

红外图像上的单散雷探测

Single Landmine Detection in Infrared Image

(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;2.中国科学院研究生院) 吴薇^{1,2} 孙强¹ 王健¹ 刘建卓^{1,2} 董科研^{1,2} 孙金霞^{1,2}

WU Wei SUN Qiang WANG Jian LIU Jian-zhuo DONG Ke-yan SUN Jin-xia

摘要: 针对红外图像中单散雷的探测问题,提出了基于图像的随机模型及信号检测理论的地雷探测方法。从自然背景红外图像的随机描述出发,将背景红外图像建模为自回归(AR)模型,并用现代信号处理的方法将其转化成高斯白噪声,再利用信号检测理论中的 Rao 检验进行地雷信号的检测,解决了复杂背景下红外图像中单散雷探测及定位的难题。较之现有的匹配滤波检测方法,该方法有着更好的检测性能,试验结果也验证了该方法的优越性。

关键词: 红外成像;地雷探测;自回归模型;Rao 检验;探测性能

中图分类号: TP391.41

文献标识码: A

Abstract: For the question of single landmine detection in infrared image, a new way was given, which based on the stochastic model of image and the signal detection theory. According to the stochastic description of the background image, we can modeling the background infrared image with the autoregressive model, and change the background image into white Gauss noise by the modern signal processing method, then use the Rao test to detect the signal of landmine in infrared image, finally we have solved the problem of the single landmine detection and location in the infrared image under the complex background. Compared with the match filter method, this method has the better detection performance, and the results also prove this method superiority.

Key words: IR imaging; Landmine detection; AR model; Rao test; Detection performance

1 引言

地雷探测是一项非常困难的工作,而当前新的低金属含量或无金属含量的地雷使探雷工作更加困难。又由于当前的探雷传感器不十分合适,所以扫雷小组工作的效率非常差,也造成了排除地雷的费用远远高于埋设地雷的费用。如何提高地雷探测的效率并降低地雷探测的成本已经成为目前地雷探测技术的研究和发展方向。

地雷探测技术中的被动红外成像探雷技术,由于其探测原理不受地雷材料的限制以及在探测距离和隐秘性方面的优势,已经成为目前地雷探测的有效方法之一。现有的被动红外成像探雷系统,大多采用机载红外成像系统以实现大面积的雷场侦察。它们通过对采集的红外图像序列进行矫正、增强等处理,并结合雷场的排列特征以实现对远距离雷场的探测。这样虽然增大了探测的面积,但是却降低了探测的准确度,而且对于单散雷的识别也显得无能为力。瑞典查尔姆斯理工大学所研究的应用光学多波段探测器并基于地雷模型及背景参数模型的地雷探测方法,虽然提高了探测精度但费用也随之增加,同时所需处理的数据量也很大。

针对上述存在的问题,考虑从单一波段的单幅红外图像入

手,首先分析了红外图像上地雷检测的原理,结合自然背景红外图像的特性,给出了地雷信号以及背景图像信号的数学模型。然后从地雷和背景模型的特点出发,结合信号检测理论,对红外图像上的地雷信号进行了探测。最后分析了文中方法的检测性能,并将其与理想匹配滤波的方法进行了对比分析。

2 探测原理

由于红外图像中的地雷信号是被掩埋在由土壤以及热交换作用所引起的背景噪声中的,所以在红外图像进行单散雷识别的时候,可以认为进行如下的假设检验:

$$\begin{aligned} H_0: i &= n \\ H_1: i &= s + n \end{aligned} \quad (1)$$

其中, i 表示待识别的红外图像, s 表示地雷信号, n 表示背景噪声。当没有地雷存在的时候,图像 i 就是背景噪声图像 n ; 当有地雷存在的时候,图像 i 是地雷 s 与噪声 n 相叠加所形成的图像。我们的工作就是在(1)式的假设检验中判断是 H_0 成立还是 H_1 成立,当判 H_1 成立时,则认为有地雷存在。这里假设地雷信号 s 是具有未知参数的确定性信号,表达式为:

$$s(x, y) = \alpha \cdot e^{-\frac{(x^2 + y^2)}{\beta}} * m(x, y) \quad (2)$$

其中 α 为未知的参数。由于埋设地雷的背景环境总是变化的,所以在(1)式中 n 是未知的。下面需要对背景模型做一些分析与假设。

当用随机模型来描述图像时,自然背景的图像通常被看作是一个遍历的平稳随机过程。而在随机信号理论中,一个平稳的随机过程又可以通过用白噪声激励一个线性时不变系统来产生,这个线性时不变系统可以用 AR 模型所表示的线性差分方程来描述,这样就将红外背景图像与 AR 模型联系到了一起。

吴薇: 研究生

基金项目: 国家 863 计划资助项目(2007AA12Z110); 基金申请人: 孙强; 项目名称: 基于衍射透镜的红外双波段高光谱成像技术研究; 国家 863 计划国家自然科学基金资助项目(606507003); 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。

可以认为自然背景红外图像是用白噪声激励一个由 AR 模型所描述的差分方程而产生的有色噪声。同时,我们参考了图像背景模型建立时,广为使用的基于统计学建模方法所建立的高斯分布模型,认为背景红外图像 n 是符合高斯分布的。基于上述原理,将背景建模为高斯分布的 AR 模型。

这样,(1)式中的假设检验可以看成是未知参数的有色高斯噪声中具有未知参数的确定性信号的检测。解决此类问题时,需要先将有色噪声进行白化处理。概括以上内容,可以将单散雷的探测分为以下四步(如图1):1.对采集到的红外图像进行行间去相关;2.对去相关后的每一行数据进行白化处理;3.在白化后的各行中进行检测,判断是否有地雷信号的存在;4.进行前述过程的逆变换得到处理后图像。



图1 红外图像处理流程图

3 去相关及白化处理

在进行红外图像中地雷检测之前,首先对图像进行去相关运算,将二维的图像信号转化为一维信号,然后再进行一维的信号检测。假设红外图像 i 的第 n 列为 $i[n]$, 如果用一个酉变换矩阵左乘图像矩阵,可以实现对其行间去相关。即对 i 的各列做变换 $x[n] = \psi i[n]$, 其中 ψ 选择 KL 变换矩阵,则变换后的图像各行互不相关。

经过变换后,对变换后图像的每一行 K , (1)式所表达的三元假设检验可以表示为如下的假设检验:

$$\begin{aligned} H_0: x_k[n] &= \omega_k[n] \quad n=1,2,\dots,N \\ H_1: x_k[n] &= \alpha t_k[n] + \omega_k[n] \quad n=1,2,\dots,N \end{aligned} \quad (3)$$

其中 $\omega[n] = \psi n[n]$, $\alpha t_k[n] = \psi s[n]$, $n[n]$ 和 $s[n]$ 分别为 n 和 s 的列向量。

由前面对于背景模型的分析,在这里,可以将去相关后的背景图像的每一行 $\omega_k[n]$ 表示成相应的 AR 模型:

$$\omega_k[n] = \sum_{i=1}^p a_k[i] \omega_k[n-i] + \varepsilon_k[n], \quad n, k=1,2,\dots,N \quad (4)$$

其中 $\varepsilon_k[n]$ 满足:

$$E[\varepsilon_k[n]] = 0, E[\varepsilon_k[n] \varepsilon_{k'}[n']] = \sigma_{\varepsilon_k}^2 \delta(n-n') \delta(k-k') \quad (5)$$

即 $\varepsilon_k[n]$ 是方差为 $\sigma_{\varepsilon_k}^2$ 的高斯白噪声。将(4)式移项即为背景信号的白化表达式:

$$\varepsilon_k[n] = \omega_k[n] - \sum_{i=1}^p a_k[i] \omega_k[n-i], \quad n, k=1,2,\dots,N \quad (6)$$

4 信号检测

在一般的数据处理问题中,可以将数据表示为一般的线性模型形式:

$$x = H\theta + \omega \quad (7)$$

其中 H 为观测矩阵,一般是已知的, θ 是已知的或未知的参数, ω 是噪声矢量,在文中 $\theta = \alpha$, $H = t[n]$ 。则与(3)式等效的参数检验为:

$$\begin{aligned} H_0: \alpha &= 0, \theta_{\omega k} \\ H_1: \alpha &\neq 0, \theta_{\omega k} \end{aligned} \quad (8)$$

其中, α 为未知参数, $\theta_{\omega k} = [a_k^T \sigma_{\varepsilon_k}^2]^T$ 为多余参数矢

量, $a_k = [a_k[1] \ a_k[2] \ \dots \ a_k[N]]^T$ 为 AR 模型的参数矢量。

在(8)式所表示的假设检验中,当没有地雷存在时,则 $\alpha = 0$; 当有地雷存在时, $\alpha \neq 0$ 。与此同时,两种假设检验下均有未知的背景参数矢量 $\theta_{\omega k}$ 存在。根据未知参数的情况,使用 Rao 检验对地雷信号进行检测,令 $\theta_r = \alpha$, $\theta_s = \theta_{\omega k}$, $\theta = [\theta_r \ \theta_s]^T$, 检测器为:

$$T_R(x_k) = \frac{\partial \ln p(x; \theta)}{\partial \theta_r} \Big|_{\theta=\bar{\theta}} \left[I^{-1}(\bar{\theta}) \right]_{\theta_r \theta_r} \cdot \frac{\partial \ln p(x; \theta)}{\partial \theta_r} \Big|_{\theta=\bar{\theta}} \quad (9)$$

其中

$$\bar{\theta} = [\theta_{r0}^T \ \theta_{s0}^T]^T = [0 \ \theta_{\omega k0}^T]^T$$

是在 H_0 条件下 θ 的最大似然估计量, $I(\theta)$ 为 Fisher 信息矩阵。将已知量代入整理,最后可得 Rao 检验的检验统计量为:

$$T_R(x_k) = \frac{(t^T C^{-1}(\hat{\theta}_{\omega k0}) x)^2}{t^T C^{-1}(\hat{\theta}_{\omega k0}) t} \quad (10)$$

其中 $t = [t_k[1] \ t_k[2] \ \dots \ t_k[N]]^T$, $C(\hat{\theta}_{\omega k0})$ 是 ω_k 的协方差矩阵, $\hat{\theta}_{\omega k0}$ 是 $\theta_{\omega k}$ 在 H_0 条件下的极大似然估计量。在 $\theta_{\omega k}$ 中 AR 模型的参数矢量 a_k 可以由 Levinson 递推法求出。最后将计算出的各参数值代入到(10)式中求出 $T_R(x_k)$, 当 $T_R(x_k) > \gamma$ 时,我们判 H_1 成立,认为此时红外图像上有地雷存在。

5 探测性能

一个地雷探测方法的好坏主要体现在由检测概率及虚警概率表示的检测性能上。下面来讨论一下本文所述方法的检测性能。针对采用 Rao 检验进行鉴别的系统,其检测函数是符合 chi 平方 (χ_N^2) 分布的。这样,其虚警概率及检测概率可以表示为 χ_N^2 分布的中心及非中心右尾概率。所以虚警概率 P_{fa} 及检测概率 P_d 分别为:

$$P_{fa} = Q_{\chi_p^2}(\gamma) = P\{T_R(x_k) > \gamma; H_0\} \quad (11)$$

$$P_d = Q_{\chi_p^2(\lambda)}(\gamma) = P\{T_R(x_k) > \gamma; H_1\} \quad (12)$$

其中,非中心参量为:

$$\begin{aligned} \lambda &= (\theta_{r1} - \theta_{r0})^T [I_{\theta_{\theta}}(\bar{\theta}) - I_{\theta_{\theta}}(\bar{\theta}) I_{\theta_{\theta}}^{-1}(\bar{\theta}) I_{\theta_{\theta}}(\bar{\theta})] \cdot (\theta_{r1} - \theta_{r0}) = \alpha^2 t^T C^{-1}(\hat{\theta}_{\omega k0}) t \\ &= \hat{\sigma}_{\varepsilon k0}^2 \sum_{n=p}^{N-1} \sum_{j=0}^p \hat{a}_{k0}[j] \gamma[n-j]^2 \end{aligned} \quad (13)$$

将(11)式和(12)式合并,可得虚警概率 P_{fa} 与检测概率 P_d 的关系为:

$$P_d = Q_{\chi_p^2(\lambda)} \left(Q_{\chi_p^2}^{-1}(P_{fa}) \right) \quad (14)$$

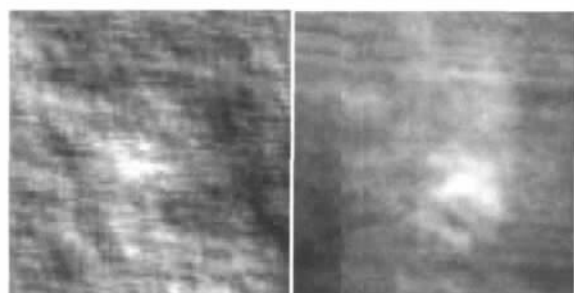
当给定检测的虚警概率时,可以通过计算得到文中算法的检测门限及检测概率。

6 实验与结论

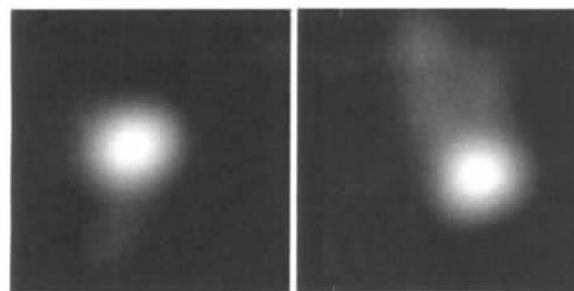
图2中,a为文献中的两幅红外图像,b为采用文中方法对a的两幅图像处理后的结果,c为文中方法的检测性能与理想匹配滤波方法的检测性能的对比。

从试验结果看来,本文的方法在显示效果上更为理想,并且从图2c的检测性能曲线上也能看出采用文中方法对含雷的红外图像进行检测,其检测性能明显优于理想匹配滤波的检测方法。

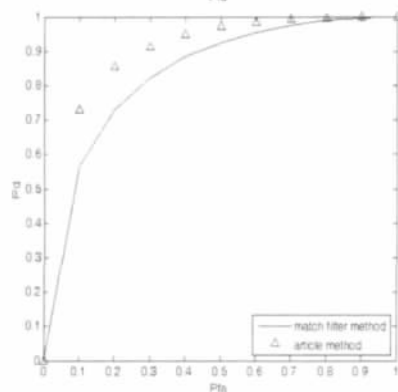
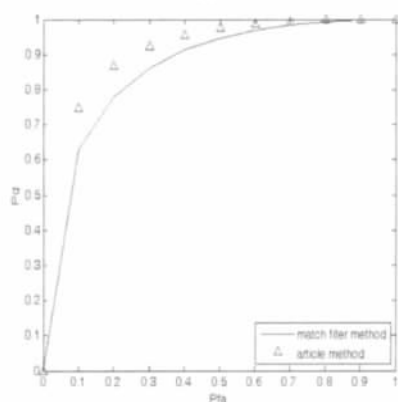
文中针对单散雷的探测问题,首先结合红外图像的组成,讨论了红外图像上自然背景模型的建立,然后从信号的二元假设检验出发,分析了其中未知参数的情况,最后利用信号检测理论中



(a)



(b)



(c)

图2 仿真实验结果

创新点: 针对被动红外成像地雷探测技术中的单散雷探测问题,在利用 AR 模型对红外背景图像建模的基础上,利用 Rao 检验准则对红外图像上的地雷信号进行了检测,算法简单、运算量小,检测性能较为理想。

项目经济效益: 92W

参考文献

[1]倪宏伟,房旭民.地雷探测技术.北京:国防工业出版社,2003.

[2]Pierre S, Jesper S, Bjarne S, Helge B. Resolution requirements for thermal detection of buried landmines [C]//SPIE, 2000, 4038: 138-145.

[3]蔡宗平,汤正平,闵海波.基于红外成像的智能诊断系统设计[J].微计算机信息,2006,22(8-2):310-312.

[4]Irene Y, Tardi T. Detecting and locating landmine fields from vehicle- and air- borne measured IR images [J]. Pattern Recognition, 2002, 35(12): 3001-3014.

[5]Stefan S, Magnus U, Sten N, Anna L, Magnus L. Optical detection of land mines at FOI[C]//SPIE, 2001, 4491: 20-31.

[6]Stefan S, Anna L, Sten N, Magnus U, Dan L. Land mine detection by IR temporal analysis: Physical numerical modeling [C]//SPIE, 2005, 5794: 30-42.

[7]Magnus L, Lennart S, Irene Y. Infrared Detection of Buried Land Mines Based on Texture Modeling [C]//SPIE, 2000, 4394: 199-206.

[8]Magnus L, Irene Y. A 3-D matched filter detection of land mines using station-temporal thermal modeling [C]//SPIE, 2000, 4038: 179-188.

[9]刘婧,孙继银,朱俊林,陈捷.前视红外景象匹配制导基准图生成研究[J].微计算机信息,2007,23(10-3):279-281.

[10]Magnus L. Infrared Land Mine Detection by Parametric Modeling[C]//Proceeding of the Acoustics, Speech, and Signal Processing on IEEE International Conference, 2001, 5: 3157-3160.

作者简介: 吴薇,1983年生,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所研究生,主要从事红外图像上目标的检测与识别方面的研究;孙强,1971年生,博士,副研究员,主要研究方向为红外光学、二元光学、红外光学仿真等。

Biography: WU Wei, female, 1983.1, study in Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences. The direction of research: Target detection and recognition on the infrared image.

(130033 吉林长春 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) 吴薇 孙强 王健

刘建卓 董科研 孙金霞

(100039 北京 中国科学院研究生院) 吴薇 刘建卓 董科研 孙金霞

(State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China) WU Wei SUN Qiang WANG Jian LIU Jian-zhuo DONG Ke-yan SUN Jin-xia (Graduate School-of-the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China) WU Wei LIU Jian-zhuo DONG Ke-yan SUN Jin-xia

通讯地址: (130033 长春 吉林省长春市经济技术开发区营口路 20 号 D 座 517) 吴薇

(收稿日期:2009.06.25)(修稿日期:2009.7.25)

书 讯

《现场总线技术应用 200 例》
55 元 / 本 (免邮资) 汇至

《PLC 应用 200 例》
110 元 / 本 (免邮资) 汇至

地址:北京海淀区皂君庙 14 号院鑫雅苑 6 号楼 601 室
微计算机信息 邮编:100081
电话:010-62132436 010-62192616 (T/F)