

# 基于机载IRST稳定平台结构的地面背景抑制算法

高旭辉, 祁蒙

(华北光电技术研究所, 北京 100015)

**摘要:**在机载IRST对地面目标的搜索跟踪过程中,由于飞机自身的运动,机载IRST获取的红外图像中包含了目标及复杂的地面运动背景。为克服图像序列中地面运动背景对目标跟踪的影响,在图像预处理算法的研究中,通过对机载IRST稳定平台下背景与目标的图像运动特点的分析,提出了一种基于帧间运动估计的背景抑制算法。

**关键词:**复杂背景;运动估计;背景抑制

**中图分类号:**TP391.41 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2012.03.022

## Surface background suppression algorithm based on air-based IRST stabilization platform structure

GAO Xu-hui, QI Meng

(North China Research Institute of Electro-optics, Beijing 100015, China)

**Abstract:** On the searching and tracking of ground targets, the images captured from the air-based IRST are composed of targets and complicated moving surface background, because of the self-movement of the airplane. A background suppression algorithm based on inter-frame motion estimation is proposed to overcome the influences of moving surface background to the target tracking, according to the study of movement characters of background and targets in the image list captured from the air-based IRST stabilization platform structure.

**Key words:** complicated background; motion estimation; background suppression

### 1 引言

机载IRST系统对地面进行搜索跟踪时,由于飞行高度的影响,运动目标在图像序列中呈现为小目标,而且图像序列中还包含着较为复杂的地面运动背景,如何在复杂的地面运动背景中完成小目标检测成为机载IRST系统中的一项重要研究内容。通常的研究思路是首先进行背景估计,接着从图像序列中减去估计出的背景,从而实现对红外图像中的背景杂波和噪声抑制,提高图像中目标的信噪比。针对背景抑制问题,罗军辉、李吉成、吴巍、聂洪山等人研究了基于滤波的背景抑制思路,分析了其性能及适用范围<sup>[1-6]</sup>;Markandey, Pohlig等人研究了基于运动估计<sup>[7-8]</sup>的背景抑制方法。本文对背景抑制问题进行了深入研究,研究结果表明,基于滤波的背景抑制方法不适合完成地面复杂背景的抑制。本文在

深入研究飞机、IRST系统以及目标相对运动特性的基础上,采用运动估计思路,提出了一种基于机载IRST稳定平台结构的背景抑制算法。

### 2 基于滤波的背景抑制方法分析

一个 $N \times N$ 的含有目标的红外图像可以按下列模型来描述:

$$F(u, \nu) = T(u, \nu) + B(u, \nu) + N(u, \nu) \quad (1)$$

式中, $T(u, \nu)$ 表示目标灰度值; $B(u, \nu)$ 表示背景灰度值; $N(u, \nu)$ 为随机噪声灰度值;其分布可以认为是零均值;方差 $\sigma_w^2$ 的高斯白噪声:

$$E(w(u, \nu)) = 0$$

$$E(w(u, \nu)w(k, l)) = \sigma_w^2 \delta(u - k, \nu - l) \quad (2)$$

**作者简介:**高旭辉(1980-),男,高工,主要从事红外整机设计和光电系统设计的总体技术研究。E-mail:gaoxuhui2004@126.com  
**收稿日期:**2012-01-11; **修订日期:**2012-01-19

从公式(1)可以看出,对于红外图像数据来说,目标和噪声呈现为陡峭的脉冲,属于空间频域的高频部分;背景为大块的起伏,变化较慢,为空间频域的低频部分。基于滤波的背景抑制算法正是从这一角度出发将背景抑制问题归结为一个高通滤波问题。通常的高通滤波方法有高通模板滤波<sup>[4]</sup>、数学形态学滤波等方法<sup>[8]</sup>。本文将采用实验的方法研究与分析基于滤波的背景抑制算法效果。

选取如下三帧图像做为测试图,如图 1 所示。



图 1 测试图(对应帧号分别为 1,2,3)

首先利用高通模板完成滤波,试验中采用  $5 \times 5$  的高通模板,如下矩阵所示:

$$\begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & 24 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

高通模板滤波的实质是由每个中心像素灰度值减去其局部邻域各像素灰度平均值。如果不是目标像素,则与局部邻域像素均值相似,因此其差值很小,若是目标像素,则差值为较大的值。显然通过这样的方法有利于从图像中抑制背景。背景抑制后的结果如图 2 所示。

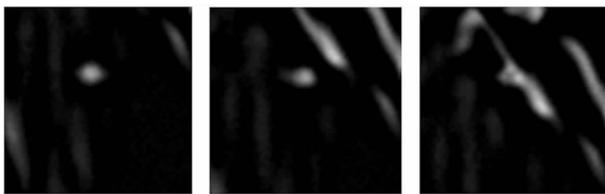


图 2 高通模板滤波处理结果

然后我们采用数学形态学 Top-Hat 变换算法进行背景抑制,Top-Hat 变换算子定义为:

$$\text{HAT}(f) = f - (f \circ g) \quad (4)$$

其中, $g$  为结构元素; $(f \circ g)$  为用结构元素  $g$  对  $f$  进行灰度开运算。背景抑制结果如图 3 所示。



图 3 形态学滤波处理结果

分别对原始图像、高通模板滤波、形态学滤波结果进行分析,统计其信杂比,我们可以得到表 1。

表 1 原始图像、高通模板滤波以及形态学滤波信杂比对比表

图像帧号	1	2	3
SCR			
原始图像	1.21	1.19	1.01
高通模板滤波	10.53	8.47	5.33
形态学滤波	6.69	4.1	3.65

从表 1 的实验结果可以知道,基于滤波的背景抑制算法、对于图像中大片的慢起伏背景抑制效果很好,但是对于复杂的强烈起伏背景抑制效果较差,SCR 提高不是很显著。当目标和部分背景融合在一起时,背景抑制达不到目标检测的目的。主要是因为基于滤波的方法假设背景是慢起伏,因而在某些地面背景下该假设可能不成立,则背景抑制效果不是很好。

### 3 基于机载IRST稳定平台结构的背景抑制方法

认真分析机载IRST的成像过程,可以发现地物在跟踪过程中是接近保持不变的,只是由于载机与地面相对运动从而产生了背景的运动。如果能够对机载IRST图像序列的运动模型进行分析,得到背景与目标图像的相对运动规律,那么就可以通过运动估计的方法得到背景像在帧间的相对运动,然后通过对应的背景相减实现背景的抑制。

#### 3.1 稳定平台图像序列帧间运动模型

地面可以看成是理想的静止景物,背景图像的运动是由载机的运动引起的。在以摄像机为中心建立参考坐标系中地面上某点在运动前和后的摄像机坐标系中的位置分别为  $(x, y, z)$  与  $(x', y', z')$ , 对应的图像坐标分别为  $(u, v)$  与  $(u', v')$ 。摄像机在 3 维空间的运动有 6 个自由度,即平移  $T = (T_x, T_y, T_z)'$  和旋转  $(\alpha, \beta, \gamma)'$ , 其中  $T$  为摄像机沿摄像机坐标系三坐标轴方向的平移量,  $\alpha$  是滚转角,  $\beta$  是俯仰角,  $\gamma$  是偏移角。在帧频很高的情况下对实际图像序列的连续两帧而言,它们之间旋转通常比较小。令  $f$  为焦距,这样可以得到两幅图像中对点坐标之间的关系:

$$\begin{aligned} u' &= f \frac{u + \alpha v - \gamma f - fT_x/z}{\gamma u - \beta v + f - fT_z/z} \\ v' &= f \frac{-\alpha u + v + \beta f - fT_y/z}{\gamma u - \beta v + f - fT_z/z} \end{aligned} \quad (5)$$

由于机载IRST系统采用的都是三轴稳定平台,当系统处于地面目标检测阶段时,机载IRST

的光轴指向可以认为不发生变化,那么对于连续两帧图像满足以下关系  $\alpha = 0, \beta = 0, \gamma = 0$  这样式(5)简化为:

$$\begin{aligned} u' &= \frac{u + fT_x/z}{1 - T_z/z} \\ v' &= \frac{v + fT_y/z}{1 - T_z/z} \end{aligned} \quad (6)$$

如图4所示,在前视红外图像视场中,地面场景中每个点的Z坐标可能是不一样的,这样将导致图像中对应点不是一个全局的运动。为研究这一问题,依据图4,我们实际分析一下探测器中心区域内图像背景的运动。为了简化整个过程而不失去本质,讨论仅在探测器俯仰二维平面展开。

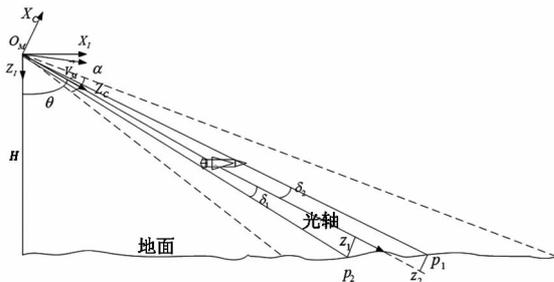


图4 机载下视IRST与目标之间的关系

在图中  $X_c, Z_c$  为摄像机坐标系坐标轴,  $Z_c$  为摄像机光轴,其中  $X_c$  垂直于  $Z_c, O_M$  为红外探测器光轴同时也为摄像机坐标系原点,其中  $X_i, Z_i$  表示固联在  $O_M$  上的牵连惯性坐标系坐标轴,其中  $Z_i$  垂直于地面向下,  $X_i$  垂直于  $Z_i, V_M$  为飞机速度矢量,  $H$  为飞机距地面的高度,光轴在载机牵连惯性系下的角度为  $\theta, \alpha$  为摄像机的视场角。虚线之间为前视红外的视野范围。在这里近似认为地面的起伏与  $H$  相比可以忽略,地面近似为平面。

令视场中地面上某点  $p_i$  在摄像机坐标系下  $Z$  坐标为  $z_i$ ,该点与光心的连线与光轴的夹角为  $\delta_i$ ,令光轴左侧夹角为正,右侧为负。从图4中可以很容易得到  $z_i$  的表达式:

$$z_i = \sin(\delta_i)H / \cos(\theta - \delta_i) \quad (7)$$

令载机速度在摄像机坐标系下  $X, Z$  轴的投影大小分别为:  $v_x, v_z$ , 采样时间为  $T$ 。这样可以得到摄像机平移量为:

$$T_x = v_x T, T_z = v_z T \quad (8)$$

其中:

$$v_x = |V_M| \cos\theta, v_z = |V_M| \sin\theta \quad (9)$$

令图像的分辨率为  $BX$ , 图像坐标的原点为摄像机坐标系原点, 图像坐标的正负规定与该点的角位置一致, 这样  $p_i$  的图像坐标为:

$$u_i = BX \cdot \delta_i / \alpha \quad (10)$$

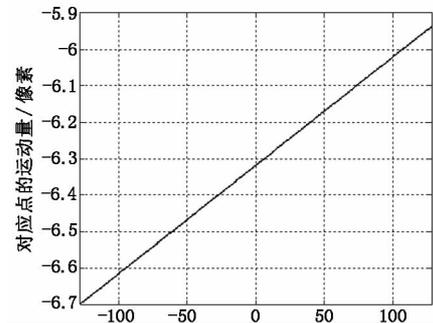
这样根据公式(6)  $p_i$  在图像中对应点的关系为:

$$u_i' = \frac{u_i + fT_x/z_i}{1 - T_z/z_i} \quad (11)$$

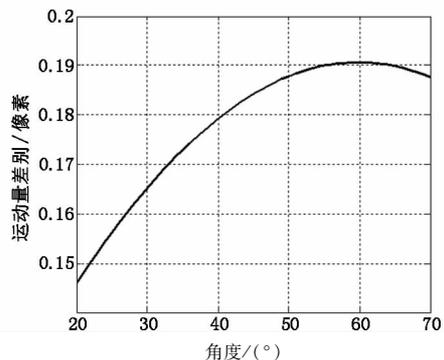
将式(7), 式(9)两式代入式(11)可得到:

$$u_i' = \frac{u_i + f|V_M| \cos\theta T \cos(\theta - \delta_i) / \sin(\delta_i) H}{1 - |V_M| \sin\theta T \cos(\theta - \delta_i) / \sin(\delta_i) H} \quad (12)$$

下面通过实验比较图像中不同位置的点运动量的大小, 假定飞机的速度幅值为1马赫。前视红外视场角为  $3^\circ \times 3^\circ$ , 图像分辨率为  $256 \times 256$ 。当系统下视角  $\theta = 60^\circ$ 。从图5实验1的结果可以看到图像两侧边缘的运动差别接近0.3个像素。但是在图像平面的中央区域运动的差别最大0.1个像素, 从实验1可以看到图像中两点距离越远运动量的差别也越大。当系统下视角  $\theta = 20^\circ \sim 70^\circ$  时, 从图5实验2可以看到不同位置的点运动量差别最大为0.19个像素。



(a) 实验1



(b) 实验2

图5 图像运动量实验

通过上面两个实验可以认为, 前视红外的背景图像量化后满足全局的平移运动。显然在偏航平面内运动也满足这样的近似, 这样有:

$$u_i' \approx u_i + T_u, v_i' \approx v_i + T_v \quad (13)$$

从上面的结果可以看到目标在帧间的运动与

背景相比很小。下面假设已经估计出背景运动量  $T_u, T_v$ , 对前后两帧对应图像相减后的结果进行分析:

令前一帧的图像为  $I_{1w}(u, \nu)$ , 其中  $-32 \leq u, \nu \leq 32$ , 令当前帧即第二帧的图像为  $I_2(u, \nu)$ , 其中  $-128 \leq u, \nu \leq 128$ , 假设在图像里面仅有背景则有:

$$I_{1w}(u, \nu) = I_2(u + T_u, \nu + T_v), (-32 \leq u, \nu \leq 32) \quad (14)$$

其中,  $T_u, T_v$  为图像运动量, 假定帧间位移不超过 20 个像素, 即满足  $T_u, T_v \in [-20, 20]$ 。

令跟踪前一帧图像中背景为:  $B_1(u, \nu)$ 。这样有:

$$I_{1w}(u, \nu) = B_1(u, \nu), (-32 \leq u, \nu \leq 32) \quad (15)$$

$$I_2(u, \nu) = B_1(u - T_u, \nu - T_v), (-32 + T_u < u < 32 + T_u, -32 + T_v < \nu < 32 + T_v)$$

当跟踪窗口内有目标时令目标为:

$$I'_{1w}(u', \nu') = \begin{cases} T(u' + T_u, \nu' + T_v), w_{u1} - T_u < u' < w_{u2} - T_u, w_{\nu1} - T_v < \nu' < w_{\nu2} - T_v \\ B_1(u', \nu'), \text{else} \end{cases} \quad (20)$$

令  $I'_{1w}(u', \nu')$ ,  $I_{1w}(u, \nu)$  两幅图像相减的结果为  $S(u, \nu)$ , ( $-32 \leq u, \nu \leq 32$ ) 这样有:

$$S(u, \nu) = \begin{cases} T(u, \nu) - B_1(u, \nu), w_{u1} < u < w_{u2}, w_{\nu1} < \nu < w_{\nu2} \\ B_1(u, \nu) - T(u + T_u, \nu + T_v), w_{u1} - T_u < u < w_{u2} - T_u, w_{\nu1} - T_v < \nu < w_{\nu2} - T_v \\ 0, \text{else} \end{cases} \quad (21)$$

从式(21)中可以看出只要背景与目标灰度上有部分区别, 即使目标的灰度比背景要低, 在  $S(u, \nu)$ , 中都将对背景区域进行很大的抑制, 使得目标区域得到大大增强。因此在这一研究思路下, 背景抑制算法的关键问题在于对全局平移量  $T_u, T_v$  进行估计。

### 3.2 基于快速区域匹配的运动估计

关于图像中运动估计的问题, 国内外学者一直都在进行探索和研究, 并提出了许多方法。现有的运动估计的方法归纳起来有基于空间像素点灰度的方法、基于空间特征的方法、基于变换域的方法、基于区域图像匹配的方法。其中基于空间像素点灰度的方法、基于空间特征的方法、基于变换域的方法大多都需要进行图像分割和图像理解, 而且计算量很大。基于区域图像匹配的方法简单快速且易于用硬件实现, 但是假设区域中图像运动量一致。从上面的分析中可以知道, 在跟踪窗口内, 图像中每个像素的运动可以很好的以全局的平移来近似。这样考虑到目标跟踪信息处理的实时性, 选择基于区域图像匹配的方法显然是恰当的。在下面的内容中讨论如何利用区域匹配进行运动估计。

$$T(u, \nu), (w_{u1} < u < w_{u2}, w_{\nu1} < \nu < w_{\nu2}) \quad (16)$$

这样可以得到前一帧含目标的图像为:

$$I_{1w}(u, \nu) = \begin{cases} T(u, \nu), w_{u1} < u < w_{u2}, w_{\nu1} < \nu < w_{\nu2} \\ B_1(u, \nu), \text{else} \end{cases} \quad (17)$$

令  $-32 + T_u < u < 32 + T_u, -32 + T_v < \nu < 32 + T_v$  的图像部分为  $I_2'(u, \nu)$ , 这样有:

$$I_2'(u, \nu) = \begin{cases} T(u, \nu), w_{u1} < u < w_{u2}, w_{\nu1} < \nu < w_{\nu2} \\ B_1(u - T_u, \nu - T_v), \text{else} \end{cases} \quad (18)$$

从上面的分析中知道与背景的运动相比, 目标在帧间可以近似认为不发生位移。这样有:

$$w_{u1} \approx w_{u'1}, w_{\nu1} \approx w_{\nu'1}, w_{u2} \approx w_{u'2}, w_{\nu2} \approx w_{\nu'2} \quad (19)$$

将  $I_2'(u, \nu)$  按  $u' = u - T_u, \nu' = \nu - T_v$  坐标平移得到的图像  $I'_{1w}(u', \nu')$ , 其定义域与  $I_{1w}(u, \nu)$  一致, 这样可以得到:

目前区域图像匹配广泛采用灰度相关匹配的方法。取当前帧的跟踪窗口内的图像为实时图令其为  $t(u, \nu)$ , 模版图为上一帧部分图像令其为  $f(u, \nu)$ , 两幅图像在平移量为  $(t_u, t_v)$  处的相关系数为  $\gamma(u, \nu)$ , 这样有:

$$\gamma(t_u, t_v) = \sum_{u, \nu} f(u, \nu) t(u - t_u, \nu - t_v) \quad (22)$$

图像的相关可以由  $f(u, \nu), t(-u, -\nu)$  之间的卷积来实现, 这样可以通过 FFT 加速相关运算。整个区域匹配进行运动估计的流程如图 6 所示。

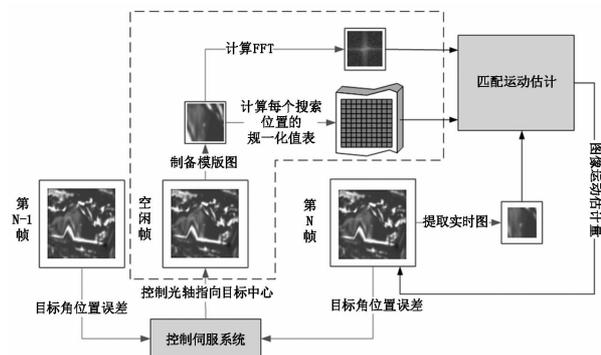


图6 区域匹配运动估计流程

### 3.3 背景抑制结果分析

通过上面的步骤可以得到当前跟踪窗口内图像

相对上一帧的偏移量( $T_u, T_v$ ),这样通过式(21),就可以得到背景抑制后的结果。对图1进行实验。利用式(21)中 $S(u, v)$ 取绝对值结果如图7所示。

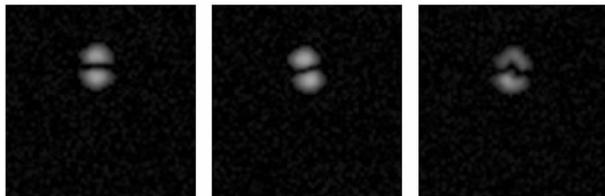


图7 背景抑制后的结果

从实验结果可以发现在图像中主观感觉上看不到背景,目标与背景相比有很强的对比度。通过表2中各项指标与前面背景抑制的结果进行比较可以看到,这一算法对图像中背景进行了很好的抑制。其中在背景复杂度最大的第3帧图像,背景抑制后的SCR比基于滤波的方法提高接近一倍。

表2 处理后各项指标

图像帧号	1	2	3
抑制后的SCR	12.31	11.57	10.27

#### 4 小结

本文针对机载IRST系统的地面背景下的运动小目标检测问题,对当前的一些典型背景估计方法进行了分析,认为当前普遍采用的基于滤波的背景抑制方法对于强烈起伏的背景抑制效果较差,不能够达到小目标检测的要求。根据运动估计的原理,提出一种基于机载IRST稳定平台结构的背景抑制方法,经过仿真发现该方法对于强烈起伏背景有着较好的抑制效果,能够有效地检测出起伏背景中的小目标。

#### 参考文献:

- [1] Luo Junhui, Ji Hongbing, Liu jin. Algorithm of IR small targets detection based on spatial filter and its application [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2007, 26(3): 209 - 212. (in Chinese)  
罗军辉, 姬红兵, 刘靳. 一种基于空间滤波的红外小目标检测算法及其应用[J]. 红外与毫米波学报, 2007, 26(3): 209 - 212.
- [2] Li Jicheng, Shen Zhenkang, Lu Xiping. Weak and small target detection based on adaptive predictions of IR background clutter [J]. Laser & Infrared, 2004, 34(6): 478 - 486. (in Chinese)  
李吉成, 沈振康, 鲁新平. 基于背景杂波自适应预测的红外弱小目标检测[J]. 激光与红外, 2004, 34(6): 478 - 486.
- [3] Wu Wei, Peng Jiexiong, Liu quan. Research on segmenting small target in the infrared image sequences [J]. Acta Electronica Sinica, 2004, 32(7): 1116 - 1119. (in Chinese)  
吴巍, 彭嘉雄, 刘泉. 对红外序列图像中小目标分割的研究[J]. 电子学报, 2004, 32(7): 1116 - 1119.
- [4] Dong Hongyan, Li Jicheng, Shen Zhenkang. Small target detection based on high-pass filtering and order filtering [J]. Systems Engineering and Electronics, 2004, 26(5): 596 - 598. (in Chinese)  
董鸿燕, 李吉成, 沈振康. 基于高通滤波和顺序滤波的小目标检测[J]. 系统工程与电子技术, 2004, 26(5): 596 - 598.
- [5] Nie Hongshan, Shen Zhenkang. An algorithm based on wiener filter for IR background suppression [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2003, 25(3): 54 - 57. (in Chinese)  
聂洪山, 沈振康. 一种基于 Wiener 滤波的红外背景抑制方法[J]. 国防科技大学学报, 2003, 25(3): 54 - 57.
- [6] Wu Wei, Peng Jiexiong, Yebing. A method for cloud background suppression and small target detection [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 2001, 29(11): 56 - 57. (in Chinese)  
吴巍, 彭嘉雄, 叶斌. 一种云层背景抑制与小目标检测方法[J]. 华中科技大学学报, 2001, 29(11): 56 - 57.
- [7] Markandey V, Reid A, Wang S. Motion estimation for moving target detection [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1996, 32(3): 866 - 874.
- [8] Pohlig S C. Spatial-temporal detection of electro-optic moving targets [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1995, 31(2): 608 - 616.