

基于多时相多光谱红外图像浅层地下目标探测

谷延锋¹, 丰炳波¹, 郑贺¹, 刘柏森^{1,2}

(1. 哈尔滨工业大学 信息工程系, 150001 哈尔滨; 2. 黑龙江工程学院 电子工程系, 150050 哈尔滨)

摘要: 浅层地下目标影响周围区域的热物理特性, 引起区域表面温度差异随时间变化的现象, 对应于红外图像上则导致灰度值差异随时间变化. 针对这一问题, 本文研究了包含地下目标的区域温度分布的数学模型, 揭示了区域温度变化和地下目标的热物理性质与埋藏状况的关系, 进行求解得到区域表面温度分布的预测值. 利用实际获取的多时相多光谱红外图像反演区域地表温度分布, 利用多光谱图像丰富的光谱信息来反演区域表面的多时相温度分布, 和预测值进行对比, 使区域表面温度分布的探测值和预测值相一致的待求解参数的估计值即为地下目标的探测结果.

关键词: 温度分布模型; 多时相; 多光谱; 红外探测; 浅层地下目标

中图分类号: TP722

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2014)03-0014-06

Detection of subsurface targets based on multitemporal and multispectral infrared image

GU Yanfeng¹, FENG Bingbo¹, ZHENG He¹, LIU Baisen^{1,2}

(1. Dept. of Information Engineering, Harbin Institute of Technology, 150001 Harbin, China;

2. Dept. of Electronic Engineering, Heilongjiang Institute of Technology, 150001 Harbin, China)

Abstract: Since the existence of buried targets influences the thermal physical properties of the surrounding area, causing the temperature differences over time in the regional surface, which reflected in the infrared image is the gray value changes over time. To solve the problem, we research on the mathematical model of temperature change of the region containing buried targets, and reveal the relationship between the regional temperature changes and thermal physical properties and buried position of the buried targets. We use real multi-temporal and multi-spectral infrared images to get the temperature distribution of the region surface which compared with the solution of the mathematical model. By continuously changing the value of the thermal model parameters, we can get a solution which consistent with the temperature distribution obtained by the real temporal infrared images, and then we complete the detection of subsurface targets.

Keywords: temperature distribution model; multi-temporal; multi-spectral; infrared detection; subsurface targets

近年来, 地下目标探测技术受到越来越多的关注, 并具有广泛的应用领域, 如: 埋藏管道探测、地下矿藏资源分布探测、埋藏地雷目标探测、地下军事设施探测等, 具有极高的军事应用及民用经济价值. 根据探测原理和手段的不同, 常见地下目标探测技术手段有: 电磁探测、超声探测、光学探测和化学探测等^[1-2]. 其中电磁探测依据电磁波的

传播规律, 对金属目标探测比较有效, 但对非金属目标探测就无能为力了. 红外探测技术相比其他技术有明显优势. 在自然界中, 一切温度高于绝对零度的物体, 都会随其温度的不同而辐射出不同强度的红外线^[3], 红外探测技术属于被动探测, 具有较高的环境适应性, 对热特性敏感目标探测和非金属目标探测能力较强, 同时具有探测距离远, 探测范围大等优点^[4-6].

由于地物背景(土壤、水泥、沙漠、植被等)热学特性不同, 随着光照条件的变化, 不同地物背景的温度(红外辐射强度)随时间的变化规律是不

收稿日期: 2012-12-02.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60972144).

作者简介: 谷延锋(1977—), 男, 教授, 博士生导师.

通信作者: 丰炳波, guchenmail@126.com.

同的,如:水泥环境的红外辐射强度变化范围较大,而植被环境地表辐射强度变化范围较小.所以对于同一目标,它与不同背景环境的温度差异随时间变化的规律是不同的^[7].红外成像探测地下目标时提取的参数是目标表面区域与周围背景区域的热辐射的差值:

$$\Delta E = \tau \int_{\lambda_a}^{\lambda_b} [\varepsilon_t(\lambda)M(\lambda, T_t) - \varepsilon_b(\lambda)M(\lambda, T_b)] d\lambda. \quad (1)$$

其中: τ 为红外波段对应的大气透过率; λ 表示波长; T 表示对应的(背景、目标)地表温度; $\lambda_a \sim \lambda_b$ 是红外成像仪成像区间; $\varepsilon(\lambda)$ 表示对应的比辐射率; $M(\lambda, T)$ 表示黑体辐照度,本质上受 T 影响,因此目标和背景的地表温度差异性为红外目标探测的前提和基础.对于给定的热红外成像传感器,其温度分辨率 ΔT 是已知的,当目标和背景的温度差 $|T_t - T_b| \leq \Delta T$ 时,红外成像系统不能从背景中分离出目标的红外图像,所以在红外目标探测的研究中,首先应该注意目标和背景的温度差 $|T_t - T_b| \geq \Delta T$ 的条件.

1 温度分布模型的建立与求解

1.1 温度分布模型的建立

为了建立红外图像探测浅层地下目标的热学模型,先做如下假设:

- 1) 埋藏有目标的区域(一般为土壤)的表面是平整的,并且土壤是各向同性的;
- 2) 在探测持续期间,土壤的含水量等物理条件是不变的;
- 3) 物体完全埋藏于土壤里.

图1为地下目标及其附近区域的热学模型,整个方形区域为 $\Omega = \{x; 0 < x_i < l_i, i = 1, 2, 3\}$,方形区域沿 x_1, x_2, x_3 方向的边长分别为 l_1, l_2, l_3 ,区域内任意一点的位置用 $x = (x_1, x_2, x_3)$ 表示,目标区域记为 Ω_1 ,背景区域记为 $\Omega \setminus \Omega_1$,目标物体为一圆柱体,上表面位置为 ρ_1 ,下表面位置为 ρ_2 , α_0 和 α_s 分别为目标和背景区域的热扩散系数, k_0 和 k_s 分别为目标和背景区域的热传导系数.观测持续时间区间为 $(0, t_e)$,区域内任意一点的温度分布记为 $T(x, t), (x, t) \in Q_{t_e} = \Omega \times (0, t_e)$.

通过热传导方程可知区域 Ω 内任意一点的温度 $T(x, t)$ 满足偏微分方程:

$$\frac{\partial T(x, t)}{\partial t} = \alpha_0 \sum_{i=1}^3 \frac{\partial^2 T(x, t)}{\partial x_i^2}, (x, t) \in \Omega_1 \times (0, t_e), \quad (2)$$

$$\frac{\partial T(x, t)}{\partial t} = \alpha_s \sum_{i=1}^3 \frac{\partial^2 T(x, t)}{\partial x_i^2}, (x, t) \in (\Omega \setminus \Omega_1) \times (0, t_e). \quad (3)$$

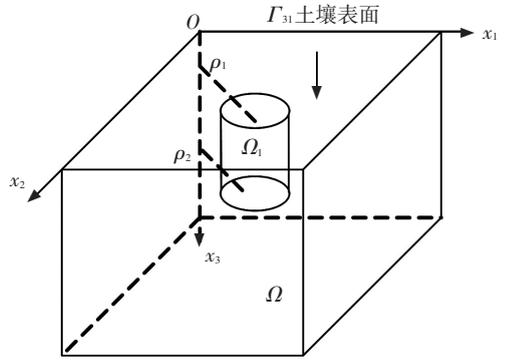


图1 地下物体及附近区域的热学模型

在目标和周围土壤的交界面处,温度分布具有连续性,可以得到以下两个约束条件:

$$\lim_{y \in \Omega_1, y \rightarrow x} T(y, t) = \lim_{y \in \Omega \setminus \Omega_1, y \rightarrow x} T(y, t), \quad (4)$$

$$k_0 \frac{\partial T|_{\Omega_1}}{\partial n}(x, t) = k_s \frac{\partial T|_{\Omega \setminus \Omega_1}}{\partial n}(x, t). \quad (5)$$

当 $(x, t) \in (\bar{E} \cap \overline{\Omega \setminus \Omega_1}) \times (0, t_e)$ 时, n 是空间沿 x_1, x_2 或者 x_3 方向的单位法向量^[8-9].

为求出方程(2)~(5)的解,还需要一些初始条件和边界条件,下面将详细描述如何在该模型中确定初始条件和边界条件.

1) 初始条件:和解决其他动态问题类似,需要知道在起始观测时刻的区域温度分布.在起始观测时刻,假设土壤的温度分布是已知的,记为 $T(x, 0)$,即

$$T(x, 0) = g(x), x \in \Omega. \quad (6)$$

在实际处理问题的过程中,起始观测时刻的土壤温度分布是无法直接获得的,但可以通过对起始观测时刻的土壤表面的温度分布和一些不同深度的温度样值进行插值处理得到.

2) 区域表面热量交换:区域起始观测时刻的温度分布已知后,还需要确定它的变化情况.引起区域温度变化的主要因素是区域表面和外界环境的热量交换,是通过热辐射、对流和热传导三种形式进行的.区域表面和外界环境之间的热量交换主要是通过热辐射和热对流进行的,热传导主要在区域表面和区域内部之间进行.区域表面从外部环境接受到的辐射主要来自太阳和天空中的大气,同时区域表面也在向外辐射能量,这一问题可以概括为边界条件问题.边界条件是指导热物体在其边界处与外部环境之间在热交换方面的相互影响或相互作用.对于非稳态导热,常常是使该过程得以发生和发展的外界因素^[10].由上述分析可

得出边界条件为

$$k \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\text{边界面}} = q_{\text{sun}} + q_{\text{sky}} + q_{\text{conv}} - q_{\text{emis}}. \quad (7)$$

式中 n 为界面某处的外法线方向.

在该区域模型中表面热量交换满足:

$$-k_s \frac{\partial T}{\partial x_3}(x, t) = q_{\text{sun}}(t) + q_{\text{sky}}(t) + q_{\text{conv}}(x, t) - q_{\text{emis}}(x, t). \quad (8)$$

其中: $(x, t) \in \Gamma_3^1 \times (0, t_e)$; q_{sun} 和 q_{sky} 分别为土壤吸收的太阳和天空辐射; q_{conv} 为区域表面和空气之间通过对流吸收的热量; q_{emis} 为土壤辐射出去的热量, 满足 Stefan-Boltzmann 定律:

$$q_{\text{emis}}(x, t) = \varepsilon_{\text{soil}} \sigma T^4(x, t), (x, t) \in \Gamma_3^1 \times (0, t_e). \quad (9)$$

将式(9)代入式(8), 经过数学变形, 式(8)可以写成如下的线性形式:

$$-\alpha_s \frac{\partial T(x, t)}{\partial x_3}(x, t) + pT(x, t) = q(t), (x, t) \in \Gamma_3^1 \times (0, t_e). \quad (10)$$

其中 p 和 $q(t)$ 分别为天气条件和土壤热特性的函数, 且

$$p = \frac{\alpha_s}{h_s} (4\varepsilon_{\text{soil}} \sigma T_0^3 + h_{\text{conv}}), \quad (11)$$

$$q(t) = \frac{\alpha_s}{h_s} [q_{\text{sun}}(t) + q_{\text{sky}}(t) + 3\varepsilon_{\text{soil}} \sigma T_0^4 + h_{\text{conv}} T_{\text{air}}(t)]. \quad (12)$$

其中: T_{air} 是大气温度, T_0 是土壤表面的温度分布, h_{conv} 是土壤和大气之间的热对流系数^[11].

3) 底面条件: 假设在足够深的土壤处的温度分布是恒定不变的,

$$T(x, t) = T_{\infty}, (x, t) \in \Gamma_3^2 \times (0, t_e). \quad (13)$$

其中 T_{∞} 可以通过对一些位置的测量值进行插值处理得到, 对于大多数的土壤和气象条件, 土壤深度一般取 0.5 m 就可以满足该深度的土壤温度基本恒定.

4) 垂直边界条件: 假设选取的土壤区域足够大, 在方形区域除去 Γ_3^1 和 Γ_3^2 后剩余 4 个面处土壤温度分布满足边界条件

$$\frac{\partial T}{\partial n}(x, t) = 0. \quad (14)$$

其中 n 是土壤区域 Ω 外表面除去 Γ_3^1 和 Γ_3^2 剩余的 4 个面上的向内或者向外的单位法向量. 这可以理解为地下目标为周围区域温度分布的影响范围是有限的.

方程(2)~(5)以及初始条件(6)和边界条件(10)、(13)、(14)构成了求解浅层地下目标的热

物理模型, 如下:

$$\begin{cases} \frac{\partial T(x, t)}{\partial t} = \alpha_0 \sum_{i=1}^3 \frac{\partial^2 T(x, t)}{\partial x_i^2}, (x, t) \in \Omega_1 \times (0, t_e); \\ \frac{\partial T(x, t)}{\partial t} = \alpha_s \sum_{i=1}^3 \frac{\partial^2 T(x, t)}{\partial x_i^2}, (x, t) \in (\Omega \setminus \Omega_1) \times (0, t_e); \\ T(x, 0) = g(x); \\ -\alpha_s \frac{\partial T(x, t)}{\partial x_3} = q(t) - pT(x, t), (x, t) \in \Gamma_3^1 \times (0, t_e); \\ T(x, t) = T_{\infty}, (x, t) \in \Gamma_3^2 \times (0, t_e); \\ \frac{\partial T}{\partial n}(x, t) = 0. \end{cases} \quad (15)$$

1.2 模型的求解

实际处理问题时, 目标的热扩散系数 α_0 、目标埋藏深度 ρ_1 、目标高度 $h = \rho_1 - \rho_2$ 、目标截面积 s 都是未知的, 也是待求解的参数. 为了直观地表示 $T(x, t)$ 和目标的热扩散系数 α_0 、目标埋藏深度 ρ_1 、目标高度 $h = \rho_1 - \rho_2$ 、目标截面积 s 的关系, 把 $T(x, t)$ 表示为上面几个物理量的函数形式, 即

$$T(x, t) = F(\alpha_0, \rho_1, h, s). \quad (16)$$

这样探测浅层地下目标的问题转化为求解区域 Ω 的温度分布 $T(x, t)$ 的问题. 实际应用中模型的求解采用 ANSYS 公司的 ANSYS 软件, 它是一款集结构、流体、电场、磁场、声场分析于一体的大型通用有限元分析软件, 可以准确求解式(15).

1.3 基于约束构造的多光谱温度反演

由普朗克定律知, 地物的辐射能力是温度和波长的函数, 图 2 为不同温度的地物辐射光谱, 反应的是在不同温度下地物的辐射能力随波长变化的曲线, 不同温度地物的辐射能力峰值对应的波长往往不同.

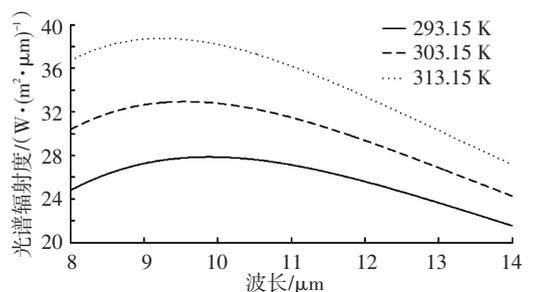


图 2 不同温度下地物的辐射光谱

为了利用多光谱红外图像丰富的光谱信息来提高反演的区域表面温度分布图像的温度分辨率, 本文提出了一种新的基于约束构造多光谱温度反演方法. 多光谱数据为 48 个波段的红外多光谱仿真图像, 波段区间为 8~14 μm . 首先根据红外热像仪所获取的 8~14 μm 波段的红外图像反演区域表面温度分布, 逐点计算辐射光谱, 选取辐射

能力最强时对应波段的红外图像的像素值作为构造的约束图像的像素值,然后对约束进行温度反演,得到多光谱温度反演结果.具体的技术流程如图3所示.

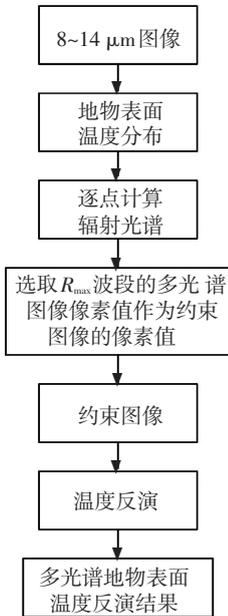


图3 多光谱温度反演流程

2 多时相探测方法

假设得到的多时相红外图像序列表示为 $I(t)$, 探测浅层地下目标问题可以转化为求解公式(17)的最小值,即

$$G = \int_0^{t_c} \int_{T_3} (I(t) - T(x_1, x_2, 0, t))^2 dx_1 dx_2 dt. \quad (17)$$

使 G 值最小的一组迭代值 $\vec{v}^c = (\alpha_0^c, \rho_1^c, h^c, s^c)$ 可视作待求解参数 $\vec{v} = (\alpha_0, \rho_1, h, s)$. 基于多时相多光谱红外图像探测地下目标流程如图4所示.

首先根据建立的温度分布模型,结合实际情况,输入初始条件和边界条件及待求解参数的一组估计值,运用 ANSYS 进行求解,得到区域表面温度分布的理论值,即预测值.然后利用实际拍摄的多时相多光谱红外图像按图3所示方法进行温度反演,求得区域表面温度分布的测量值.再将区域表面温度分布的预测值和测量值进行相似性度量,记为目标函数 G .最后不断更新待求解参数的估计值,直到目标函数 G 取最小值,此时取得待求解参数的估计值作为探测结果输出.

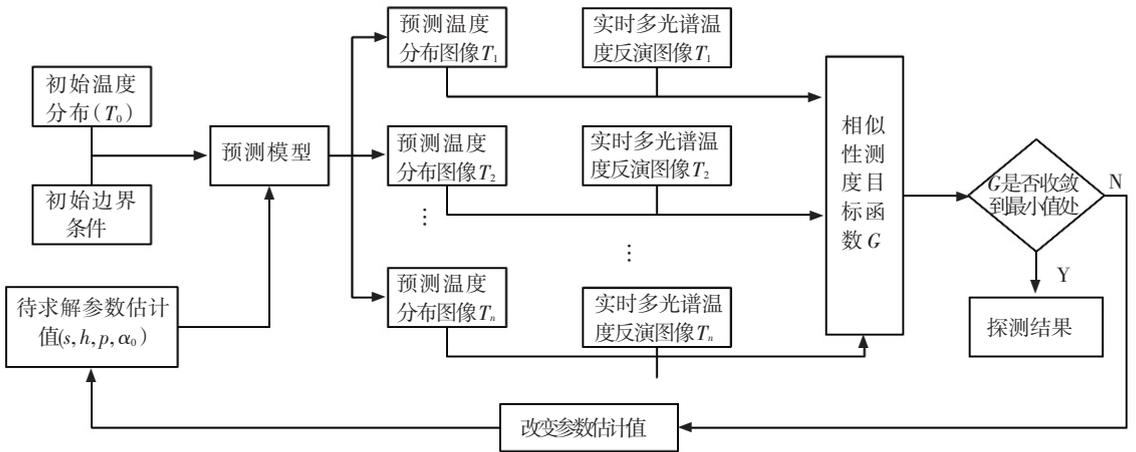


图4 基于多时相多光谱红外图像探测地下目标流程

3 实验结果与分析

在实验室利用红外成像仪通过对埋藏有目标的区域进行探测,得到了一组多时相红外图像(数据一).图5为圆铁(数据一)的多时相红外图像.

通过实验发现,本文方法的探测精度和时相数的选取有关.时相数的选取不同,探测精度也不同.探测精度和时相数的关系如图6所示.

由图6可以看出,在时相数较少时 ($N < 5$),探测误差较大,且探测精度随时相数的增加而显著提高;当时相数较大时 ($N > 5$),随着时相数的

增加,探测精度基本不再提高,但运算时间却显著增加.因此本文方法选取时相数 $N = 6$,既保证了较高的探测精度,又保证了较好的时相性.选取其中6个时相进行探测,其结果如表1所示.通过计算得热扩散系数、埋藏深度、目标高度及目标半径的误差分别为 14.8%、13.4%、17.1%、7.2%.

表1 数据一的探测结果

值类型	热扩散系数/ ($10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	埋藏深度/ cm	目标高度/ cm	目标半径/ cm
探测值	1.64	1.30	12.30	3.48
真实值	1.43	1.50	10.50	3.25

为了模拟对地下管道的探测,在实验室的条件下拍摄了另一组多时相红外图像(数据二),目标为模拟的横向放置的铁质输水管道,见图 7。

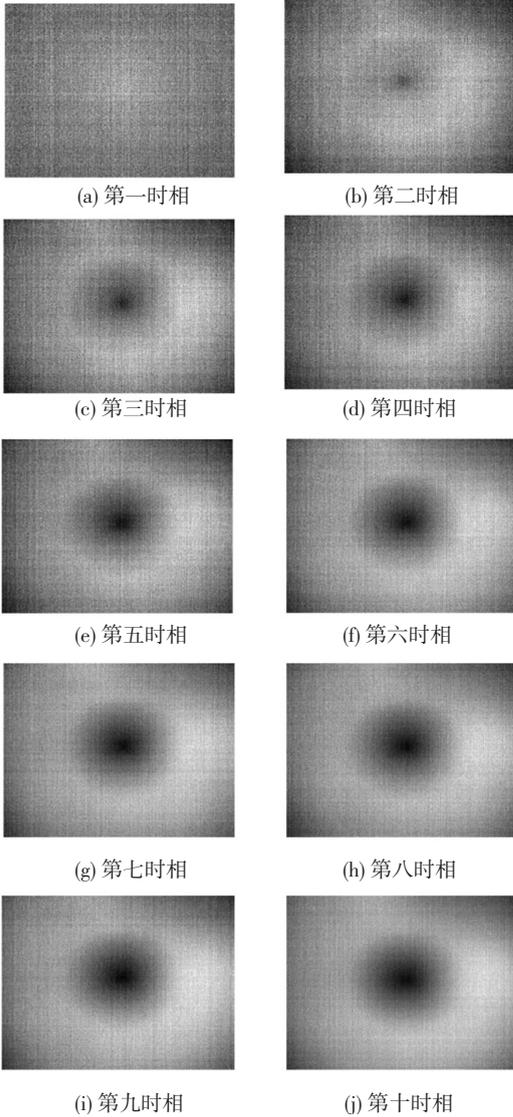


图 5 数据一(圆铁)的多时相红外图像

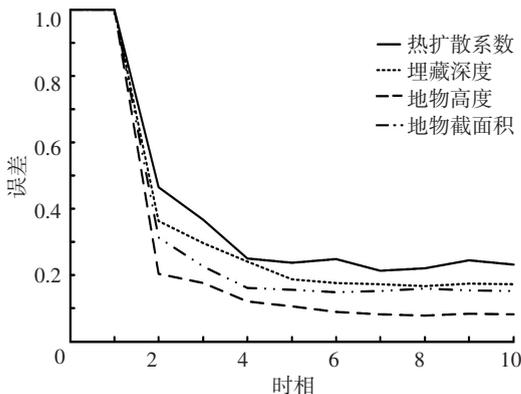


图 6 探测误差和时相的关系

对图 7 进行探测,结果如表 2 所示.其中热扩散系数、埋藏深度、目标高度、目标半径的误差分别为 17.3%、11.0%、10.1%、19.4%。

表 2 数据二的探测结果

值类型	热扩散系数/ ($10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	埋藏深度/ cm	目标高度/ cm	目标半径/ cm
探测值	1.67	0.89	12.10	3.10
真实值	1.43	1.10	13.50	2.60

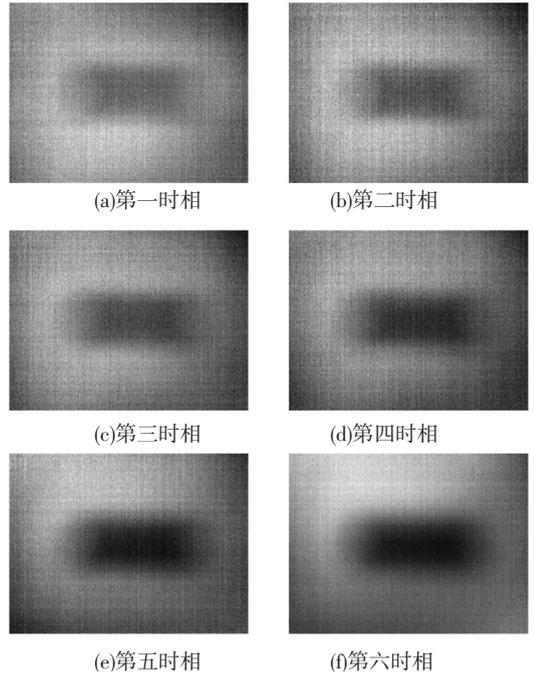


图 7 数据二(水管)的多时相红外图像

4 结 语

本文研究了浅层地下目标的存在对周围区域温度分布的影响,建立了数学描述模型,进行了较精确求解,提出了一种预测区域表面温度分布的方法.将预测温度分布跟利用多时相多光谱红外图像反演得到的区域表面温度分布进行比较,通过不断更新预测模型的输入参数,计算出最优输入参数即为探测结果.实验结果表明本文方法相比传统的地下目标探测方法,探测精度有明显提高,且探测的信息更为丰富,不但可以探测到目标的大小和在图像上的位置,还可以探测目标的埋藏深度、目标高度和目标材质,具有重要的应用价值。

参考文献

[1] CREMER F, NGUYEN T T, YANG L, et al. Stand-off thermal IR minefield survey: system concept and experimental results [C]//Proceedings of SPIE. Bellingham WA:SPIE, 2005:209-220.

- [2] MARTINEZ P L, Van KEMPEN L, SAHLI H, et al. Improved thermal analysis of buried landmines [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2004, 42(9):1965-1975.
- [3] 田国良. 热红外遥感[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006:1-6.
- [4] MUSCIO A, CORTICELLI M A. Land mine detection by infrared thermography: Reduction of size and duration of the experiments [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2004, 42(9):1955-1964.
- [5] SENDUR I K, BAERTLEIN B A. Numerical simulation of thermal signatures of buried mines over a diurnal cycle [C]//Proceedings of SPIE. Bellingham WA: SPIE, 2000:156-167.
- [6] KHANAFER K, VAFAI K, BAERTLEIN B A. Effects of thin metal outer case and top air gap on thermal IR images of buried antitank and antipersonnel land mines [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2003, 41(1):123-135.
- [7] 程洁,柳钦火,李小文,等. 土壤中红外发射率提取算法研究[J]. 红外与毫米波学报, 2008,27(1):21-26.
- [8] THANH N T, SAHLI H, HAO D N. Finite-Difference Methods and Validity of a Thermal Model for Landmine Detection With Soil Property Estimation [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2008, 45(3):656-674.
- [9] THANH N T, SAHLI H, HAO D N. Infrared Thermography for Buried Landmine Detection: Inverse Problem Setting [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2008, 46(12):3987-4004.
- [10] DEANS J, GERHARD J, CARTER L J. Analysis of a thermal imaging method for landmine detection, using infrared heating of the sand surface [J]. Infrared Physics & Technology, 2006,48(3):202-216.
- [11] ZARE A, BOLTON J, GADER P, et al. Vegetation mapping for landmine detection using long-wave hyperspectral imagery [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2008,46(1):172-178.

(编辑 张宏)