

基于被动毫米波图像的金属目标特征提取方法

刘静¹, 张光锋¹, 诸庆国², 郑振忠², 陈庆昌², 周璐艳¹

(1. 南京理工大学 电子工程与光电技术学院, 南京 210094; 2. 北京特种车辆研究所, 北京 100072)

摘要: 针对探测金属目标时其中心难以确定的问题, 提出了分割被动毫米波辐射图像过渡带的算法以精确获取其几何尺寸及特征; 通过实测金属立体目标的辐射数据矩阵进行成像, 对毫米波辐射图像进行基于 Canny 算子的边缘检测与分析, 结合金属目标辐射特性以及天线参数分割目标边缘过渡带, 计算金属目标的面积、周长并提取其中心位置; 实验结果表明, 该方法误差控制在 9.3% 以内, 可以精确提取金属目标几何特征及目标中心。

关键词: 被动毫米波; 辐射图像; 金属目标; 边缘提取; 中心提取

Feature Extraction of Metal Targets Based on Millimeter Wave Radiation Image

Liu Jing¹, Zhang Guangfeng¹, Chu Qingguo², Zheng Zhenzhong², Chen Qingchang², Zhou Luyan¹

(1. Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;

2. Beijing Institute of Special Vehicles, Beijing 100072, China)

Abstract: To solve the problem that the accurate center of metal targets in detection is difficult to extract, a method about reserving and dividing the transition zones in passive millimeter wave (PMMW) radiometric images was presented to extract the characteristics of metal targets. The radiometric data matrix of three-dimensional metal target was collected and imaged. Canny edge detector was used to detect the edge of the image and analyze the characteristics. Based on the characteristics, the perimeter and area can be calculated as well as the center. The experimental results show that the method can detect the characteristics of metal targets efficiently and exactly with error in 9.3%.

Keywords: PMMW; radiometric image; metal targets; edge extraction; center extraction

0 引言

被动毫米波受气象条件影响小、穿透力强、隐蔽性高, 这些特性使得被动毫米波探测技术在民用科技和现代军事科技中的应用日益广泛^[1]。金属目标在自然环境下反射天空温度成为“冷”目标, 与“热”环境背景温差较大, 在毫米波段最高可达二百余 K。被动毫米波对金属目标的这种敏感性, 使其成为末敏弹及灵巧弹药所使用的重要探测手段之一^[2]。

被动毫米波图像通常具有灰度变化丰富、背景噪声复杂、分辨率低、边缘密度大等特点, 一些常见的图像边缘检测算法在被动毫米波图像中难以满足实际需求。赵凌^[3]等采用形态学算子对毫米波辐射图像进行了边缘提取, 但缺少对图像中目标的分析; 韦隼^[4]等采用形态学滤波和分水岭算法对人体藏匿物品的毫米波辐射图像进行了边缘特征提取, 获得了藏匿金属目标的边缘信息, 但并未进一步对金属目标进行精确计算和分析; 赵书占^[5]等采用遗传算法和 Otsu 结合的方法计算图像分割阈值并采用 Canny 算子提取目标边缘信息, 但仅通过图像本身采用阈值分割的方法会造成目标边缘信息损失, 造成与实

际目标边缘存在偏差。本文针对上述问题提出了一种金属目标辐射图像特征提取方法, 计算了目标的几何尺寸并提取其特征中心。

1 基本原理

1.1 金属辐射特性

金属板的视在温度(天线温度近似为视在温度)由金属板本身的辐射及金属板反射来自其它物体的辐射两部分组成。在毫米波段, 金属物体发射率接近于 0, 反射率接近于 1, 可视完全反射周围环境温度。室外自然环境下, 金属板实测的视在温度非常接近天空温度, 可以直接引用天空温度作为金属板的视在温度^[6]。

根据散射理论, 在 (θ, ϕ) 方向观测亮度温度应为各个方向天空辐射温度被金属板散射后的总和, 辐射计天线接收的金属板散射温度 $T_{APT}(\theta, \phi)$ 为:

$$T_{APT}(\theta, \varphi) = \frac{1}{4\pi} \int [\gamma_{ij}(0, s) + \gamma_{ij}(\theta, s)] \cdot T_{sk_y}(\theta_s, \varphi_s) d\Omega_s \quad (1)$$

其中: $\gamma_{ij}(\theta, \sigma)$ 为入射方向为 (θ_0, ϕ_0) 散射方向为 (θ_s, ϕ_s) 的微分散射系数, i, j 为相互正交的两种极化方式, $T_{sk_y}(\theta_s, \phi_s)$ 为 (θ_s, ϕ_s) 方向的天空温度。

在晴天条件下, 天空辐射主要来自大气中氧和水蒸气的热辐射。根据辐射传递理论和大气水平分层模型, 天空温度 $T_{sk_y}(\theta_s, \phi_s)$ 为^[7]:

$$T_{sk_y}(\theta_s, \varphi_s) = \sec\varphi_s \int_0^{\infty} k_g T(z) \exp(-\tau(0, z) \sec\varphi_s) dz \quad (2)$$

收稿日期: 2016-11-17; 修回日期: 2016-12-19。

基金项目: 国家自然科学基金项目(61371038)注: 江苏省高校优秀中青年教师和校长境外研修计划。

作者简介: 刘静(1992-), 女, 江苏扬州人, 硕士研究生, 主要从事毫米波、亚毫米波成像技术方向的研究。

其中： ϕ_i 为天顶角， $k_g(z)$ 和 $T(z)$ 分别为高度为 z 处的大气吸收系数和热力学温度， $\tau(0, z)$ 为光学厚度，表达式为：

$$\tau(0, z) = \int_0^z k_g(z) dz \quad (3)$$

金属板的天线温度对比度为：

$$\Delta T_A(\theta, \phi) = \frac{1}{4\pi} \int_{\Omega_T} [T_{APT}(\theta, \phi) - T_{APB}(\theta, \phi)] G(\theta, \phi) d\Omega \quad (4)$$

其中： $T_{APT}(\theta, \phi)$ 为式(1)中的金属板散射温度， $T_{APB}(\theta, \phi)$ 为背景温度， $G(\theta, \phi)$ 为天线增益。

1.2 自适应 Canny 算子

Canny 算子是一个多级边缘检测算法^[8]，在许多图像处理领域都有被应用。Canny 算子的核心思想是采用双阈值算法检测和连接边缘，即设置高低两个阈值，高于高阈值的点视为边缘点保留，低于低阈值的点视为非边缘点删除，介于高低阈值之间的点进一步检测其周围 8 个像素点中是否存在高于高阈值的点，若存在则视其为边缘点，否则删除。其局限性在于人为设定的高低阈值，可采用基于简单统计的自适应阈值选取方法^[9]来确定高低阈值，该自适应算法的阈值计算公式为：

$$T = \frac{\sum_x \sum_y e(x, y) f(x, y)}{\sum_x \sum_y e(x, y)} \quad (5)$$

其中：

$$\begin{aligned} e(x, y) &= \max\{|e_x|, |e_y|\} \\ e_x &= f(x-1, y) - f(x+1, y) \\ e_y &= f(x, y-1) - f(x, y+1) \end{aligned}$$

其中： $f(x, y)$ 为像素点灰度值， e_x 为水平方向灰度差， e_y 为垂直方向灰度差， $e(x, y)$ 为水平和垂直方向的最大灰度差。

2 图像特征提取算法与步骤

被动毫米波图像不同于普通光学图像，其像素点的灰度值实际上表征了该点真实亮度温度值。由于金属立体目标与背景亮温对比度大，会在目标边缘形成一条过渡带，这实际上是天线波束扫过目标与背景边界时亮度温度的变化引起的，故仅通过光学图像处理的方法分割图像会影响目标探测精确性。从亮温变化的角度分析图像才是更为真实、准确的处理方法，具体算法如下。

2.1 过渡带分割算法

如图 1 所示，辐射计天线置于高度为 H 处，前视角为 θ_F ，天线主波束立体角为 Ω_M ，观测位于背景上的金属立体目标。将主波束内的立体目标和背景分解成 n 块小矩形平面目标，其中目标占 n_1 块，背景占 n_2 块， n 的数目越多，则其总和越接近于真实立体目标。由于每一小块矩形平面目标很小，所对应天线的立体角 $\Omega_{T_{een}}$ 也很小，在很小的 Ω_{T_n} 范围内，目标的亮度温度 $T_{APT_{n1}}(\theta, \phi)$ 可近似为 $T_{APT}(\theta_{T_{n1}})$ ，背景的亮度温度 $T_{APB_{n2}}(\theta, \phi)$ 可近似为 $T_{APB}(\theta_{T_{n2}})$ ， n 块小平面目标的天线温度叠加可得总的天线温度。

实验所用辐射计天线主波束效率很高 (>0.9)，可忽略旁瓣影响。当天线主波束 Ω_M 扫描到目标边缘的时候，其天线温度 $T_{APE}(\theta, \phi)$ 为：

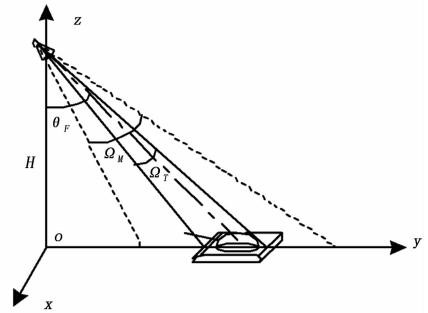


图 1 金属立体目标在辐射测量中的几何关系

$$\begin{aligned} T_{APE}(\theta, \phi) &= \frac{1}{n} \left\{ \sum_{n_1} [T_{APT}(\theta_{T_{n1}})] \int_{\Omega_{T_{n1}}} G(\theta, \phi) d\Omega \right\} + \\ &\quad \left\{ \sum_{n_2} [T_{APB}(\theta_{T_{n2}})] \int_{\Omega_{T_{n2}}} G(\theta, \phi) d\Omega \right\} \end{aligned} \quad (6)$$

在分割过渡带时，式(7)给出参数 α ($0 < \alpha < 1$)，使得过渡带的面积 S 分为两部分，其中 $\alpha \cdot S$ 属于目标， $(1-\alpha) \cdot S$ 属于背景，即：

$$T_{APE}(\theta, \phi) = \alpha \cdot T_{APT}(\theta, \phi) + (1-\alpha) \cdot T_{APB}(\theta, \phi) \quad (7)$$

解得：

$$\alpha = \frac{T_{APE}(\theta, \phi) - T_{APB}(\theta, \phi)}{T_{APT}(\theta, \phi) - T_{APB}(\theta, \phi)} \quad (8)$$

对于平面目标而言，其微元都面向正上方，辐射计主波束范围内的金属微元亮温为其反射 (θ, ϕ) 方向对应的天空亮温，背景微元的亮温即为其 (θ, ϕ) 探测方向对应的亮温，式(8)可改写为：

$$\alpha = \frac{T_{APE}(\theta, \phi) - T_{background}(\theta, \phi)}{T_{sky}(\theta, \phi) - T_{background}(\theta, \phi)} \quad (9)$$

设目标边缘是直线且均分天线波束，天线为对称天线，则其增益函数 $G(\theta, \phi)$ 关于目标边缘对称式(6)可改写为：

$$T_{APE}(\theta, \phi) = \frac{1}{n} \left\{ \sum_{n/2} [T_{APT}(\theta_{T_n}) + T_{APB}(\theta_{T_n})] \int_{\Omega_{T_n}} G(\theta, \phi) d\Omega \right\} \quad (10)$$

进一步将天空亮温和背景亮温写作微元的形式为：

$$T_{sky}(\theta, \phi) = \frac{1}{n} \left\{ \sum_n T_{sky}(\theta_{T_n}) \int_{\Omega_{T_n}} G(\theta, \phi) d\Omega \right\} \quad (11)$$

$$T_{background}(\theta, \phi) = \frac{1}{n} \left\{ \sum_n T_{background}(\theta_{T_n}) \int_{\Omega_{T_n}} G(\theta, \phi) d\Omega \right\} \quad (12)$$

将式(10)、(11)、(12)带入式(9)可解得 $\alpha=0.5$ 。然而，对于不同边缘形状的物体，当天线到达其边缘时并不能视为目标和背景均分天线波束。且立体的边缘形状会形成复杂的辐射传播关系，尤其是造成二次反射，即天空亮温经过目标反射后再次经过背景反射进入辐射计或天空亮温经过背景反射后再次经过目标进入辐射计。

因此，对于复杂的金属立体目标对在其过渡带分割参数并不一样，需要经过测量给出。

如图 2 所示，给出本文中的立体金属目标在草地、沙地、水泥地背景下的单次测量曲线。由于该立体金属目标具有不对称的结构，所以对该目标的横纵两个方向都进行了扫描，其中，长轴为图 3(a) 中的横向轴线，短轴为竖向轴线。从图 2(a)、(b) 中可以看出 8 mm 波段辐射计探测该目标与背景的最大温差达到了 130 K，辐射计扫描到金属目标后下降明显，

达到边界时辐射计天线温度为 190 K 左右, 具体见表 3。图 2 (c)、(d) 是 3 mm 波段辐射计对立体金属目标的单词扫描曲线, 与 8 mm 类似, 目标与背景最大温差为 90 K, 下降趋势较 8 mm 而言相对平缓。

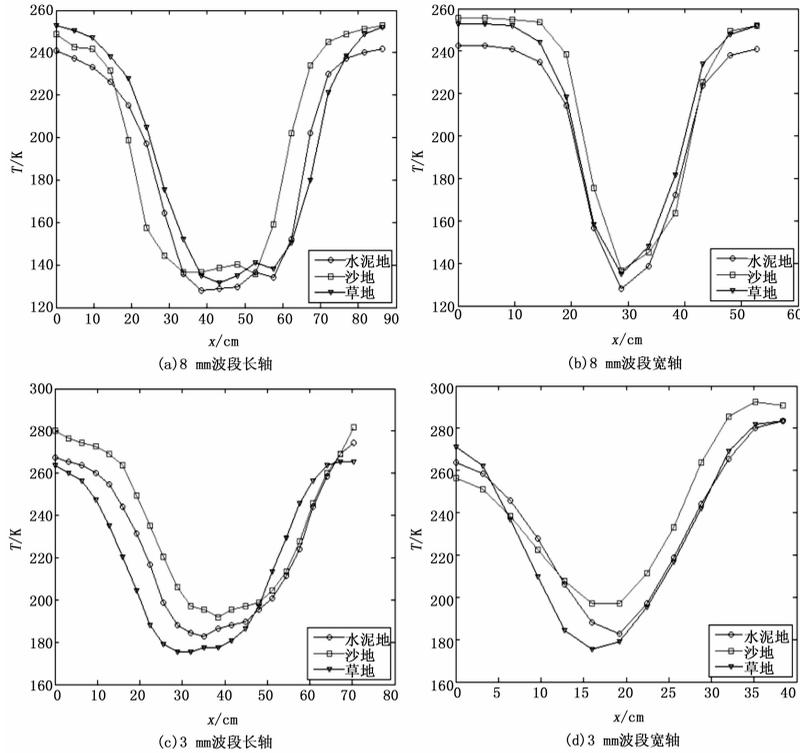


图 2 金属立体目标在不同背景下单次扫描曲线

为了得到该金属目标的过渡带分割参数, 使用目标在草地、沙地、水泥地背景下的辐射图像, 采用自适应 canny 算子对其进行边缘提取。三种背景下, 3 mm 波段和 8 mm 波段 canny 算子提取的内外边缘均值见表 1。

表 1 自适应 canny 算子提取不同背景下内外边缘值

	3mm	8mm
沙地	225.5K/251.6K	162.8K/220.2K
草地	203.2K/245.5K	165.9K/215.3K
水泥地	217.1K/243.6K	160.8K/223.2K

表 3 给出了长宽两个轴扫描立体金属目标单次扫描曲线的边缘点具体亮度温度值, 并根据表 1 和表 2 计算出了目标的过渡带分割参数 α 。

表 2 不同背景下目标横纵轴边缘亮度温度值

	3mm	8mm
沙地	237.7K/238.6K	195.9K/187.7K
草地	222.5K/224.5K	195.1K/185.3K
水泥地	231.5K/232.7K	188.5K/186.8K
α	0.51	0.53

2.2 金属目标图像特征提取步骤

根据已知原理, 制定如下处理步骤:

1) 获取原始图像: 利用 3 mm、8 mm 波段交流全功率辐

射计采集视场内图像。

2) 形态学预处理: 采用 Sobel 算子对图像进行边缘特征增强处理。

3) 边缘提取: 采用自适应 Canny 算子提取图像中金属目标过渡带信息。

4) 提取金属目标几何特征及目标中心: 统计步骤 3) 中的过渡带内外边缘像素点数, 以及过渡带面积像素点数与过渡带包围的中心部分像素点数。过渡带包围中心部分像素点数加上过渡带像素点数乘以过渡带系数 α 记为金属目标的面积像素点数; 采用未知区域像素点数比对已知区域真实面积、周长像素点数的方法, 将目标面积、周长转化为实际的尺寸,

$$S_T = \frac{n_S}{N_S} \cdot S_{all}, C_T = \frac{n_C}{N_C} \cdot C_{all} \quad (13)$$

其中: S_T 为目标真实面积, n_S 为目标面积像素点数, N_S 为图像总像素点数, S_{all} 为图像真实总面积; C_T 为目标实际周长, n_C 为目标周长像素点数, N_C 为图像边缘总像素点数, C_{all} 为图像真实边缘长度。

采用三种不同的方法分别提取目标的几何中心点, 具体方法如下:

1) 坐标均值中心点为内边缘坐标均值点, 即内环带所有像素点坐标均值点;

2) 外切矩形中心点为内边缘在水平方向上的外切矩形对角线交点;

3) 亮温中心点为目标辐射矩阵原始数据的目标中心区域的亮温最低部分的中心点。

在得到三种中心点的情况下, 可进一步计算三种中心点的坐标均值, 得到一点记为目标的综合中心点。

3 实验结果与分析

3.1 3 mm/8 mm 成像实验

在晴天、温度 13 ℃、相对湿度 51% 天气下进行 3 mm 和 8 mm 波段辐射图像采集。辐射计探测系统置于南京市东洼子, 距地 1.5 m 三脚架上俯仰角 60° 向地面观测, 地面目标为立体金属目标, 背景为水泥地, 辐射计天线主波束对目标区域作矩阵扫描采集辐射数据。为了保证扫描时获取的原始图像与目标空间之间的映射关系, 将厚度为 3 mm 的网格泡沫板固定于金属立体目标上方, 以 0.5 天线波束宽度划分网格大小。3 mm 和 8 mm 波段辐射计参数如表 2 所示。测试现场以及目标光学图像如图 3 (a)、3 (b) 所示。

表 3 全功率辐射计参数

	3 mm	8 mm
中心频率/GHz	94	35
波束宽度/°	0.8	1.5
卡塞格伦天线口径/mm	300	368
低放增益/dB	32	35
混频器噪声系数/dB	9	4
积分时间/s	1	1
灵敏度/K	0.5	0.2

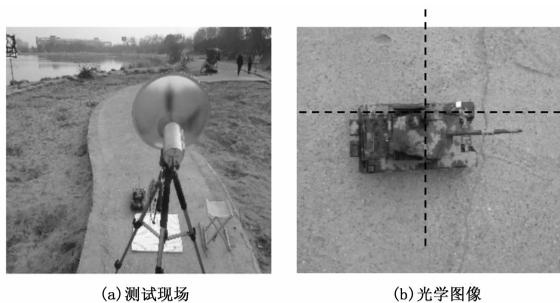


图 3 目标测试场景

3.2 实验结果

如图 4 所示，图 4 (a)、4 (e) 分别为水泥地背景下 8 mm 及 4 mm 辐射计探测金属立体目标的成像图；图 4 (b)、4 (f) 为形态学 Sobel 算子增强目标边缘处理后的图片；图 3 (c)、4 (g) 为 Canny 算子提取目标过渡带边缘的图片；图 4 (d)、4 (h) 将过渡带填充为黑色，其中黑色环带包围的白色部分为目标中心部分。图 4 (d)、4 (h) 为目标的三种中心，三角形为坐标均值中心，方形为外切矩形中心，圆形为亮温中心。如图 5 所示，图 5 (a)、5 (b) 为放大图目标综合中心点，以黑色十字标出。

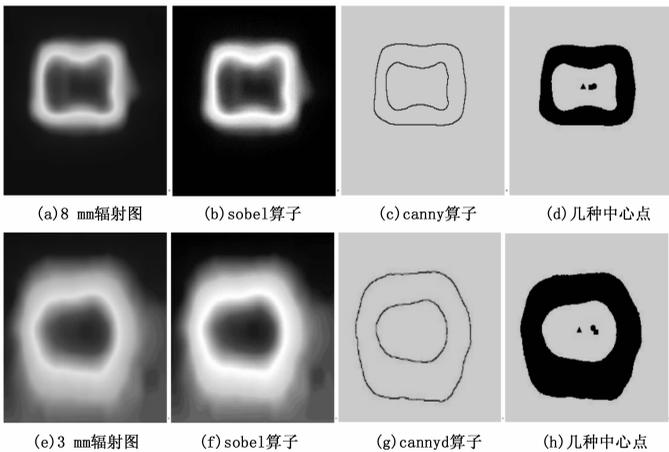


图 4 3 mm/8 mm 辐射图像处理与特征提取结果

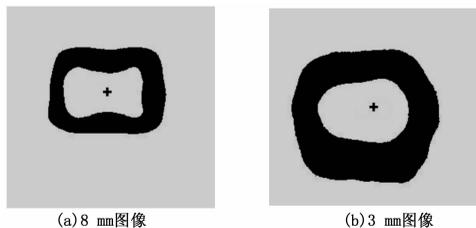


图 5 3 mm/8 mm 辐射图像综合中心点

该金属目标实际尺寸为 $40 \times 18 \times 16 \text{ cm}^3$ ，计算得 8 mm 辐射图像中目标面积为 680.6 cm^2 ，周长为 108.0 cm ，误差分别为 5.47% 和 6.87% ；3 mm 辐射图像中目标的面积为 686.9 cm^2 ，周长为 105.2 cm ，误差分别为 4.60% 和 9.3% 。取 8 mm 与 3 mm 两个波段周长面积均值记为目标综合面积、综合周长，可得目标综合面积为 683.7 cm^2 ，综合周长为 106.5 cm ，其综合误差分别为 5.04% 以及 8.09% 。

3.3 误差分析

3 mm、8 mm 辐射图像分析计算得到金属目标的周长面积是存在一定误差的。这是由于金属目标具有复杂的立体结构，边界处发生目标与背景交互二次反射，即目标与背景分界处会反射部分背景温度，而背景虽然以发射为主，也会反射部分金属目标反射的天空温度。同时，原始辐射图像矩阵采集时受到辐射计系统内部噪声影响且存在抖动，造成误差。另外，从图 4 (a)、4 (e) 对比可见 3 mm 辐射图像分辨率实际是低于 8 mm 的，这与其波束宽度相反，这是由于 3 mm 辐射计发展尚未成熟，其机内噪声高于 8 mm 辐射计机内噪声，在近距离探测中其波段优势并未不显著。

4 结束语

本文提出了一种基于被动毫米波图像的金属目标特征提取方法。该方法采用了结合天线与金属目标辐射特性本身的图像分割算法，保留过渡带并利用 Canny 算子提取过渡带边缘信息，通过选取适合的参数 α 分割过渡带。分别计算了 3 mm 和 8 mm 两波段金属目标的几何尺寸，在此基础上求得两波段综合周长面积。试验表明，该方法计算求得的目标周长面积与实际目标模型误差均在 9.3% 以内，可精确提取目标周长面积。同时，根据三种不同方法提取目标中心并求得金属目标综合中心位置，可作为目标的打击中心。但是该方法所提取的边缘存在误差需进一步优化，这与目标边缘的位置、图像的噪声状况、过渡带分割参数以及 Canny 算子阈值有密切关系，如何选取这些参数使得结果更加准确是我们下一步需要解决的问题。另外，实际装甲目标发动时的物理温度与亮度温度分布与文中模型差异较大，如何提取其它部分中心位置有待深入研究。

参考文献:

- [1] 李贝贝, 张光锋, 娄国伟. 基于毫米波辐射特性的水面植被检测方法 [J]. 计算机测量与控制, 2016, 24 (7): 45-48.
- [2] 张彦梅, 崔占忠. 利用毫米波辐射计探测坦克顶甲的研究 [J]. 探测与控制学报, 2004, 26 (3): 17-19.
- [3] 赵凌, 张祖荫, 郭伟. 基于数学形态学的毫米波图像边缘检测方法 [J]. 国土资源遥感, 2006 (4): 19-22.
- [4] 韦 啤, 张光锋, 娄国伟. 基于分水岭和形态学的图像特征提取方法 [J]. 探测与控制学报, 2014, 36 (1): 63-66.
- [5] 赵书占, 张光锋, 娄国伟. 基于遗传算法的毫米波辐射图像特征提取方法 [J]. 电光与控制, 2015, 22 (10): 19-22.
- [6] 聂建英, 李兴国, 娄国伟, 等. 变温目标毫米波被动探测辐射特性分析 [J]. 光电工程, 2010 (7): 1-7.
- [7] Swaroop Sahoo, Xavier Bosch-Lluis, Steven C. Reising, Jothiram Vivekanandan. Radiometric Information Content for Water Vapor and Temperature Profiling in Clear Skies between 10 and 200 GHz [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2015, 8 (2): 859-871.
- [8] Jaewoong Kim, Sukhan Lee. Extracting Major Lines by Recruiting Zero-Threshold CannyEdge Links along Sobel Highlights [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2015, 22 (10): 1689-1692.
- [9] 段 军, 高 翔. 基于统计滤波的自适应双阈值改进 Canny 算子边缘检测算法 [J]. 激光杂志, 2015, 36 (1): 10-12.