

doi: 10.11720/wtyht.2019.1363

王成浩,程丹丹.基于马氏距离模板特征的地雷目标识别研究[J].物探与化探,2019,43(4):899-903.http://doi.org/10.11720/wtyht.2019.1363

Wang C H, Cheng D D. A study of landmine target recognition based on Mahalanobis distance template feature[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2019, 43(4): 899-903. http://doi.org/10.11720/wtyht.2019.1363

# 基于马氏距离模板特征的地雷目标识别研究

王成浩<sup>1,2</sup>, 程丹丹<sup>1</sup>

(1. 中国电波传播研究所, 山东 青岛 266107; 2. 近地探测技术重点实验室, 江苏 无锡 214035)

**摘 要:** 通过探地雷达进行探雷是一个重要的应用方向, 其对非金属地雷或者金属含量少的地雷的探测效果显著。本文针对探地雷达对地雷进行探测时目标特征提取困难的问题, 提出了基于马氏距离模板特征的 SVM 识别算法, 并给出了识别结果。该方法能有效提取地雷目标特征, 有助于探地雷达数据解释和地雷目标的识别定位。

**关键词:** 探地雷达; 探雷; 马氏距离; 目标识别

**中图分类号:** P631

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-8918(2019)04-0899-05

## 0 引言

由于连年战争与战乱, 目前全球大约有 1 亿枚地雷未被排除, 而每年又约有 1 百万枚地雷因新的局部战争而投入使用。各个国家为扫除战争遗留的地雷问题, 投入了大量的人力、物力和财力。据国际红十字会统计, 在目前地雷的数量不再增加的前提下, 以现有的排雷速度, 需耗时 100 年以上、花费 330 亿美元才能扫除全世界的地雷<sup>[1-3]</sup>。因此, 有效地解决地雷探测问题已成为国际社会十分关注的热点、难点问题, 特别是战后的排雷工作, 对探雷技术提出了更高的要求。

通常按照用途可将地雷分为三类: 反坦克地雷、防步兵地雷、和特种地雷。最常用的是反坦克(anti-tank)和防步兵地雷(anti-personnel)。反坦克地雷是针对重型车辆设计的, 引爆压力在 150~300 kg 之间, 通常人踩踏在这类地雷上不会因为引发爆炸而受到伤害, 相对于防步兵地雷, 反坦克地雷对战后平民的伤害相对小一些。战后对平民造成伤害和阻碍经济发展的主要是防步兵地雷。防步兵地雷种类繁多, 据估计防步兵地雷有 300 多种。防步兵地雷通常结构简单体积小, 地雷外壳一般采用低金属材质或者塑料、木头等非金属材质。由于结构简单, 造价

低廉, 难以排除, 所以大量的这种地雷被部署在世界各地, 引发了许多经济发展和人道主义问题。

从二战以来各国在地雷探测方面进行了大量的研究, 但是由于复杂多变的自然条件以及高精度的探测要求, 目前地雷探测仍然是一项困难和富有挑战性的工作。而当前低金属含量或无金属含量的新型防步兵地雷使这项工作变得更加困难。国内急需进行高精度防步兵雷探测设备以及相应的检测方法的研究与实验。

## 1 探雷方法选择

国外的地雷探测研究机构都将地球物理的方法作为主流的地雷探测技术, 主要探测方法有低频电磁感应探雷技术、磁法探雷技术、探地雷达探雷技术、红外成像探雷技术、谐波地雷探测技术、合成孔径雷达探测技术、核电四极矩共振探雷技术、声学探雷技术以及生物探雷技术。每一种技术都有各自的优缺点, 选择哪种方法可以根据实际情况, 例如作业环境、探测对象、经济承受能力等。其中, 低频电磁感应(EMI)探测技术仍然是目前应用最为广泛的地雷探测技术。但是现代防步兵地雷中金属含量越来越少, 甚至仅仅只有撞针包含金属, 这使得通过金属探雷器来探测地雷提高了难度, 而且土壤环境中包

收稿日期: 2018-10-11; 修回日期: 2019-05-08

基金项目: 近地面探测技术重点实验室基金开放课题(6142414060112)

作者简介: 王成浩(1989-), 男, 山东昌邑人, 工程师, 硕士研究生, 主要研究方向为探地雷达信号处理。

含有大量的金属碎片,所以仅仅使用金属探雷器并不能将地雷与钉子、弹片和瓶盖等区分开来。探地雷达对具有一定截面积且与土壤背景的介电常数有一定差异的目标十分敏感,可以探测金属和非金属地雷,但是探地雷达容易受到土壤环境的干扰,因此如何将地雷从干扰物中区分出来,降低“虚警率”并提高探测设备的通用性,是近些年来探地雷达探雷技术发展的关键问题<sup>[1-7]</sup>。

2 基本方法流程

探地雷达是一种通过发射电磁波、接收介质界面反射的回波,并根据接收到的电磁波的振幅、波形和频率等特征来分析和推断地下介质结构特征的浅层地球物理探测技术。探地雷达工作时,向地下介质发射一定强度的高频率电磁脉冲(几十兆赫至上千兆赫),电磁脉冲遇到不同电性介质的分界面时即产生反射,探地雷达接收并记录这些反射信号,并以伪彩色图/灰度图或波形堆积图的方式显示出来,再通过进一步的信号处理和解释即可了解地下介质的情况<sup>[8]</sup>,文中采用螺旋天线来进行目标数据采集,图 1 所示为含有地雷目标的雷达二维剖面图。

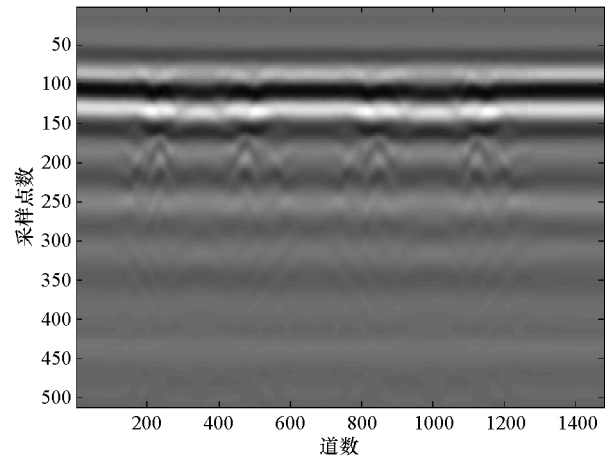


图 1 雷达二维剖面  
Fig.1 radar B-scan image

考虑到防步兵地雷埋设较浅,在雷达图像上反应较弱,而螺旋天线直耦波较宽,所以地雷经常淹没在直耦波里,即使经过背景消除处理后几何特征也不是很明显。因此,地雷目标的几何特征较难提取,为了避免这一困难,文中采取基于马氏距离特征的 SVM 识别算法,算法基本流程如图 2 所示。

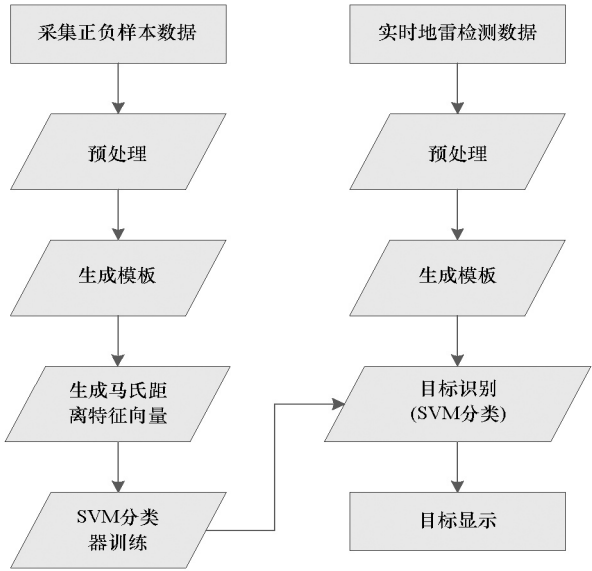


图 2 算法流程  
Fig.2 Algorithm flowchart

3 预处理

通过图 1 所示的雷达数据可以看到:雷达信号位置、信号能量、波形等有所差异;雷达数据有直耦波、地面波、固定波以及噪声等干扰。因此需要对数据进行预处理,以方便后续的目标检测工作。

零偏校正:原始数据在采集过程中,都会带有一定的直流漂移量,需要通过校正零偏的方法先将直流成分消除或压制。

背景消除:通过主成分分析(PCA)的方法将数据分成几个主元,剔除第一主元后,剩余的即为背景消除后的数据。

滑动平均:滑动平均是以滑动矩形窗的方式把多道的雷达数据平均成一道数据,以达到对雷达数据进行平滑处理的目的。

4 特征生成

马氏距离(Mahalanobis distance)是一种有效的计算两个未知样本集的相似度的方法,与欧式距离不同的是它考虑到各种特性之间的联系并且是与尺度无关的,可以定义为两个服从同一分布并且其协方差矩阵为  $\Sigma$  的变量  $x$  与  $y$  的差异程度<sup>[10]</sup>:

$$d(x,y)=\sqrt{(x-y)^T\Sigma^{-1}(x-y)}。(1)$$

通过马氏距离来计算待测单道数据与背景之间的关系,距离越小则相似性越大。为减少单道数据

的偶然性,将预处理后的目标单道数据与周围数据组成一个模板,图 3b 为目标组成的模板,中间竖线为目标所在道假设背景模板为 $[x_1, x_2, \cdots, x_n]$ ,目标模板为 $[y_1, y_2, \cdots, y_n]$ ,其中  $x_n, y_n$  为模板中单道数据,  $n$  表示模板内道数,求取模板中每一道数据与背景中各道数据的马氏距离的平均值:

$$d_n = \frac{1}{n} \sum_{m=1}^n d(x_n, y_m)。$$
(2)

将求得平均值组成特征向量  $L=[d_1, d_2, \cdots, d_n]$ 。

将马氏距离与欧式距离所求特征进行对比,图 4 为通过马氏距离求得的模板特征向量,图 5 为欧式距离求得的模板特征向量。可以看出,马氏距离能更好地反映目标真实情况的相似性,距离最大处为目标中心处,目标两侧距离逐渐减小代表着逐渐接近背景。

确定特征向量后,接下来需要获取正负样本。采用不同深度、不同速度测得的地雷目标数据通过上述运算得到的特征向量作为正样本,采用不含地雷目标的数据通过上述运算得到的特征向量作为负

样本。后续训练需要生成大量的正负样本,如图 6、7 所示,图中每一条线代表一个样本,各个正样本目标的特征向量具有相似性,然后将正负样本送入支持向量机(SVM)分类器进行训练。

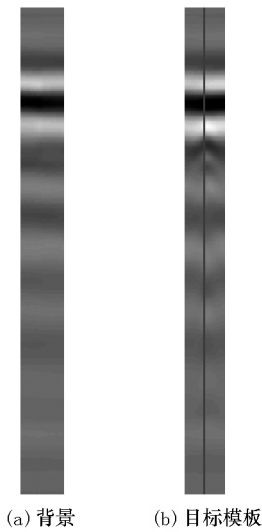


图 3 目标与背景图谱  
Fig.3 Target and background image

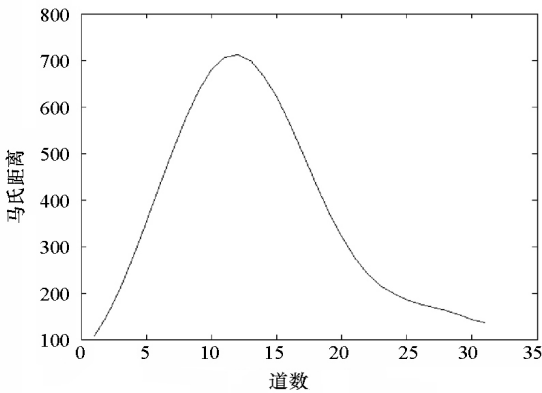


图 4 马氏距离模板特征向量  
Fig.4 Mahalanobis distance template eigenvector

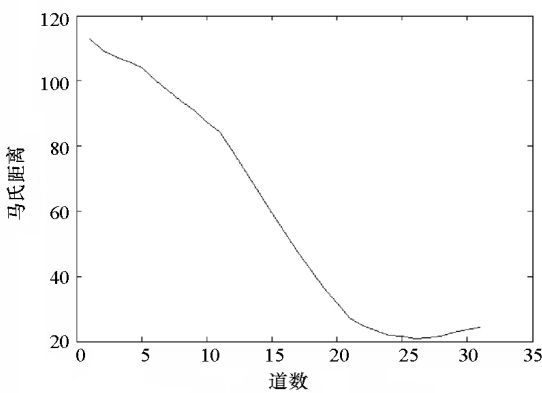


图 5 欧式距离模板特征向量  
Fig.5 Euclidean distance template eigenvector

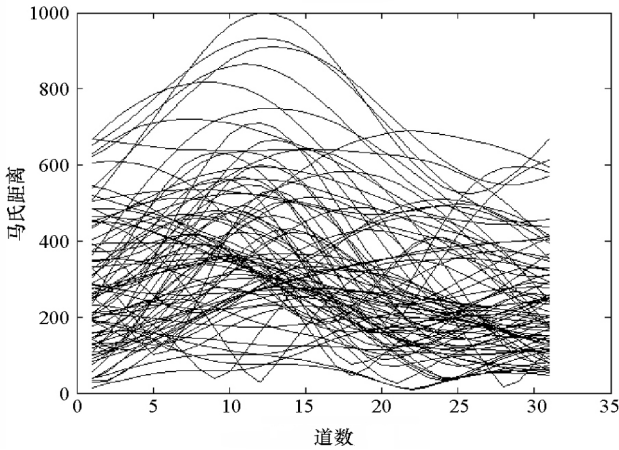


图 6 正样本  
Fig.6 Positive samples

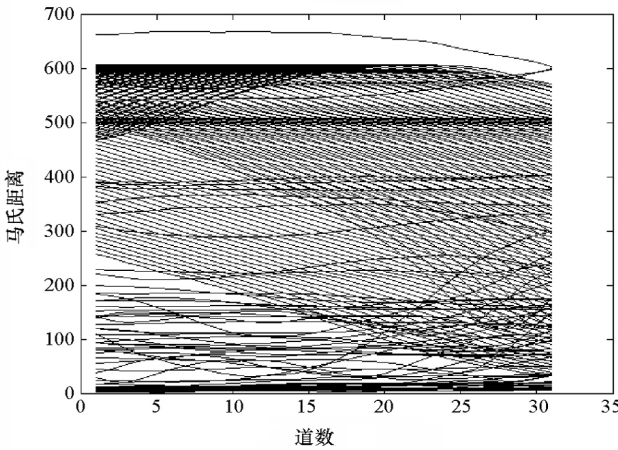


图 7 负样本  
Fig.7 Negative samples

5 训练识别

支持向量机是一种主要用于分类和回归的有监督的机器学习算法,它从有限的训练样本中归纳“最优函数规律”,目的是尽可能准确地对未知样本作出预测。其中心思想是调整判别函数,使它最好地利用边界样本点的分类信息,以构造出最佳分类面。简单的说,就是将数据单元表示在多维空间中,然后对这个空间做划分的算法。

要想对正负两类训练样本进行区分,需要求取一个决策面(超平面),决策面所在的位置是使得两类支持向量与决策面之间的间隔都达到最大时决策面所处的位置。超平面可以用分类函数

$$f(x) = \omega^T x + b$$

表示,求取合适的参数使得超平面距离正负样本的距离最大。样本到超平面距离通过下式求得:

$$\gamma = \frac{\omega^T x + b}{\|\omega\|} \tag{3}$$

SVM 是一种有监督的学习分类方法(图 8),所以对于给出的训练样本,要明确每个样本的归类是正样本还是负样本,即每个样本都需要标注一个确切的类别标签,提供给 SVM 训练使用<sup>[9]</sup>。样本特征在前文中已经介绍过。

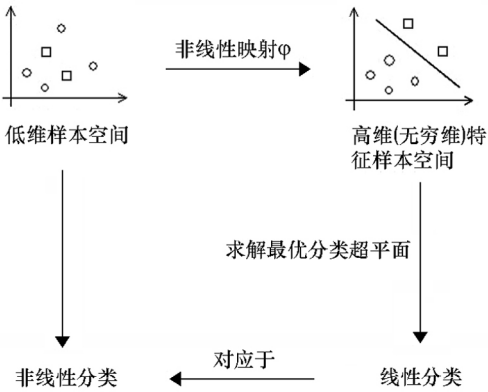


图 8 SVM 原理  
Fig.8 Principle of SVM

训练完成后,进入识别阶段。首先采集一段待测数据,将整个数据输入进去,一道道进行检测识别,每一道识别前先按照前文所述生成一个模板,然后计算马氏距离后送入 SVM 分类器进行识别。在进行分类的时候,将待测数据的特征向量  $L$  代入  $f(x)$  中,如果  $f(x)$  小于 0 则将  $L$  的类别赋为 -1,即负样本;如果  $f(x)$  大于 0 则将  $L$  的类别赋为 1,即正样本。雷达数据中每一道单独进行识别,识别后将所有道识别结果统一显示。如图 9 所示,图中为两个雷达数据,每个数据中采集了 4 个地雷目标,识别后的结果用黑线显示,黑线中数值置低为目标。

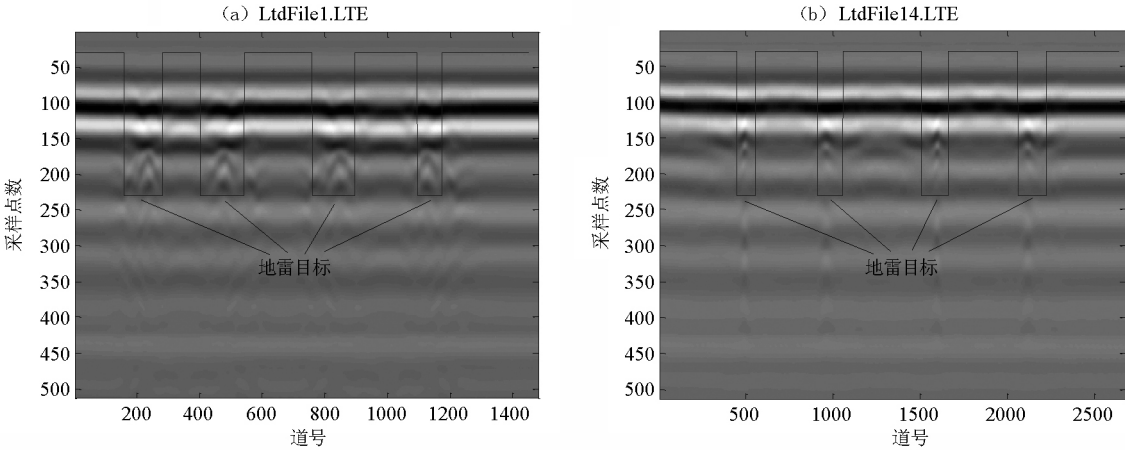


图 9 识别结果  
Fig.9 Identification result

6 结论

本文所述方法可以避免地雷目标几何特征提取难的问题,通过建立马氏距离模板特征的方法进行地雷目标识别,实验证明识别效果较好,后续可以通

过增加正负样本数量来进一步提高识别率。不足之处在于该算法只能识别单道是否包含地雷目标,不能检测出地雷目标的深度信息。

如何提高地雷目标的识别率是一个困扰研究人员多年的问题,任何一个传感器都有其局限性,希望以后多传感器融合技术能在提高地雷目标的识别率



上起重要作用。

参考文献 (References) :

[ 1 ] Konduri R K, Solomon G Z, Dejong K, et al. Genetic optimization of the HSTAMIDS landmine detection algorithm[ J ]. Proceedings of SPIE — The International Society for Optical Engineering, 2004, 5415:883 – 891.

[ 2 ] Ho K C, Gader P D, Wilson J N. Improving landmine detection using frequency domain features from ground penetrating radar [ C ]// Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2004. IGARSS '04. Proceedings. 2004 IEEE International. IEEE, 2004; 1617 – 1620 vol.3.

[ 3 ] Daniels D J, Curtis P, Lockwood O. Classification of landmines using GPR[ C ]// Radar Conference, 2008. RADAR '08. IEEE. IEEE, 2008; 1 – 6.

[ 4 ] Steinway W J, Reidy D M. Clutter removal processing for improved mine detection using a frequency-stepped GPR[ C ]// Detection and Remediation Technologies for Mines and Minelike Targets IX. International Society for Optics and Photonics, 2004;896 – 904.

[ 5 ] Bartosz E E, Dejong K, Duvoisin H A, et al. Nonlinear processing of radar data for landmine detection[ J ]. Proceedings of SPIE — The International Society for Optical Engineering, 2004.

[ 6 ] Sezgin M. Simultaneous buried object detection and imaging technique utilizing fuzzy weighted background calculation and target energy moments on ground penetrating radar data. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2011(55): 1 – 12.

[ 7 ] Ho K C, Harris S, Zare A, et al. Anomaly detection of subsurface objects using handheld ground penetrating radar. Proc. SPIE Detection and Sensing of Mines, Explosive Objects, and Obscured Targets XX,94541B, 2015.

[ 8 ] 曾昭发, 刘四新, 冯珏. 探地雷达原理与应用[ M ]. 北京:电子工业出版社, 2010.

Zeng Z F, Liu S X, Feng X. Ground penetrating radar theory and applications[ M ]. Publishing House of Electronics Industry, 2010.

[ 9 ] Chang C C, Lin C J. LIBSVM: a library for support vector machines[ J ]. ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology, 2011,2(3):27–65.

[ 10 ] 汪西莉, 焦李成.一种基于马氏距离的支持向量快速提取算法[ J ]. 西安电子科技大学学报:自然科学版, 2004,31(4).

Wang X L, Jiao L C. A fast algorithm for extracting the support vector on the Mahalanobis distance[ J ]. Journal of Xidian University, 2004,31(4).

A study of landmine target recognition based on Mahalanobis distance template feature

WANG Cheng-Hao<sup>1,2</sup>, CHENG Dan-Dan<sup>1</sup>

( 1.China Research Institute of Radiowave Propagation, Qingdao 266107, China; 2. Science and Technology on Near Surface Detection Laboratory, Wuxi 214035, China )

**Abstract:** Mine detection by ground penetrating radar is an important application direction, and its detection effect on non-metallic mines or mines with low metal content is remarkable. In this paper, aimed at tackling the problem that the target feature extraction is difficult when the ground penetrating radar detects the mine, the authors propose the SVM recognition algorithm based on the Mahalanobis distance template feature and give the recognition result. This method can effectively extract the target characteristics of mines, and is helpful to data interpretation of ground penetrating radar and recognition and location of mine targets.

**Key words:** ground penetrating radar (GPR); landmine detection; mahalanobis distance; target recognition

( 本文编辑:沈效群 )