检测技术来实现对低信噪比回波信号的可靠检测。应用该方案能够有效地从背景回波中提取出目标信号,并能识别目标的工作参数,是对目标进行有效干扰的基础。

参 考 文 献

[1] MEI S Sh. Optoelectronic technology — a star in the information equipments [M]. Beijing National Defence Industry Press, 1999. 1~21 (in Chinese).
 [2] MA H Zh. Study on the reflective characteristics of the targets and the "cat's eye" effect [J]. Laser Technology, 2003, 27(6): 600~602 (in Chinese).

(下转第 224 页)

参数: $c_x = 319.72$, $c_y = 242.06$, $k_1 = 8.87 \times 10^{-7}$, $k_2 = 1.19 \times 10^{-12}$ 。利用这组畸变参数校正图 6a 得到校正图像 (见图 6b)。

应用得到的畸变参数校正该摄像机拍摄的其它图像,其效果如图 7 和图 8 所示。从视觉效果来看,畸变图像经过校正后都得到恢复 (通过观察图中的直线可以得到这个结论),由此验证了前面提出的标定方法的正确性。

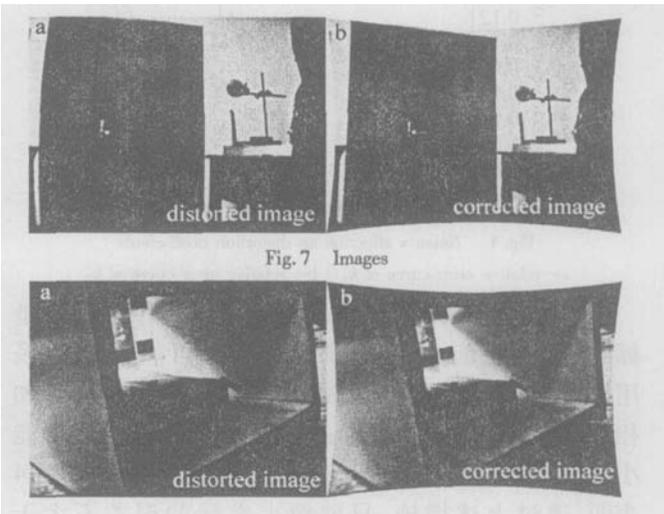


Fig 8 Images

4 结 论

用共线点列标定镜头的畸变参数,可以用射影的交叉比不变性确定畸变中心,用共线不变性确定畸变系数。仿真结果表明,只要目标所在直线不靠近畸变

中心,并采用高质量物点列、高精度的亚像素技术 (比如相关法^[6])、多次拍摄取像点坐标的平均值,这种方法是可行且有较高的精度,镜头畸变较大时尤其如此。实验表明,用该方法得到的畸变系数值,可以很好的校正畸变图像。由于这种方法只需要一组排列成直线的物点,所以简单易行,可应用于相关领域。

参 考 文 献

- [1] GANAPATHY S. Decomposition of transformation matrices for robot vision [A]. Proceedings of the 1st IEEE Conference on Robotics [C]. Atlanta: IEEE, 1984: 130~139.
- [2] PAQUETTE L, STAMPFLER R, DAVIS W A *et al*. A new camera calibration method for robotic vision [J]. Proc SPIE, 1990, 1395: 656~663.
- [3] ZHUANG H Q, WANG K C, ROTH Z S. Simultaneous calibration of robot and a hand mounted camera [J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1995, 11(5): 649~660.
- [4] TSAIR Y. A versatile camera calibration technique for high accuracy 3-D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lens [J]. IEEE Journal of Robotics and Automation, 1987, 3(4): 323~344.
- [5] WENG J Y, COHEN P, HEMDU M. Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, 14(10): 965~980.
- [6] ZHU J G, LUO M, TAO G Z. Model and solution of camera lens' distortion center [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 1998, 19(1): 84~90 (in Chinese).
- [7] PRESCOTT B, MCLCAN G. Line-based correction of radial lens distortion [J]. Graphical Models and Image Processing, 1997, 59(1): 39~47.
- [8] YU Q F, LU H W, LU X L. Precision measurement and movement measurement based on imaging [M]. Beijing: Science Press, 2002: 118~122 (in Chinese).

(上接第 214 页)

- [3] ZHAO X J, GAO Zh Y, ZHANG Y Y. Technique of active laser reconnaissance and the applications in the military [J]. Optical Technique, 2003, 29(4): 414~416 (in Chinese).
- [4] ZHAO Sh J. Theory of signal detection and estimation [M]. Xi'an: Xidian University Press, 1998: 15~70 (in Chinese).
- [5] CHEN C K. New approaches for the design of minimal quadrature mirror filters with continuous and powers of two coefficients [J]. Signal Processing, 1997, 56(2): 269~278.
- [6] SINSKY A I, WANG P C P. Error analysis of a quadrature coherent

detector processor [J]. IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems, 1974, AES-10(5): 880~883.

- [7] ZHENG X F, ZENG T, ZHU Sh Y. Intermediate frequency sampling based on the Hilbert transform and its hardware implementation [J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2004, 24(1): 57~60 (in Chinese).
- [8] RICE DW, WUK H. Quadrature sampling with high dynamic range [J]. IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems, 1982, AES-18(4): 736~739.