

文章编号 1004-924X(2010)09-2094-07

# 天基红外图像的点目标检测

孟祥龙, 张伟, 丛明煜, 曹移明, 鲍文卓

(哈尔滨工业大学 空间光学工程研究中心, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:** 为了研究地球同步轨道卫星红外扫描相机图像星上处理技术, 分析了美国国防支援计划(DSP)卫星 Phase-II 阶段和改进后的星上信息处理机的基本处理流程, 提出了一种适用于星上工作环境的红外扫描图像点目标检测双通道滤波方法。首先, 采用均值滤波抑制背景, 对背景去除后的残差图像进行自适应门限探测; 在门限滤波的同时, 采用峰值判别算法对峰值数据进行检波以降低自适应门限滤波产生的虚警; 最后, 采用融合算法对超过门限的图像及峰值检波图像的双通道数据进行目标确认。该算法在保证高目标检测率的同时降低了虚警率, 简单可行且利于硬件实时实现。实验结果表明, 当目标信噪比 $>6$ 时, 检测概率可达 99.3% (虚警率为  $1.3 \times 10^{-3}$ ); 算法实时性分析表明, 处理器主频为 200 MHz 时, 算法处理能力为 56.45 Mb/s, 满足天基信息处理要求。

**关键词:** DSP 卫星; 红外图像; 目标检测; 峰值判别

**中图分类号:** TP391; TP722.5 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20101809.2094

## Detection of point targets in space-based infrared images

MENG Xiang-long, ZHANG Wei, CONG Ming-yu, CAO Yi-ming, BAO Wen-zhuo

*(Research Center of Space Optical Engineering,  
Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)*

**Abstract:** In order to research the on-board data processing for infrared (IR) scan images in Geostationary Earth Orbit (GEO) satellite, processing flows of data processors in the Phase II and DSP-I satellites for U. S. Defense Support Program (DSP) are discussed. A point target detection algorithm for IR scan images is proposed based on a two-channel filter to suit for space conditions. Firstly, the background prediction is modeled by a mean filter to suppress background clutters, and the adaptive threshold is determined on the residual image after the background elimination. Then, the peak detection is used to detect the peaks in IR images to reduce probability of false alarm originating from the adaptive threshold. Finally, the target identification algorithm using fusion technique is performed for the data from two channels. Experiments show that the proposed algorithm can get high detection probability and low false-alarm probability, and is easy and convenient for real-time operation. The obtained results indicate that the detection probability reaches 99.3% (the false alarm probability is  $1.3 \times 10^{-3}$ ) when the input Signal-to-Noise ratio (SNR) is no less than 6. The real-time analysis of the algorithm shows that the data processing capability can achieve 56.45 Mb/s. The proposed algo-

收稿日期: 2010-06-27; 修订日期: 2010-07-27.

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (No. 2006AA1280)

rithm can meet the need of space-based data processing.

**Key words:** DSP satellite; IR image; target detection; peak detection

## 1 引言

工作于地球同步轨道的美国国防支援计划(DSP)卫星利用大视场红外扫描相机探测洲际导弹的助推段尾焰,确定其发射点及航向<sup>[1]</sup>,该相机产生的数据量约为每秒几百兆位,如果全部实时下传到地面处理系统,要求星地数据传输系统的传输能力非常高,且全部数据中目标非常少,绝大部分数据是背景信息数据。为解决这个问题,DSP卫星上搭载了针对红外相机图像数据开发的信息处理机。信息处理机的主要功能是完成对可疑的导弹目标的信号检测,并把疑似目标相关数据发送至地面处理系统。由于探测距离远,理想情况下目标仅占所成图像的单个像素,即目标成像为点目标。点目标没有结构信息,无法利用目标的形状、大小、纹理等特征进行目标检测。根据星上目标探测实时性特点,采用先检测后跟踪方法,即先通过星上单帧图像处理找出可疑目标点后,地面处理系统再根据目标的运动特性进行轨迹关联,剔除假目标,保留真目标,估算目标的发射点及落地点,发布战略预警信息。

目前,已经提出的红外图像点目标探测方法很多,如自适应背景预测检测<sup>[2]</sup>、形态学方法<sup>[3]</sup>等,但是,专门针对天基红外扫描图像的处理技术及目标检测算法报道很少,而且都没有考虑数据率和硬件实施对算法的影响。文献[4]采用IIR高通滤波器去除背景,其高通滤波器对于变化缓慢的背景滤除作用明显,对于背景边缘滤波效果很差;文献[5]采用中值滤波技术去除背景,当背景比较复杂时,中值滤波器就失去了它的作用,且不利于硬件实施;文献[6-7]采用最大似然背景估计技术预测背景,利用匹配滤波技术进行目标检测,其运算开销不适合星上工作环境。

本文在分析DSP星上处理的基础上,根据星上红外点目标检测的实时性及高输入数据率的特点,提出了一种单帧红外图像双通道点目标检测算法。通道一采用传统的均值滤波及自适应阈值算法;通道二采用峰值判别算法,进一步去除背景杂波,既满足目标检测率要求,又保证低虚警率。

算法的实质是线性与非线性滤波结合的融合滤波,有利于硬件并行实现。

## 2 DSP星上信息处理

通过探测主动段导弹尾焰的强红外辐射,DSP搜索系统能够探测地基和海基洲际弹道导弹发射。DSP运行在地球同步轨道,由3颗卫星组成星座,对地球表面进行全面覆盖。DSP卫星搭载的双色红外探测器每10s对地球表面上特定地区扫描一次,从探测到预警的时间为50~60s,预警时间为3~4min。DSP的发展过程可以划分为Phase I、Phase II、MOS/PIM、Phase II Upgrade及DSP-I等5个阶段。

Phase-II阶段DSP卫星星上搭载的红外扫描探测器具有 $2 \times 2\,000$ 个探测元,采样输出数据率为7.2 Msample/s,并进行5 bit灰度量化,量化后的数据率约为36 Mb/s;经红外处理单元的峰值检测和门限处理,输出数据率为492 kb/s,虚警率为 $13.6 \times 10^{-3}$ 。星上处理流程如图1所示。

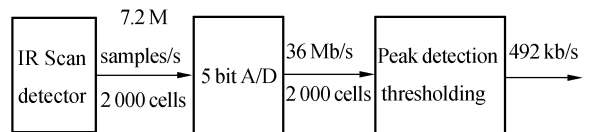


图1 Phase-II阶段DSP卫星星上处理流程

Fig. 1 On-board data processing flow of Phase-II satellite for DSP

DSP-I阶段卫星每个红外扫描探测器具有 $4 \times 6\,000$ 个探测元,每个探测元以7 000 time/s的速率进行采样,采样输出数据率为34 Msample/s,并进行5 bit灰度量化,量化后的数据率约为170 Mb/s;原始数据经红外处理单元的峰值检测和门限处理,输出数据率为5 Mb/s;为避免信道过载,中央控制单元采用了信号处理算法,选择性地剔除了低威胁的信号,将数据率降到500 kb/s<sup>[8]</sup>。DSP-I虚警率为 $2.9 \times 10^{-3}$ ,比Phase-II阶段低了5倍。星上处理流程如图2所示。

由以上分析可得,天基红外星上处理算法性能要求虚警率小于 $2.0 \times 10^{-3}$ ,给定算法检测概

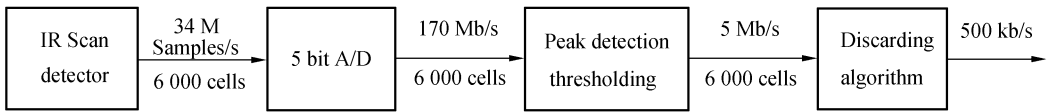


图 2 DSP-I 阶段卫星上处理流程

Fig. 2 On-board data processing flow of DSP-I satellite

率大于 99%。所以,天基红外星上处理问题的实质是星上工作环境下的高输入数据率、低虚警输出的点目标检测问题。

### 3 天基红外图像点目标检测算法

#### 3.1 模型分析

单帧扫描红外图像信号由背景、目标和噪声信号叠加而成,一般采用“加性”模型<sup>[9-10]</sup>。

$$f(i, j) = f_B(i, j) + f_T(i, j) + n(i, j), \quad (1)$$

其中: $i$  为图像行序(扫描方向), $i = 1, \dots, m$ ;  $j$  为图像列序, $j = 1, \dots, n$ 。 $f_T(i, j)$  为目标信号; $f_B(i, j)$  为背景信号; $n(i, j)$  为方差为  $\sigma^2$  的高斯白噪声。

为了验证算法的性能,本文定义邻域信噪比如下:

$$LSCR = \left( \sum_{ij} f_{ij} \right) / \sigma_c, (i, j) \in \Omega_s, \quad (2)$$

其中: $f_{ij}$  为目标信号强度值, $\sigma_c$  为目标邻域杂波标准差, $\Omega_s$  为目标能量区域<sup>[11]</sup>。

背景图像分析:背景是红外图像的主体,主要是大面积缓慢变化的云层,相关性很强,占据了图像的低频部分。在不同区域的边缘表现为强起伏

特点,是图像场景的高频部分。背景与目标的区别在于目标是运动的,而背景是基本静止的。因此单帧图像背景中具有目标特性的点是无法与真正的目标点区分开的,这个特点决定了单帧图像目标检测会有比较高的虚警。从根本上说,需要依据序列图像中点目标的运动特性才能去除这些虚警。虚警造成计算量的急剧增加,因此,在背景抑制阶段要尽量降低虚警。

目标特性:以位于 36 000 km 的地球同步轨道 DSP 卫星为例,所成图像每个像素代表实际面积约为 2.89 km<sup>2</sup>,而一般目标只有数百米,所以目标在成像焦平面上不会超过 1 pixel。如考虑光学点扩散函数,目标信号在  $n \times n$  区域内呈高斯分布, $n$  不超过 5,中心像素点的能量占整个目标能量的 90% 以上,目标呈点状分布。

#### 3.2 算法流程

由于线性滤波计算简单,对平稳背景有很好的抑制效果,可以对较大的邻域进行处理;非线性滤波能够很好地抑制各种复杂背景,但计算相对复杂且有能量漂移的特点,一般选取较小的邻域进行处理。所以,本文提出的红外卫星图像点目标实时检测算法采用线性与非线性滤波相结合的双通道滤波方法抑制背景,降低虚警率,其检测流程如图 3 所示。

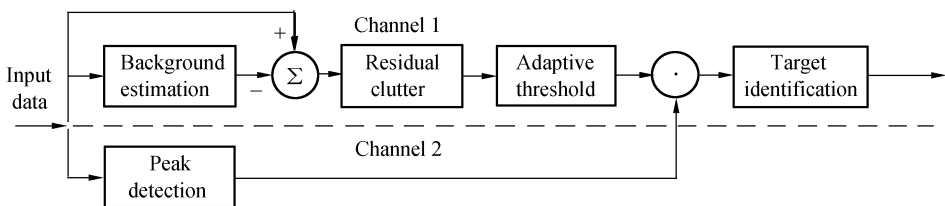


图 3 双通道滤波目标检测流程

Fig. 3 Flow diagram for target detection based on two-channel filter

#### 3.3 双通道算法

从背景、目标特性分析可知,造成虚警的主要是背景边缘和高斯噪声中的强噪声点。背景边缘

与目标的一个重要区别在于目标相对于各个方向都有突变,而背景边缘只在部分方向有突变。因此,本文提出利用峰值判别算法作为峰值点判断

依据,即中心参考像素点与周围相邻像素点都有突变认为是目标点,否则认为是背景边缘点。

#### (1) 均值背景滤波

$$\hat{f}(x,y) = \frac{1}{(2N+1)^2} \sum_{l=-N}^N \sum_{k=-N}^N f(x-l,y-k), \quad (3)$$

#### (2) 自适应门限探测

自适应门限设置为  $TH(i,j) = k\sqrt{SOS}$ ,  $SOS$  为数据残差平方和。

自适应门限探测算法如式(4)所示。

$$X(i,j) = \begin{cases} X(i,j), & X(i,j) \geq TH(i,j) \\ 0, & X(i,j) < TH(i,j) \end{cases}, \quad (4)$$

由(4)式可知,当背景去除后的残差数据  $X(i,j)$  大于  $k$  倍标准差时,认为该数据为异常数据,故作为疑似目标保留这个数据,否则该数据置0。

经过自适应门限后的数据中含有多个虚警目标,还需要充分利用目标的一些其它信息(如邻域灰度信息、脉冲信息等)进一步提取目标,降低虚警。

#### (3) 峰值判别算法

$$\begin{cases} f(i,j) - f(i\pm 1, j\pm 1) > 0 \\ f(i,j) - f(i, j\pm 1) > 0 \\ f(i,j) - f(i\pm 1, j) > 0 \end{cases}, \quad (5)$$

只有当(4)、(5)式都满足条件时,才判断为目标。

## 4 实验结果与算法性能分析

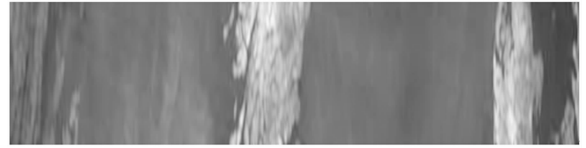
### 4.1 仿真实验

探测器为 2 048 元线列 TDI 红外焦平面阵列器件,量化位数为 8 bit。选取红外地球背景扫描图像(大小  $2\,048 \times 112$ ),随机嵌入 100 个点目标(信噪比为 6)。分别采用均值滤波( $3 \times 3$  模板)、中值滤波( $3 \times 3$  模板)和本文提出的算法进行目标检测,统计检测结果。图 4 为原始图像和检测结果,表 1 为统计结果。

表 1 目标检测结果

Tab. 1 Target detection results

	Median filter	Mean filter	Proposed method
Result	(100,286)	(100,246)	(100,171)



(a) 原始图像

(a) Original image



(b) 中值滤波检测结果

(b) Results obtained by median filter



(c) 均值滤波检测结果

(c) Results obtained by mean filter



(d) 本文算法检测结果

(d) Results obtained by proposed method

图 4 图像处理及目标检测结果

Fig. 4 Results of image processing and target detection

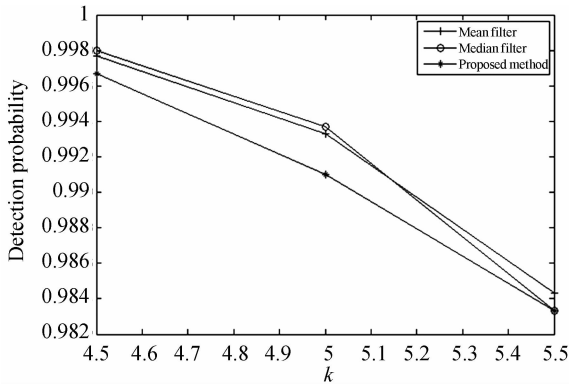
Where 100 is the number of simulated target point, 171 is the number of detected point

### 4.2 算法检测性能分析

选取 9 帧不同季节、不同地点的典型红外图像,每帧加入 100 个点目标(信噪比为 6),分别统计检测概率、虚警率。仿真结果如图 5、图 6 所示。

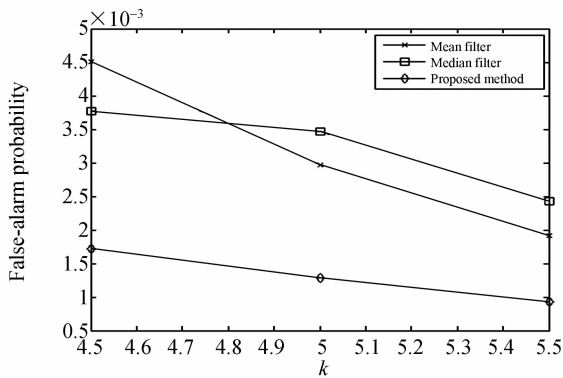
图 5、图 6 表明,相同信噪比下,虚警越高,检测概率越高。要达到相同的检测概率时,虚警率越小,信噪比越大,结果与理论性能模型相符合。

从图 5 和图 6 可以看出,3 种检测算法在保证很高检测率的同时有不同的虚警率,虚警率按中值滤波、均值滤波、峰值判别均值滤波依次降低,峰值判别均值滤波有很好的降低虚警的效果,可以很大程度上避免把背景边缘处的高亮度点检

图 5 检测率与分割因子  $k$  的关系Fig. 5 Relationship curve of detection probability and segmentation parameter  $k$ 

测为目标,为后续处理节省了大量的资源。

图 5、图 6 的数据均是在 Intel Celeron M CPU440, 1.86 GHz, 内存 1.49 GB 的 Windows XP SP2 环境,利用 Matlab7.01 程序仿真的结果。

图 6 虚警率与分割因子  $k$  的关系Fig. 6 Relationship curve of false-alarm probability and segmentation parameter  $k$ 

本文提出的算法可以改进为峰值判别中值滤波算法。但是中值滤波是非线性滤波,所用的时间是均值滤波线性滤波所用时间的数倍。峰值判别中值滤波所得到的效果上的提高相比非线性滤波所付出的代价,得不偿失。所以,从硬件实时处理的角度分析,双通道滤波是最优的检测处理方式。

#### 4.3 算法实时性能分析

为了检验算法的实时性能,对算法复杂度进

行了分析。假设处理器执行 1 次加、减法运算均需要 1 个时钟周期,1 次乘法运算需 2 个时钟周期,1 次除法运算需要 4 个时钟周期,1 次比较运算需要 1 个时钟周期,绝对值运算需要 2 个时钟周期,与运算需要 1 个时钟周期。

对于分辨率为  $n \times m$  的图像,背景估计需  $8n \times m$  次加法、 $n \times m$  次除法;背景去除需  $n \times m$  次加法;计算残差平方和(SOS)需  $n \times m$  次加法和  $n \times m$  次乘法;自适应门限计算需  $n \times m$  次减法,  $n \times m$  次除法,  $2n \times m$  次乘法,  $n \times m$  次比较值运算;峰值判别算法需  $8n \times m$  次比较运算(并行运算);目标确认算法需  $n \times m$  次与运算。

本文算法总的运算量为  $27n \times m$ (个)指令周期,则处理一幅分辨率为  $2048 \times 112$  的图像,算法所需总的计算量为 6 193 125 个机器周期。假设处理器主频为 200 MHz,则处理一行  $2048 \times 1$  扫描图像的时间为 0.276 48 ms,算法处理能力为 3 616 row/s。

## 5 结 论

为了研究地球同步轨道卫星红外扫描相机图像星上处理技术,本文分析了 DSP 卫星在 Phase-II 和 DSP-I 阶段星上信息处理机的基本处理流程,给出了基于检测率和虚警率的天基信息处理基本要求,提出了适于星上工作环境的峰值判别均值滤波双通道算法。基于并行处理的基本思想,分别采用均值背景抑制的自适应阈值滤波和峰值判别算法检测点状目标,并利用融合算法确认目标。算法对红外预警卫星图像点目标检测有很好的检测效果,且简单可行,利于硬件实时处理。实验仿真分析表明,信噪比  $> 6$  时,虚警率为  $1.3 \times 10^{-3}$ ,检测概率为 99.3%。算法实时性分析表明,处理器主频为 200 MHz 时,算法处理能力为 56.45 Mb/s(对于每行  $2048 \times 1$  的扫描图像而言,处理能力为 3 616 row/s),满足天基信息处理要求。

2010,18(2):341-347.

ZHANG W, CAO Y M, CONG M Y, et al.. Band selection for space-based infrared target detection using background clutter model [J]. *Opt. Pre-*

#### 参考文献:

- [1] 张伟,曹移明,丛明煜,等. 采用杂波模型进行天基目标红外探测波段的选择[J]. 光学精密工程,

- cision Eng.*, 2010, 18(2):341-347. (in Chinese)
- [2] 郭琰,张晔,谷延锋,等. 基于二代 Curvelet 变换和 ProbShrink 算法的红外图像背景抑制[J]. 光学精密工程, 2008, 16(10):1988-1994.  
GUO Y, ZHANG Y, GU Y F, *et al.*. Infrared image background suppression based on 2nd generation Curvelet transform and ProbShrink algorithm [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(10):1988-1994. (in Chinese)
- [3] 王小鹏,阎国梁,裴建刚,等. 由形态学边缘模式匹配实现数字稳像[J]. 光学精密工程, 2009, 17(3):683-689.  
WANG X P, YAN G L, PEI J G, *et al.*. Stabilization of digital image by morphological edge pattern matching [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(3):683-689. (in Chinese)
- [4] KEVIN G. Ground-based algorithms for processing MSX SPIRIT III infrared radiometer data [J]. *SPIE*, 1994, 2232:217-227.
- [5] KEVIN G, JEFFERY K. Background filters for midcourse space experiment (MSX) spirit III theater midcourse scenarios and their impact to object detection and estimation performance [J]. *SPIE*, 1995, 2484:424-432.
- [6] PFEIFFER C, MASSON B L. Technology demonstration by the onboard signal and data processor [C]. *Johns Hopkins APL Technical Digest*, 1996, 17(2):237-245.
- [7] 刘新,姬红兵. 基于非平稳背景下的红外小目标检测[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(6):1295-1300.  
LIU J, JI H B. IR small targets detection based on non-homogeneous background [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(6):1295-1300. (in Chinese)
- [8] Col John Kidd and 1 Lt Holly Caldwell. Defense Support Program: Support to ia Changing World [C]. *AIAA Space Programs and Technologies Conference*, 1992, 577:1-36.
- [9] 张伟,孟祥龙,丛明煜,等. 天基红外扫描图像点目标检测算法[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(5):921-925.  
ZHANG W, MENG X L, CONG M Y, *et al.*. Algorithm of space point target detection for IR scan images [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(5):921-925 (in Chinese)
- [10] 王文龙,韩保君,张红萍. 一种海空背景下红外小目标检测新算法[J]. 光子学报, 2009, 38(3):725-728.  
WANG W L, HAN B J, ZHANG H P. A new algorithm of small target detection for ifrared image in background of sea and sky [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(3):725-728. (in Chinese)
- [11] RELIER G, DESCOMBES X, FALZON ET AL F. Texture feature analysis using a Gauss-Markov model in hyperspectral image classification [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, 42(7):1543-1551.

#### 作者简介:



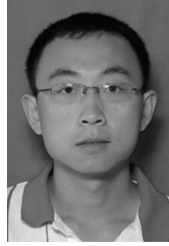
**孟祥龙**(1971—),男,黑龙江哈尔滨人,博士研究生,工程师,分别于1993年、2000年于国防科技大学获得学士、硕士学位,主要从事遥感图像处理技术方面的研究。E-mail: xlmeng@126.com



**张伟**(1962—),男,黑龙江牡丹江人,工学博士,教授,博士生导师,主要从事空间光学工程与应用技术等方面的研究。E-mail: wzhang@hit.edu.cn



丛明焯(1964—),男,黑龙江双鸭山人,工学博士,教授,博士生导师,主要从事空间监视、计算机仿真技术等方面的研究。E-mail: mycong@hit.edu.cn



鲍文卓(1983—),男,内蒙古兴安盟人,博士研究生,分别于 2004 年、2007 年于哈尔滨工业大学获得学士、硕士学位,主要从事空间目标光学特性与图像仿真方面的研究。E-mail: latermouse@126.com



曹移明(1982—),男,江苏泰兴人,博士研究生,分别于 2004 年、2006 年于哈尔滨工业大学获得学士、硕士学位,主要从事空间红外相机性能评估与仿真方面的研究。E-mail: caoyiming888@126.com

## ● 下期预告

# 火炮身管疵病深度测量系统

曾朝阳<sup>1</sup>, 赵继广<sup>2</sup>

- (1. 装备指挥技术学院 光电装备系, 北京 101416;
2. 装备指挥技术学院 航天装备系, 北京 101416)

火炮身管是一个内表面结构复杂的圆管,内部空间狭小而细长,检测其内表面的疵病非常困难。为了准确获取火炮身管疵病深度参数,提出了一种新的基于等效多基线立体成像的疵病深度测量方法,采用单摄像机建立了疵病深度自动测量系统。首先,对摄像机采用 Tsai 两步法进行标校;接着,采用等效多基线立体成像的方法获取疵病图像。在此基础上,利用标校数据和图像的位置参数,通过疵病特征提取和疵病图像立体匹配处理,获取疵病深度图像的输出,从而得到准确的疵病深度值,实现对火炮身管疵病深度参数的精确测量。试验结果表明:该疵病测量系统的疵病深度测量绝对误差 $<0.1$  mm,相对误差 $<5\%$ ,完全满足火炮身管疵病深度测量的需要,能够为火炮鉴定试验和伴装保障提供重要的技术支持。