

基于双谱的猫眼目标激光一维距离像特征提取

张廷华^{1,2},倪国强¹,高 昆¹,樊桂花²,孙华燕²

(1. 北京理工大学,北京 100081;2. 装备学院,北京 101416)

摘 要:为了验证一维距离像用于光学目标分类识别的可行性,解决复杂环境和远距离条件下光学目标的探测和识别难题,首次尝试利用激光一维距离像识别具有不同光学参数的猫眼目标,并提出基于双谱的激光一维距离像的稳定特征提取方法。该方法通过信号积累和滤波处理来提升复杂背景下的作用距离和回波信噪比增益,利用双谱计算同时实现远距离目标探测和猫眼目标的稳定特征提取;并通过奇异值分解和主分量计算降低双谱特征提取的运算量;通过处理不同距离、类型及入射角的真实数据样本,验证双谱特征的稳定性和有效性。该方法可以识别具有猫眼效应的光学目标和角反射器,与现有方法比较,具有远距离、低信噪比探测和识别的优点。

关键词:特征提取;猫眼效应;距离像;双谱;激光主动探测;奇异值分解

中图分类号:TN249 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2017.03.017

Feature extraction from “cat-eye” targets’ laser range profile based on bi-spectrum

ZHANG Ting-hua^{1,2}, NI Guo-qiang¹, GAO Kun¹, FAN Gui-hua², SUN Hua-yan²

(1. Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 2. The Academy of Equipment, Beijing 101416, China)

Abstract: To verify the feasibility of optical target recognition from laser one-dimensional range profile, laser one-dimensional range profile was used to detect and recognize “cat-eye” targets with different parameters, and a feature extracting method of laser one-dimensional range profile based on bi-spectrum is proposed. Operating range and the SNR gain of laser returns under complicated backgrounds can be improved by signal accumulation and filtering process. And, the remote target detection and robust feature extraction of “cat-eye” targets were realized by using bi-spectrum calculation. By using singular value decomposition and principal component analysis, the computation of the bi-spectrum can be reduced. Lastly, the robustness and effectiveness of the eigenvector were verified by analyzing the real data samples of different distances, types and incidence angles. Compared with other methods, the method can recognize “cat-eye” target and corner reflector, and have the advantages of far operation range for low SNR target.

Key words: feature extraction; “cat-eye” effect; range profile; bi-spectrum; active laser detection; SVD

1 引 言

猫眼效应产生的反射光具有原路返回和高能量的特点,在激光跟踪测量、逆向通信和激光主动探测等领域得到广泛应用^[1-2]。激光主动探测系统利用

光学目标的猫眼效应,搜索敌方目标的光学设备和光电传感器,确定其位置引导实施准确攻击,是光电侦察的重要手段之一,尤其是对空间光学系统的探测和识别具有较高的军事价值^[3]。

光学目标产生的“猫眼反射”、“近似猫眼反射”和各镜片产生的“剩余反射”回波能量较强,其与背景和大气后向散射产生的回波能量相差 2~4 个量级,这种回波差异是激光主动探测光学目标的重要依据^[3]。猫眼效应产生的反射光具有原路返回特性和准直特性,因此其回波强度和信噪比较高,可以远距离探测和精确定位目标。

目前,对于猫眼目标的探测识别主要有两种途径。一种是通过激光光源照射目标,采用能量探测或成像探测器件分析其回波信号特征^[4-5],包括回波波形、幅值、脉宽和频率等。该方法对于不同目标、激光器和传输条件,不具有稳定特征,对回波信噪比要求高。对于采用离焦、圆孔阵列等防护措施光学目标^[6],现有算法需要进一步提高信噪比增益和鲁棒性。且该方法难以区分角反射器和猫眼目标,对于同类猫眼目标无法识别光学系统自身的结构特征和性能参数,如焦距、口径等。

另一种是利用特殊光源进行照射,如相关光源、阵列光源等^[7-8],通过光学目标对光源的调制分析目标特征,该方法要保持光源的相干或调制特性,对光源和探测系统性能有较高要求,且作用距离有限。

针对空间光学系统猫眼效应的探测识别,需要解决问题是目标距离远、卫星平台可能存在角反射器。本文尝试利用激光一维距离像的方法实现远距离、低信噪比条件下猫眼目标的探测识别,重点区分角反射器和猫眼目标,对于同类猫眼目标识别其入射角和口径。为提高算法的信噪比增益和鲁棒性,提出基于双谱的激光一维距离像稳定特征提取方法,利用奇异值分解和主成分分析方法降低算法的运算量。通过实验验证和数据分析证明了利用激光一维距离像识别猫眼目标方法的可行性,验证了双谱特征提取方法的有效性和鲁棒性。

2 猫眼目标的双谱特征提取

激光一维距离像的波形特征与激光的功率和入射角、目标的材质、形状、尺寸,接收光学的视场等相关^[9-10]。由于探测系统和目标相对位置的改变导致目标的距离像发生较大变化,导致距离像具有方位敏感性、幅度敏感性以及平移敏感性。而光学目标的猫眼效应保证了跟踪目标光学系统在一定的方位角范围内,探测光束可以原路返回,克服了方位敏感性;运动目标的距离信息可以由探测回波的飞行时间间隔获得,通过滑动对齐的方法可以克服平移敏感性;通过提取特征或采样数据的归一化,可以克服幅度敏感性。因此,光学目标的猫眼效应可以克

服常规目标一维距离像识别中的方位和平移敏感性,而一维距离像可以反映光学系统自身的结构特征。

由于双谱具有平移不变性,同时保留数据的部分相位信息,且对任意对称分布的噪声不敏感,是运用较为广泛的一种高阶谱特征提取方法。但经其处理后特征维数极大增加,限制了其应用。因此在构造识别算法前迫切需要降低维数,奇异值分解法将变换后的双谱看作一个矩阵,利用奇异值分解后稳定性较高的奇异值向量作为样本特征^[11]。主成分分析法在保留原有特征信息的前提下,将高维空间的问题转化到低维空间去处理,使所提取的特征更加简单、直观,可以进一步简化特征识别运算过程。根据以上分析,光学目标双谱特征提取数据处理流程如图 1 所示。

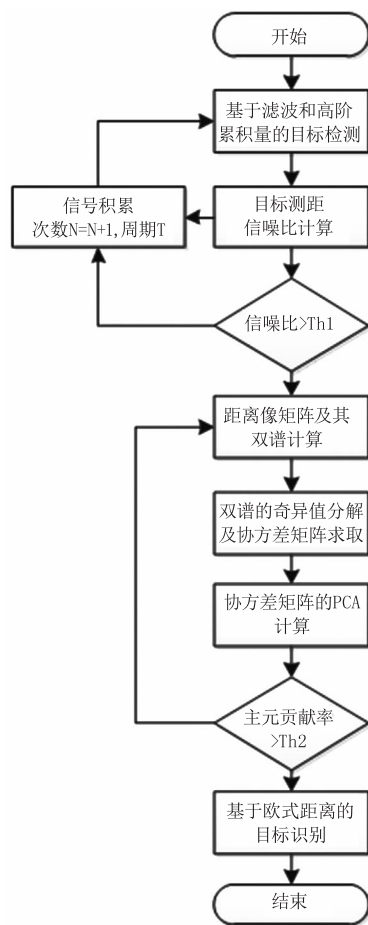


图 1 猫眼目标双谱特征提取算法流程

Fig. 2 The bi-spectrum feature extraction algorithm for cat-eye targets

信号处理流程说明:

步骤 1, 一维距离像预处理: 为保证双谱提取特征的稳健, 经仿真验证, 需要采集的一维距离像信号具有较高的信噪比, 且信号降噪处理的过程不能改

变原始数据的基本特征。因此采用信号积累和带外滤波的处理方式,其带外滤波的信噪比增益尤为明显,且方法简单可以实时实现^[12]。

$$z(n) = \frac{1}{K} \sum_{i=0}^{K-1} x(n-i) \quad (1)$$

式中, K 为滤波器一次处理信号采样点数。随着 K 的增大,噪声的抑制效果提升,但滤波器会产生过大的延时,信号也可能受到损失。运算中平滑滤波的长度和三阶累积量的长度取信号的宽度。为进一步提升信噪比,采用高阶累积量抑制带内噪声^[13]:

$$c_{3x}(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x^3(n+k) \quad (2)$$

式中, N 为信号的高阶累积量运算所需采样点数, N 应该近似等于真实回波信号的采样点数。目标探测门限设定为处理后信号最大值的二分之一,即达到信号和噪声的峰峰比为2:1的情况下,虚警概率小于0.5%。

步骤2,目标探测和信号积累:利用三阶累积量探测目标和测距,可以认为目标出现数据大致分布在采集数据的位置,通过信噪比计算判定是否需要增加信号积累次数,通常进行3次积累即可满足要求,累积采用滑窗累积方法计算公式如公式(3)。以激光发射的主波为起始点,截取含有目标的多段一维距离像数据,构成一维距离像数据矩阵。对数据矩阵的每一维数据进行双谱变换计算,得到双谱变换矩阵,该数据量较大,需要进一步降维处理。

滑窗累积计算公式如下:

$$y(n) = \sum_{j=0}^{M-1} x(n+jL) \quad (3)$$

式中, M 为累积次数; L 为脉冲间隔内的采样点数。

双谱计算公式如下:

$$B(\omega_1, \omega_2) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_{3x}(m, n) \cdot W(m, n) e^{-j(\omega_1 m + \omega_2 n)} \quad (4)$$

其中:

$$d(k) = \begin{cases} \frac{1}{\pi} \left| \sin \frac{\pi k}{L} \right| + \left(1 - \frac{|k|}{L}\right) \left(\cos \frac{\pi k}{L}\right) & |k| \leq L \\ 0 & |k| > L \end{cases} \quad (5)$$

$$C_{3x}(m, n) = \text{Cum}(x(k), x(k+m), x(k+n)) \\ = E\{x(k)x(k+m)x(k+n)\}$$

步骤3,双谱变换的奇异值分解:对数据矩阵的双谱变换结果进行降维,采用奇异值分解的方法。首先对双谱变换矩阵求取SVD,采用Matlab中的svd函数实现。奇异值分解后得到的数据矩阵如下式:

$$x_{ik} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1p} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2p} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{np} \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中, n 为样本数目; p 为特征数目。 $i=1,2,\dots,n$; $k=1,2,\dots,p$,为了计算方便,可选取适当的值使 $n=p$ 。

然后对数据进行标准化处理,降低幅值敏感性。标准化处理:

$$x_{ik} = \frac{x_{ik} - \bar{x}_k}{\sigma_k} \quad i=1,2,\dots,n; k=1,2,\dots,p \quad (7)$$

其中, $\bar{x}_k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{ik}$, $\sigma_k^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_{ik} - \bar{x}_k)^2$ 。

经过奇异值分解后,得到的双谱奇异值分解矩阵中大部分奇异值分解后的数据归0,剔除这些信息贡献低的数据,降低了数据矩阵的数据量。

步骤4,双谱奇异值分解降维矩阵的协方差矩阵的主分量提取:求取双谱奇异值分解矩阵的协方差矩阵、特征值和特征向量。数据矩阵 x_{ik} 的协方差矩阵公式如下:

$$C_x = \text{cov}(x_{ik}) = \begin{bmatrix} C_{11} & \cdots & C_{1p} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ C_{p1} & \cdots & C_{pp} \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中, C_x 的 p 个特征值 λ_k 及相应特征向量 ϕ_k ,其中 $k=1,2,\dots,p$ 。

将协方差矩阵的特征值进行排序,选择最大的几个特征值及其对应的特征向量,计算前 m 个主元的累积贡献率 $\eta(m)$:

$$\eta(m) = \sum_{k=1}^m \lambda_k / \sum_{k=1}^p \lambda_k \quad (9)$$

主元的累积贡献率 $\eta(m)$ 可以用来衡量特征值及特征向量表征全体数据的健全和稳定程度,如果 $\eta(m) \geq 90\%$,可以认为算法提取的特征向量矩阵可以代表整个数据矩阵的特征,可以作为目标分类的依据,否则重新选择样本进行特征提取。

步骤5,基于欧氏距离的猫眼目标分类识别:以前 m 个主元对应的特征向量计算向量之间的欧式距离:

$$D(m) = \sum_{k=1}^m (\phi_{1k} - \phi_{2k})^2 \quad (10)$$

其中, ϕ_{1k}, ϕ_{2k} 分别为目标1和目标2获得的一维距离像的双谱特征矩阵的特征向量。理论上,同类目标相似度越高,计算结果越接近于0。

3 实验验证及分析

根据基于猫眼效应的光学目标的主动探测识别基本原理和应用环境可知,目标分类识别的难点在于如何剔除与猫眼目标可能具有相同回波强度的镜面反射目标和也具有原路返回特性的角反射器,从而识别出光学系统。本文实验数据获取如图 2 所示。

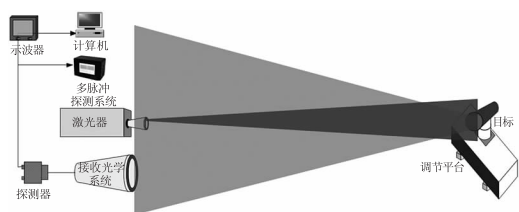


图 2 实验数据获取示意图

Fig. 2 Schematic diagram of experimental data acquisition

选取 3 km 和 17.3 km 处的角反射器和成像光学系统作为研究对象,考虑激光正入射和斜入射两种情况。实验利用 NI 高速采集卡采集真实回波信号,并导入计算机,利用 Matlab 做算法处理,利用本文提出的算法进行处理结果如图 3 所示。激光光源采用高重频激光器,输出波长 532 nm,发散角 6 mrad,最大功率 40 W,重频 10 kHz,脉冲宽度 100 ns;接收光学系统口径 150 mm,探测器采用光电倍增管;测试光学目标为空间相机样机,口径 350 mm;角反射器边长 35 mm;NI 采集卡采样频率 500 Mfps。数据采样数 100,累积次数 3 次,累积后截断数据矩阵为 400×400 ,标准化的双谱奇异值分解矩阵为 40×40 ,主元贡献率大于 90% 的特征向量取前 4 个。图 3 中 (a)、(d)、(g)、(j) 分别为 17.3 km 距离上猫眼目标、角反射器、3 km 距离上猫眼目标、角反射器的累积后截断数据矩阵;(b)、(e)、(h)、(k) 分别为不同距离和目标对应的标准化的双谱奇异值分解矩阵;(c)、(f)、(i)、(l) 分别为不同距离和目标对应的主特征向量矩阵。

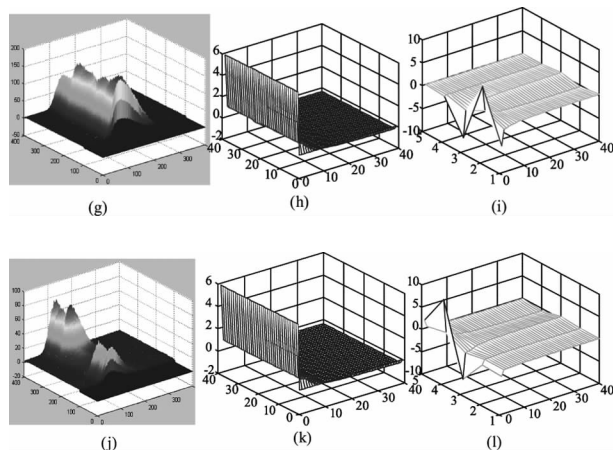
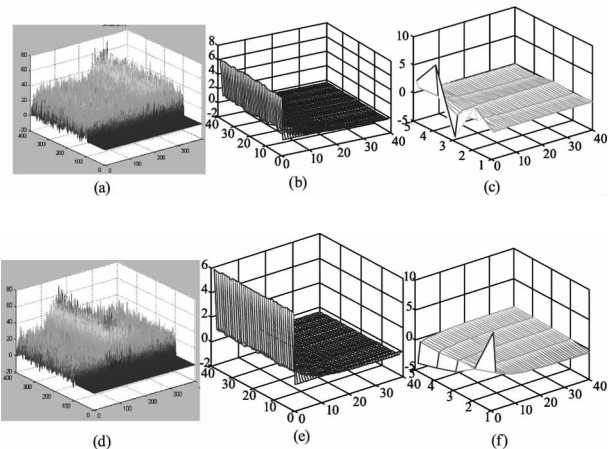


图 3 角反射器(3 km)双谱特征提取结果

Fig. 3 The bi-spectrum of Corner reflector(3 km)

主要验证奇异值分解的双谱特征的稳定性和提取的特征向量用于目标分类识别的有效性。

(1) 双谱特征向量选取的稳定性:通过双谱特征提取求取的前 4 个主元的累积贡献率均大于 98%,如表 1 所示。由主元贡献率可以判断 400×400 的数据矩阵可以通过双谱的奇异值分解得出少于 4 个特征向量的稳定表征,用以分类器进一步分类识别。通过连续的降维求取的稳定特征向量,可以作为信号类别的判决依据。

表 1 光学目标双谱奇异值分解主元贡献率

Tab. 1 The principal component contribution rate of bi-spectrum singular value decomposition

光学系统	距离	入射角度	主元贡献率
光学相机	17.3 km	正入射	99.37%
	3 km	正入射	99.358%
	3 km	斜入射	99.76%
角反射器	17.3 km	正入射	98.69%
	3 km	正入射	99.76%
	3 km	斜入射	99.89%

(2) 双谱特征向量选取的有效性:计算原始一维距离像矩阵和双谱奇异值分解矩阵的相关系数可知,原始数据除了自相关为 1,其余向量之间的相关系数均较低,无法判别为同一类目标,且由于积累运算引入部分相关性;双谱的奇异值分解矩阵相关系数主要分布于 1,证明向量之间具有明显的相关性,可以初步判定属于一大类目标。采用欧式距离判别标准对提取的不同目标进行分类,数值越小说明特征向量越相近,可以判定为同一类目标。表 2 中以 3 km 处成像光学系统作为参考目标,判别 17.3 km 和 3 km 正入射和斜入射情况下的

猫眼目标和角反射器,结果是角反射器的特征向量与参考目标的特征向量欧氏距离始终大于光学系统的欧氏距离,可以做分类依据。同理可知,以 17.3 km 处相机为参考目标,不能识别 3 km 处相机和角反射

器,如表 2 中黑体数据为错误分类结果,但可以识别 17.3 km 处的相机和角反射器;以 3 km 角反射器为参考目标,可以识别 3 km 处的正入射/斜入射的光学镜头和角反射器,不能识别 17.3 km 处目标。

表 2 按欧氏距离对目标激光一维距离像进行分类结果

Tab. 2 Classification results of target laser range profile by Euclidean distance

识别目标参考目标	17.3 km 相机 1 正入射	17.3 km 相机 2 正入射	3 km 相机 正入射	3 km 相机 斜入射	17.3 km 角反射器 正入射	3 km 角反射器 正入射	3 km 角反射器 斜入射
3 km 相机(正)	1.0259	0.99125	0	0.007162	1.0971	1.1791	1.2039
3 km 相机(斜)	1.0302	0.98993	0.007162	0	1.0959	1.1775	1.2083
17.3 km 相机(正)	0	0.83607	1.0259	1.0302	1.8211	0.63153	0.5989
3 km 角反射器(正)	0.63153	1.2995	1.1791	1.1775	2.0888	0	0.81331
3 km 角反射器(斜)	0.5989	1.0058	1.2039	1.2083	1.8269	0.81331	0

一维距离像具有角度敏感性,但双谱不具有旋转不变性,如何利用双谱实现同一类目标的角度变化较大情况下的探测识别是问题的关键。利用光学目标的“猫眼效应”进行探测,其回波信号的能量强度与角度有关,当探测激光正入射时其回波信号最大,且其与目标体漫反射回波信号存在量级差异;由于角反射器的入射视场较大,其回波信号随入射角变化幅度波动较小,与光学目标存在明显差异。因此可以利用多次回波信号探测作为辅助判据,进行目标识别。

4 结 论

根据实验数据分析,以近距离、高信噪比激光一维距离像的双谱特征向量矩阵作为先验知识,可以有效识别不同距离、不同入射角度的光学系统和角反射器,也可以通过测量不同距离上的猫眼目标或角反射器的一维距离像,构建数据库,对相同距离上的目标进行分类。这一结论对于激光主动探测系统实际应用具有重要的理论价值。

本文根据空间光学系统猫眼效应探测识别需求,从提高光学目标的激光主动探测距离和提取光学目标稳定特征两方面入手,提出了多脉冲激光回波信号处理算法和激光一维距离像双谱特征的提取及降维方法,验证了利用双谱特征识别猫眼目标一维距离像的可行性,解决了远距离探测和区分角反射器等难题,对于激光主动探测空间光学目标具有较高的应用价值。

参考文献:

[1] SUN Huayan, ZHAO Yanzhong, ZHENG Yonghui. Re-

search and application of active laser detection technique based on cat-eye effect[J]. Journal of Equipment Academy, 2012, 23(6): 6-12. (in Chinese)

孙华燕,赵延仲,郑永辉. 基于猫眼效应的激光主动探测技术研究与应用[J]. 装备学院学报, 2012, 23(6): 6-12.

[2] ZHANG Laixian, SUN Huayan, FAN Guihua, et al. Progress in free space optical communication technology based on cat-eye modulating retro-reflector[J]. Chinese Optics, 2013, 6(5): 681-690. (in Chinese)

张来线,孙华燕,樊桂花,等. 猫眼逆向调制自由空间激光通信技术的研究进展[J]. 中国光学, 2013, 6(5): 681-690.

[3] LU Jun, WANG Tingfeng, LI Yuanyang, et al. Active laser detection of cat's eye effect for space-based off-axis three mirror optical system[J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(7): 1948-1956. (in Chinese)

陆君,王挺峰,李远洋,等. 空间激光主动探测离轴三反系统的猫眼效应[J]. 光学精密工程, 2015, 23(7): 1948-1956.

[4] WU Dongsheng, BAI Tingzhu, LIU Binqi, et al. Dynamic imaging detection and target recognition for cat-eye effect echo[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(8): 0811003-1-0811003-6. (in Chinese)

武东生,白廷柱,刘秉契,等. 猫眼效应回波的动态成像探测与目标识别[J]. 光学学报, 2013, 33(8): 0811003-1-0811003-6.

[5] YANG Mingyu. Detecting of photoelectric peeping devices based on active laser detection[J]. Chinese Optics, 2015, 8(2): 255-262. (in Chinese)

杨名宇. 利用激光主动探测技术实现光电窥视设备检

- 测[J]. 中国光学, 2015, 8(2): 255 - 262.
- [6] ZHAO Yanzhong, SUN Huayan, ZHENG Yonghui, et al. Theoretical analysis of scanning and identifying cat-eye target with coherently combined array Gaussian beams [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(4): 0412002 - 1 - 0412002 - 7. (in Chinese)
赵延伸, 孙华燕, 郑勇辉, 等. 相关合成线阵高斯光束扫描识别猫眼目标理论分析[J]. 光学学报, 2011, 31(4): 0412002 - 1 - 0412002 - 7.
- [7] Dianren Chen, Huilin Jiang, Chao Zou. Study on the method of laser target echo signal identifying[J]. Proc. SPIE, 2002, 4929: 408 - 452.
- [8] ZHANG Yufa, SUN Xiaoquan, LEI Peng, et al. Stealth technology of optical-electro imaging devices based on focal shift [J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(8): 2268 - 2273. (in Chinese)
张玉发, 孙晓泉, 雷鹏, 等. 基于离焦方式的光电成像设备激光隐身技术[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(8): 2268 - 2273.
- [9] Robin Schoemaker, Koen Benoist. Characterisation of small targets in a maritime environment by means of laser range profiling[J]. Proc. SPIE, 2011, 8037: 803705 - 1 - 803705 - 12.
- [10] LI Yanhui, WU Zhensen, GONG Yanjun, et al. Laser one-dimensional range profile[J]. Acta Physica Sinica, 2010, 59(10): 6987 - 6992. (in Chinese)
李艳辉, 吴振森, 宫彦军, 等. 目标激光脉冲一维距离成像研究[J]. 物理学报, 2010, 59(10): 6987 - 6992.
- [11] CAO Xianghai, LIU Hongwei, WU Shunjun. Dimension reduction of bispectrum using singular value decomposition [J]. Journal of Astronautics, 2007, 28(5): 1319 - 1322. (in Chinese)
曹向海, 刘宏伟, 吴顺君. 基于奇异值分解的双谱降维研究[J]. 宇航学报, 2007, 28(5): 1319 - 1322.
- [12] ZHANG Tinghua, FAN Guihua, SUN Huayan. The real-time realization of detecting weak multi-pulse laser echo signal [C]//International Symposium on Optoelectronic Technology and Application 2014. International Society for Optics and Photonics, 2014, 9297: 92970I - 92970I - 6. (in Chinese)
张廷华, 樊桂花, 孙华燕. 微弱多脉冲激光回波信号探测的实时实现[C]. OTA2014, 2014, 9297: 92970I - 92970I - 6.
- [13] MA Shuohan, LIU Xinbo, MA Qishuang. Application of higher order spectral analysis in infrared thermography damage signal processing [J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(5): 1350 - 1354. (in Chinese)
马说邯, 刘欣博, 马齐爽. 高阶累积量在红外热像损伤检测信号分析中的应用[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(5): 1350 - 1354.