

文章编号: 1003-501X(2009)02-0045-05

单幅红外图像上的地雷检测

孙 强¹, 吴 薇^{1,2}, 王 健¹, 刘建卓^{1,2}, 董科研^{1,2}, 孙金霞^{1,2}

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 长春 130033;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 针对被动红外成像地雷探测技术中的单散雷探测问题, 结合一维信号检测理论以及现代信号处理算法, 对红外图像进行处理。文章从单幅红外图像入手, 在分析了红外图像上地雷检测原理的基础上, 结合背景红外图像的特性, 给出了地雷信号及背景图像信号的模型, 再从各模型中未知参数的特点出发, 利用现代信号处理算法, 对未知参数进行估计。当地雷信号及背景图像信号都确定后, 采用广义相关器以实现地雷信号的探测。对埋有似雷物的单幅红外图像进行检测试验。结果表明, 文中方法能够清晰的标示出地雷的存在及其位置。

关键词: 红外成像; 地雷探测; 自回归模型; 参数估计

中图分类号: TP301.6, TN219

文献标志码: A

Landmine Detection on Single Infrared Image

SUN Qiang¹, WU Wei^{1,2}, WANG Jian¹, LIU Jian-zhuo^{1,2}, DONG Ke-yan^{1,2}, SUN Jin-xia^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,

Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: For single landmine detection with the passive infrared imaging technology of the landmine detection, the infrared images were processed according to the 1-D signal detection theory and the algorithms for modern signal processing. The signal models of landmine and background image were given by analyzing the theory of landmine detection on the infrared image and combining the characteristic of the background infrared image. Then, combined with the characteristics of the models' unknown parameters, we estimated the unknown parameters through the algorithms of modern signal processing. When the landmine and the background image signal were determined, the generalized correlator was used to detect the landmine. Testing results with the single infrared image burying the target show that the method can mark the landmine clearly.

Key words: infrared imaging; landmine detection; autoregressive model; parameter estimation

0 引 言

目前世界上的地雷多种多样, 使用过的就有 2 000 多种, 最常用的有反坦克地雷和防步兵地雷。此类地雷通常结构简单、体积小, 外壳一般由塑料或木头等非金属制成, 所以一旦这种地雷被埋在地下, 将很难被发现。同时地雷武器在作战中的客观效应, 一方面刺激了各国军队地雷武器的不断发展, 另一方面也刺激了地雷探测技术与手段的进一步发展^[1]。现有的地雷探测技术主要有: 生物探测^[2]、地磁学或磁学探

收稿日期: 2008-10-06; 收到修改稿日期: 2008-11-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60507003); 中国科学院国防科技创新基金支持; 中国科学院知识创新工程领域前沿资助项目; 吉林省科技发展计划杰出青年项目支持; 国家 863 计划资助项目(2007AA12Z110)

作者简介: 孙强(1971-), 男(汉族), 黑龙江海伦人。博士, 研究员, 主要研究方向为红外光学、二元光学、红外光学仿真等。
E-mail: sunqiang_sklao@yahoo.com.cn。

通信作者: 吴薇(1983-), 女(满族), 吉林通化人。硕士研究生, 主要研究红外图像上的目标检测与识别。E-mail: hunterkitty@yahoo.cn。

测^[3]、核四极矩共振探测^[4]、声纳成像探测^[5]、雷达探测^[6]、红外探测^[7-10]等地雷探测技术。其中,核四极矩技术、探地雷达、红外成像有着较好的发展前景。但是还没有一项技术能够在考虑到大小重量费用的前提下,独立的高可靠高效率地完成地雷探测工作。因此多种技术通过信息处理技术,有机的综合在一起来完成这项工作成为了当前地雷探测的发展趋势。

文中将红外探测技术与信号检测技术相结合,提出了一种单幅红外图像上的地雷检测算法。它利用自回归(AR)模型对红外背景图像背景进行预测,然后采用信号检测中广义估计-相关器在除去背景的红外图像上进行地雷信号的检测,从而实现单幅、单波段红外图像上的地雷探测。

1 数据模型

传统的信号检测从研究噪声中信号的统计检测出发的,即利用假设检测的方法设计一个最佳检测器,用以判断噪声中是否有信号或者区分噪声中的不同信号。而图像中的目标检测问题与传统的一维信号检测问题却是有很大区别的。因为在此背景也是信号,但不是要检测的信号。将红外图像上每一像素点的灰度值都看作是这一点上我们感兴趣的信号的灰度值与其他信号的灰度值的叠加,如果将图像上我们不感兴趣的信号减去,仅留下感兴趣的信号,则图像上的目标检测问题就可以用传统的一维信号检测方法来处理了。

根据需要,我们将采集到的红外图像 $i(x, y)$ 定义为

$$\begin{cases} H_0 : i(x, y) = b(x, y; \theta_b) \\ H_1 : i(x, y) = t(x, y; \theta_t) + b(x, y; \theta_b) \end{cases} \quad (1)$$

其中: H_0 是没有地雷的情况, H_1 是有地雷的情况。 $i(x, y)$ 定义为采集到的红外图像在点 (x, y) 处像素的灰度值, $t(x, y)$ 定义为埋藏的地雷信号在点 (x, y) 处像素的灰度值, $b(x, y)$ 定义为背景及噪声信号在点 (x, y) 处像素的灰度值。

1.1 地雷信号模型

由于环境因素的影响,即使是相同的地雷在不同的情况下在红外图像上的描述也是会有所不同的。考虑外界环境不变时的同种地雷,则地底温度的变化在红外图像上将会表现为亮度的变化,如果地雷埋藏的浅,则红外图像上的地雷信号较强;如果地雷埋藏的深,那么红外图像上的地雷信号就比较微弱,并且由于受外界环境因素的影响在红外图像上看起来也比较模糊。对于地雷信号模型的建立一般采用的都是有限元分析的方法^[9-10],在此选用文献[10]中的地雷模型:

$$t(x, y; \theta_t) = c \cdot e^{-1/d(x^2+y^2)} * m(x, y) \quad (2)$$

其中: $\theta_t = [c \quad d]^T$, c 和 d 均是可变的参数,与地雷的种类及其埋藏条件有关。当 c 和 d 取不同的数值时,可以实现对不同种类以及不同埋藏条件下地雷的探测。

1.2 背景信号模型

在图像的随机描述中,一幅红外自然背景图像可以看作是遍历的平稳随机过程^[11],同时在随机过程理论中,平稳的随机过程可以看作是用白噪声激励一个线性时不变系统而产生的,而这个线性时不变系统又可以用一个模型为 AR 模型的差分方程来描述^[12],这样就将红外背景图像同 AR 模型联系到了一起,即红外自然背景图像可以描述为由白噪声激励一个 AR 模型而得到的信号:

$$b(x, y) = -\sum_{k=0}^{K-1} \sum_{l=0}^{L-1} a_{k,l} \cdot b(x-k, y-l) + e(x, y) = \hat{b}(x, y) + e(x, y), (k, l) \neq (0, 0) \quad (3)$$

其中: $e(x, y)$ 为白噪声(也是预测误差), $\hat{b}(x, y)$ 为点 (x, y) 处背景像素灰度值的预测值, $a_{k,l}$ 为 AR 模型的模型参数,定义其向量形式为: $\theta_b = [a_{0,1}, a_{0,2}, \dots, a_{K-1, L-1}]^T$ 。

2 参数计算

如前节所述,在采集到的红外图像上的地雷探测问题可以视为图像中的目标检测问题。一般的图像检测过程可以分为一下两个步骤:1) 在一帧图像上确定一些目标(最起码是候选目标);2) 利用序列图像来确

定真实的目标。本文的工作是单幅图像上的目标预处理及预检测，即前述两个步骤中的第一步。

2.1 自回归模型参数的计算

当在假设条件 H_1 下时，地雷信号用式(2)来表示，包含噪声的背景信号由式(3)来表示。根据式(1)和式(3)经过变换后，可以将采集到的红外图像 $i(x, y)$ 改写为以下形式：

$$i(x, y) = t(x, y; \theta_t) - \sum_{k=0}^{K-1} \sum_{l=0}^{L-1} a_{k,l} [i(x-k, y-l) - t(x-k, y-l; \theta_t)] + e(x, y), (k, l) \neq (0, 0) \quad (4)$$

这样可以使用最小二乘法对 AR 模型的参数及地雷模型参数进行估计：

$$\hat{\theta} = [\theta_b \quad \theta_t]^T = \arg \min_{\theta} \sum_{x,y} (i(x, y) - t(x, y; \theta_t) + \sum_{k=0}^{K-1} \sum_{l=0}^{L-1} a_{k,l} [i(x-k, y-l) - t(x-k, y-l; \theta_t)])^2, (k, l) \neq (0, 0) \quad (5)$$

在式(5)中有两组未知的参数：AR 模型的参数 θ_b 和地雷模型的参数 θ_t 。一般情况下，采集到的红外图像的信噪比都较低，所以可以假设 $c = 0$ ，先估计参数向量 θ_b 。在计算参数向量 $\hat{\theta}_b$ 时，可以使用 Levinson 递推法^[12]，并用 FPE 准则来确定 AR 模型参数 $\hat{\theta}_b$ 的阶次。当完全确定了 AR 模型的阶数及系数后，利用 (x, y) 点前的 m 个背景点的像素灰度值 $b(x, y-1), \dots, b(x-k, y-l), k+l=m$ 就可以预测出点 (x, y) 的背景像素灰度值 $\hat{b}(x, y)$ ：

$$\hat{b}(x, y) = - \sum_{k=0}^{K-1} \sum_{l=0}^{L-1} a_{k,l} \cdot b(x-k, y-l), (k, l) \neq (0, 0) \quad (6)$$

对整幅图像进行处理后可以预测出没有地雷存在时的背景图像 $\hat{b}(x, y)$ 。

2.2 地雷模型参数的计算

将求出的 AR 模型的参数代入到式(5)，可以得到地雷模型参数的表达式：

$$\begin{aligned} \hat{\theta}_t &= \arg \min_{\theta_t} \sum_{x,y} (\sum_{k=0}^{K-1} \sum_{l=0}^{L-1} \hat{a}_{k,l} \cdot i(x-k, y-l) - \sum_{k=0}^{K-1} \sum_{l=0}^{L-1} \hat{a}_{k,l} \cdot t(x-k, y-l; \theta_t))^2 = \\ &= \arg \min_{\theta_t} \sum_{x,y} (\hat{a}_{x,y} * i_{x,y} - \hat{a}_{x,y} * t_{x,y; \theta_t})^2 = \arg \min_{\theta_t} \sum_{x,y} (\hat{a}_{x,y} * i_{x,y} - ce^{-\frac{(x^2+y^2)}{d}} * \hat{a}_{x,y} * m_{x,y})^2 \end{aligned} \quad (7)$$

其中 $\hat{a}_{0,0} = 1$ 。在求解 c 和 d 时，可以将 c 表示为 d 的函数再进行计算。

在上述讨论中，我们先假设 $c = 0$ 即 $\hat{\theta}_t$ 是已知的，求解 $\hat{\theta}_b$ ；而当信噪比较高的时候也可以认为 $\hat{\theta}_b$ 是已知的，而求解 $\hat{\theta}_t$ ，这时一般假设 $\{a_{k,l}\} = 0$ 为初始值开始计算。

将我们预测出的背景信号及地雷信号代入到式(1)中，则就可以将其表示为传统的信号检测问题了：

$$\begin{cases} H_0 : r(x, y) = i(x, y) - \hat{b}(x, y; \hat{\theta}_b) = e(x, y) \\ H_1 : r(x, y) = i(x, y) - \hat{b}(x, y; \hat{\theta}_b) = t(x, y; \hat{\theta}_t) + e(x, y) \end{cases} \quad (8)$$

其中 $r(x, y)$ 表示去除预测背景后的红外图像。

3 地雷检测

针对式(8)的二元假设检验问题，可以使用白噪声中确定性信号的检测方法检测地雷信号^[13]。这里使用仿形—相关检测器进行信号检测(如图 1)。其检测器的表达式为 $T(\mathbf{r}) = \sum_{k=0}^{K-1} \sum_{l=0}^{L-1} r(k, l) t(k, l; \hat{\theta}_t)$ 。当 $T(\mathbf{r}) > \gamma$ 时，判定式(8)中 H_1 成立，即认为有地雷存在。否则，判定式(8)中 H_0 成立，认为没有地雷存在。

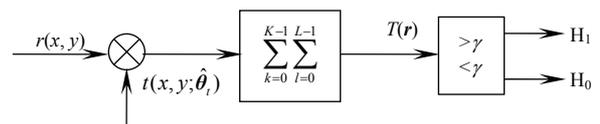


图 1 仿形—相关器
Fig.1 Replica—correlator

4 处理结果与结论

看一下对几幅实际拍摄的红外图像进行检测的结果。图像采集时间为 20:30，环境温度 25℃，天气晴朗。拍摄红外图像所用的红外热像仪为实验室自行研制的 FLIR 红外热像仪，热像仪的相面大小为 320×240，

CCD 像元尺寸为 $40\ \mu\text{m}$ ，热像仪的噪声等效温差(NETD)为 $85\ \text{mK}$ ，焦距 f 为 $90\ \text{mm}$ ，视场角为 10° 。拍摄的对象为放置在热像仪前方 $5\ \text{m}$ 处被干沙土所覆盖的圆形塑料似雷物。图 2 是在只有一个似雷物存在时所拍摄的三幅红外图像，图 4 是在有两个似雷物存在时所拍摄的三幅红外图像。

在对图 2 及图 4 中从不同方位拍摄到的红外图像进行预处理的时候，由于所拍摄图像的低信噪比特性，所以在对 AR 模型进行求解的过程中，都做了地雷信号不存在的假设，即认为 $c=0$ ，然后利用 FPE 准则对 AR 模型定阶，最后为了获得高对比度图像，采用了仿形—相关器对地雷信号进行检测。



图 2 有一颗似雷物存在时的红外图像

Fig.2 Infrared image of one target

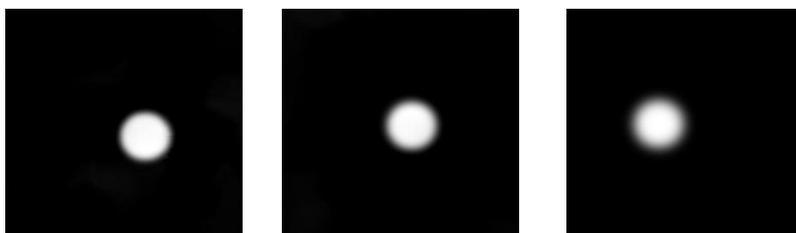


图 3 与图 2 相对应的处理结果

Fig.3 Corresponding result to fig.2



图 4 有两个目标存在时的红外图像

Fig.4 Infrared image of tow targets

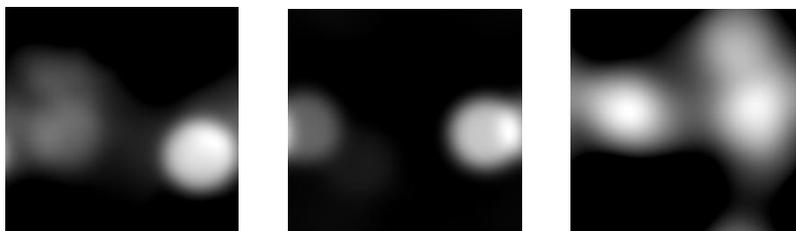


图 5 与图 4 相对应的处理结果

Fig.5 Corresponding result to fig.4

从图 3 及图 5 中可以看出，在对红外图像进行检测处理后，只有在有地雷存在的地方，图像上像素的灰度值才很高，在无雷区域，图像上像素的灰度值都接近于零。这样的图像对比度明显，信噪比较高，能够对地雷存在区域做出清晰的标示，不论是对人为判断还是对自动判断，都提供了有利的条件。同时，从图 3 及图 5 中也能够看出，不论是在有单个还是两个目标存在的情况下都能对其进行检测及定位。虽然在有两颗似雷物存在时的处理结果局部区域信噪比仍然较低，但是已经能够满足对于红外图像预处理及预检

测的要求, 更精确的判断, 以及对系统检测性能的评价将在下一步红外图像序列的处理中进行。

参考文献:

- [1] Christopher F F. **Jane's Military and Vehicles Logistics** [M]. London: Jane's Information Group, 1994.
- [2] Maechler Ph. Detection technologies for anti-personnel mines [C]// **the Symposium on Autonomous Vehicles in Mine Countermeasures**, Monterey, April 4-6, 1995: 6150-6154.
- [3] Ye Xiao-ning, Cui Wei, Berg Daniel P, *et al.* Detection of electronic mines, timers, and fuses through electromagnetic interference signatures and stimulated emissions [J]. **Proceeding of SPIE**, 2000, **4038**: 66-77.
- [4] Liu Feng, Tantum Stacy L, Collins Leslie M, *et al.* Statistical signal processing for detection of buried land mines using quadrupole resonance [J]. **Proceeding of SPIE**, 2000, **4038**: 572-577.
- [5] Dobeck Gerald J. Algorithm fusion for the detection and classification of sea mines in the very shallow water region using side-scan sonar imagery [J]. **Proceeding of SPIE**, 2000, **4038**: 348-361.
- [6] Feng Xuan, Zhou Zheng-shu, Takao Kobayashi, *et al.* Estimation of ground surface topography and velocity model by SARGPR and its application to landmine detection [J]. **Proceeding of SPIE**, 2005, **5794**: 514-521.
- [7] Gu Irene Yu-hua, Tjahjadi Tardi. Detecting and locating landmine fields from vehicle- and air-borne measured IR images [J]. **Pattern Recognition**, 2002, **35**(12): 3001-3014.
- [8] Muscio Alberto, Corticelli Mauro A. Experiments of thermographic landmine detection with reduced size and compressed time [J]. **Infrared Physics & Technology**, 2004, **46**: 101-107.
- [9] Lundberg Magnus, Gu Irene Y H. A 3-D matched filter for detection of land mine using spatio-temporal thermal modeling [J]. **Proceeding of SPIE**, 2000, **4038**: 179-188.
- [10] Lundberg Magnus, Svensson Lennart B, Gu Irene Y H. Infrared Detection of Buried Land Mines Based on Texture Modeling [J]. **Proceeding of SPIE**, 2001, **4394**: 199-206.
- [11] Anil K J. 数字图像处理基础[M]. 韩博, 徐枫, 译. 北京: 清华大学出版社, 2006: 150-183.
Anil K J. **Fundamentals of Digital Image Processing** [M]. HAN Bo, XU Feng. Beijing: Tsinghua University Press, 2006: 150-183.
- [12] 张贤达. 现代信号处理: 第二版 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2003: 65-114.
ZHANG Xian-da. **Modern Signal Processing: Second Edition** [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003: 65-114.
- [13] 肖梅, 韩崇昭, 张雷. 一种视频序列的背景提取算法[J]. 光电工程, 2005, **32**(4): 78-81.
XIAO Mei, HAN Chong-zhao, ZHANG Lei. Background subtraction for video image sequence [J]. **Opto-Electronic Engineering**, 2005, **32**(4): 78-81.