



装甲目标毫米波被动探测信号熵特征提取及仿真分析

冯建利^{1,2}, 雒明世¹, 张效民²

(1. 西安石油大学计算机学院, 陕西 西安 710065; 2. 西北工业大学航海学院, 陕西 西安 710072)

摘要: 根据装甲目标毫米波被动探测信号的不规则波动性, 提出以熵为特征的装甲目标的识别方法。以实测数据为基础, 论证了方法的有效性。对仿真获得的装甲目标、干沙、钢板、积水的天线温度曲线分别提取了熵特征, 分析了彼此间熵的直方图及平均值。结果表明, 以熵为特征可以对地面背景及典型“干扰物”中的装甲目标进行有效识别, 具有切实可行的工程借鉴意义。

关键词: 装甲目标; 毫米波被动探测; 熵特征; 目标识别

中图分类号: TN928

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2016014

Signal entropy feature extraction and simulation analysis of the armored target with passive millimeter wave

FENG Jianli^{1,2}, LUO Mingshi¹, ZHANG Xiaomin²

1. School of Computer Science, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China

2. College of Marine Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China

Abstract: According to the irregular fluctuation of the armored target's detection signal with passive millimeter wave, an armored target's recognition method which the feature is entropy was proposed. Based on the measured data, the validity of this method was demonstrated. Through simulation, the antenna temperature curve of armored target, dry sand, steel and water was obtained respectively. Then, the entropy feature of each one was extracted. The histogram and the average value of the entropy were analyzed. The results show that when the entropy was used as the feature, the armored target from the background and typical "interferences" can be effectively recognized and practical engineering significance was obtained.

Key words: armored target, passive millimeter wave detection, entropy feature, target recognition

1 引言

毫米波辐射计利用金属和地面背景在毫米波段辐射能量的不同, 可以有效识别地面上的装甲目标^[1,2]。但真实的战场环境中往往除了地面背景本身以外, 还存在其他诸如平面钢板、积水等与装甲目标毫米波被动探测信号相似的“干扰物”。因此, 对装甲目标的识别除了要区别装甲目

标与地面背景以外, 还要区分装甲目标与“干扰物”, 即提高装甲目标的抗干扰能力。目前, 对装甲目标的识别方法大多是在时域内以天线温度曲线的峰值、宽度、上升斜率、信号能量等特征^[3-5], 或者通过各种傅里叶变换在频域或其他变换域内提取信号的特征^[6-9], 依据装甲目标与其他地物目标对同一特征的不同特征值进行装甲目标的有效识别。本文考虑到算法的复杂度、运算量、实时性等因素, 从毫米



波被动探测的基本原理出发,建立了装甲目标的毫米波辐射模型,提出了装甲目标的熵特征,并以熵为特征量对装甲目标和“干扰物”进行了对比分析,论证了熵特征对地面背景及“干扰物”中的装甲目标识别的有效性和可靠性。

2 毫米波被动探测基本原理

自然界一切温度高于绝对零度的物质都会向外界辐射电磁能量,辐射能量的大小通常用天线附近的温度(即视在温度)来表征。在毫米波近距离被动探测中,当忽略大气衰减时,视在温度为:

$$T_{AP}(\theta, \varphi) = T_B(\theta, \varphi) + T_{SC}(\theta, \varphi) = \varepsilon(\theta, \varphi) \cdot T_s + \Gamma(\theta, \varphi) \cdot T_{Bother}(\theta, \varphi) \quad (1)$$

其中, $T_{AP}(\theta, \varphi)$ 为目标的视在温度; $T_B(\theta, \varphi)$ 为被测目标自身主动向外界辐射的亮度温度,它是目标的辐射率 $\varepsilon(\theta, \varphi)$ 与目标的物理温度 T_s 的乘积; $T_{SC}(\theta, \varphi)$ 为被测目标反射的来自于其他辐射源的辐射温度,其数值用目标的反射率 $\Gamma(\theta, \varphi)$ 与目标表面接收到的来自于其他辐射源的辐射温度 $T_{Bother}(\theta, \varphi)$ 的乘积来计算。

毫米波被动探测体制利用毫米波辐射计来接收地物目标的毫米波辐射能量。由于不同地物目标的视在温度不同,辐射计探测不同目标时接收到的毫米波辐射能量不同,因此可以利用毫米波辐射计实现对不同目标的探测、识别。由于功率与温度的一一对应关系,辐射计天线口面接收到的辐射能量表征为天线温度,表达式为:

$$T_A = \frac{1}{4\pi} \iint_{\Omega_M} T_{AP}(\theta, \varphi) G(\theta, \varphi) d\Omega \quad (2)$$

其中, T_A 为被测地物目标的天线温度; $G(\theta, \varphi)$ 为辐射计天线的归一化天线增益; Ω_M 为天线主波束立体角。根据式(2)可知,当忽略天线旁瓣时,天线温度是视在温度用归一化天线增益在天线主波束范围内的加权积分。当辐射计天线确定后,天线温度主要取决于视在温度,视在温度的不同必将导致天线温度的不同。因此,要利用辐射计对装甲目标进行探测、识别,首先要建立装甲目标的天线温度模型。

3 装甲目标天线温度建模

装甲目标表面大多为金属材料,8 mm 波段,金属的发射率近似为 0,所以装甲目标的毫米波辐射能量主要是反射的来自于其他辐射源的辐射能量。由于装甲目标是结构复杂的立体金属目标,所以装甲目标除了某些表面会反射大气向下辐射温度以外,某些表面还会反射地

面背景辐射温度,具体的辐射情况主要取决于辐射计和装甲目标的相对空间关系^[10]。当辐射计天线波束仅探测到装甲目标时,天线波束内的辐射温度示意如图 1 所示。

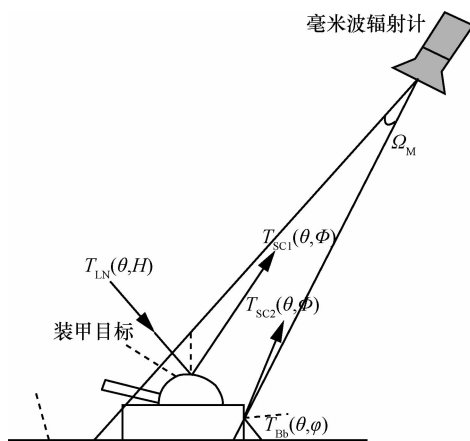


图 1 装甲目标的辐射温度示意

图 1 中, $T_{SC1}(\theta, \varphi)$ 表示装甲目标表面反射的大气向下辐射温度,由于装甲目标的反射率 $\Gamma(\theta, \varphi) = 1$,因此 $T_{SC1}(\theta, \varphi) = T_{LN}(\theta, H)$; $T_{SC2}(\theta, \varphi)$ 表示装甲目标表面反射的地面背景辐射温度,同样,由于装甲目标的反射率为 1,所以 $T_{SC2}(\theta, \varphi) = T_{BB}(\theta, \varphi)$,其中 $T_{BB}(\theta, \varphi)$ 表示地面背景的辐射温度。因此,根据式(2)得出装甲目标的天线温度表示为:

$$T_A = \frac{1}{4\pi} \iint_{\Omega_i} T_{DN}(\theta, \varphi) G(\theta, \varphi) d\Omega + \frac{1}{4\pi} \iint_{\Omega_j} T_{Bb}(\theta, \varphi) G(\theta, \varphi) d\Omega \quad (3)$$

其中, Ω_i 表示反射大气向下辐射温度的装甲目标表面所占立体角; Ω_j 表示反射地面背景辐射温度的装甲目标表面所占立体角;满足 $\Omega_i + \Omega_j = \Omega_M$ 。

4 装甲目标毫米波被动探测信号的熵

毫米波辐射计对地面装甲目标的探测、识别是通过装甲目标的毫米波被动探测信号进行特征提取、分析特征量来进行的。为此,首先要分析装甲目标天线温度曲线的特点,进而才能提取特征。图 2 所示为环境温度为 6℃,地面背景为干沙,毫米波辐射计从距离地面高度 6 m 处分别垂直探测钢板和某坦克时辐射计获得的天线温度曲线。

从图 2 中可得出以下结论。

(1) 8 mm 波段,干沙的辐射率约为 0.86,钢板和坦克表面辐射率为 0。因此,干沙和钢板、坦克的天线温度差异明显。

(2)虽然钢板和坦克表面都是金属材质,但钢板是平面金属目标,它只反射大气向下辐射温度,所以当辐射计探测钢板时,辐射计输出的天线温度曲线是平坦的。与钢板不同的是,坦克是外形结构复杂的立体金属目标,其表面存在反射大气向下辐射温度和反射地面背景辐射温度两种可能,而且会随着辐射计和坦克的相对空间位置而变化,因此,辐射计扫描坦克的过程中,辐射计获得的天线温度曲线是不规则波动的。因此,可以利用天线温度曲线的平坦程度来区分坦克与地面背景及“干扰物”。

如图2所示,装甲目标天线温度呈现不规则的起伏波动,对于这种波动性可以借助于热力学中表征分子运动的不确定性的量——熵^[11]来衡量。

设毫米波辐射计测得的天线温度曲线为 N 个采样点

的集合,即 $T_A=\{T_{A1},T_{A2},T_{A3},\cdots,T_{AN}\}$,则毫米波被动探测信号的熵为:

$$E=\frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N-1}|T_{A(i+1)}-T_{Ai}| \quad (4)$$

其中, E 表示被测地物目标天线温度的熵; T_{Ai} 表示被测地物目标的第 i 个天线温度采样值;为了对比分析,称相邻采样值的差值构成的序列为差值序列,本文后续的分析工作就是围绕差值序列和熵展开的。从式(4)可以看出,差值序列的平稳程度代表了天线温度曲线的波动程度。天线温度曲线波动性越大,所得差值序列起伏越大,熵越大。在弹载毫米波辐射计探测地面装甲目标的过程中,毫米波被动探测信号的熵与目标、背景、辐射计探测角、环境温度、辐射计运动速度及运动轨迹等因素相关,当探测条件一定

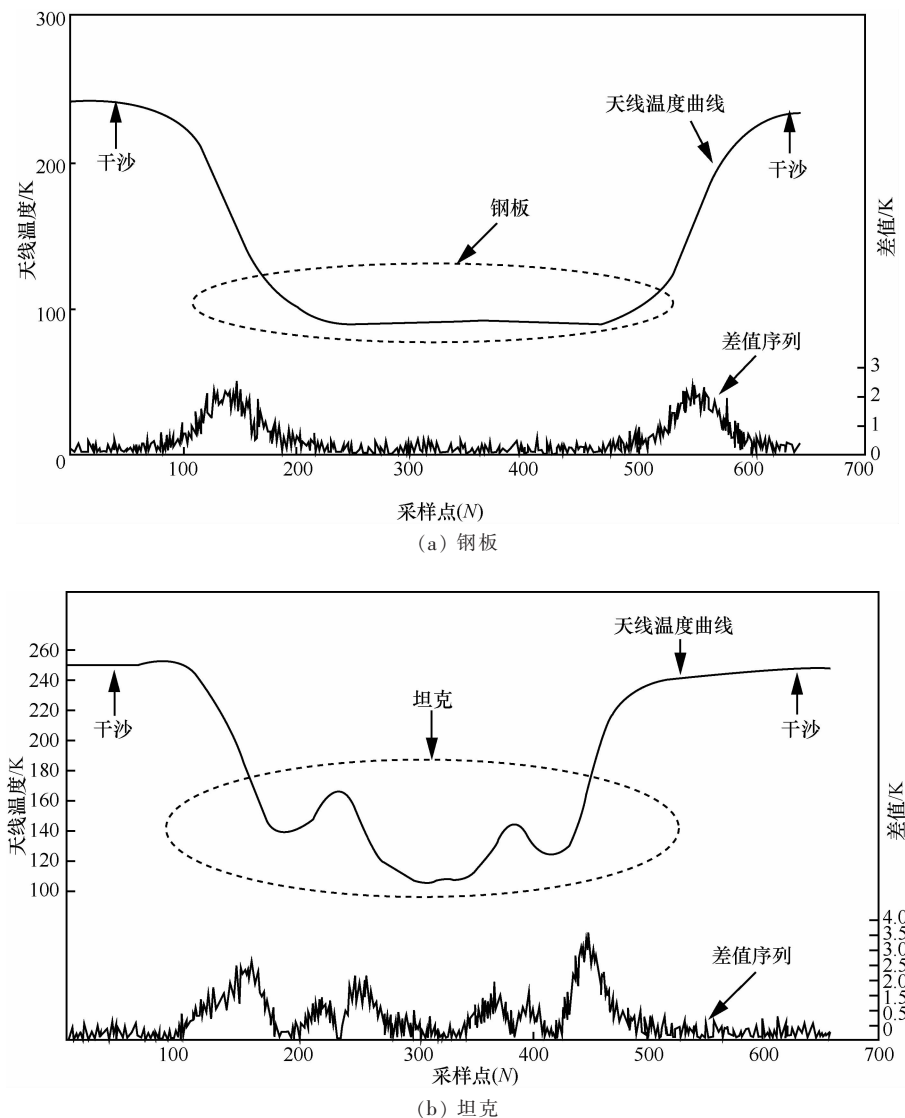


图2 钢板和坦克的天线温度曲线及差值序列

时,熵主要随着辐射计与目标的相对空间关系而变化。

为了验证毫米波被动探测信号的熵特征对于装甲目标识别的有效性,对图2中的实测天线温度曲线进行数据处理,获得其差值序列,将结果对比显示在图2天线温度曲线的下方(对应右边纵坐标轴)。从图2可以看出,当辐射计探测到干沙时,得到的天线温度曲线较平坦,相应的差值序列也平坦;当辐射计探测到坦克时,天线温度曲线呈现大的波动,所得差值序列起伏明显。计算得到钢板和坦克天线温度曲线的熵分别为1.208 2 K和3.059 3 K,坦克的熵大于钢板的熵。

5 仿真与分析

仿真条件:系统采样率2 000 Hz,背景为干沙,环境温度为18℃,天线是口面半径为0.1 m的卡塞格伦天线,弹载辐射计探测俯角30°,弹丸以200 m/s的速度从装甲目标的正前方上空6 m处匀速直线掠飞,数据样本量为200个,仿真得到钢板、积水、坦克的熵的直方图如图3所示。

观察图3(a)~图3(c)可知,坦克的熵分布与地面背景(干沙)及典型“干扰物”(钢板、积水)的熵分布几乎不存在交

集,依据概率论可知:以天线温度的熵作为特征量可以准确地将坦克与地面背景及“干扰物”区分开,从而实现对装甲目标的有效识别。但是分析图3(d)可知,钢板和积水的熵分布存在明显交集,所以它们彼此误识别的概率较高,究其原因还是钢板和积水的毫米波辐射特性相近,而且两者都是平面目标,所以,对于钢板和积水的区分要进行进一步研究。

表1列出了图3的坦克、干沙、钢板、积水的熵的平均值。

表1 不同地物目标天线温度熵的平均值

被测目标	坦克	干沙	钢板	积水
熵的平均值/K	2.985 9	0.721 7	1.179 4	1.007 8

从表1可知,由于坦克的熵远大于干沙、钢板及积水,因此以熵为特征可以将地面背景及“干扰物”中的坦克识别出来。与此同时,由于钢板和积水的熵均值较相近,因此两者之间存在一定的误识别率,这一点和图3所得结论是一致的。

结合图2、图3和表1可知,以毫米波被动探测信号的熵为特征,可以有效地区分装甲目标与地面背景及“干扰物”,从而实现毫米波辐射计对地面装甲目标的准确识别。

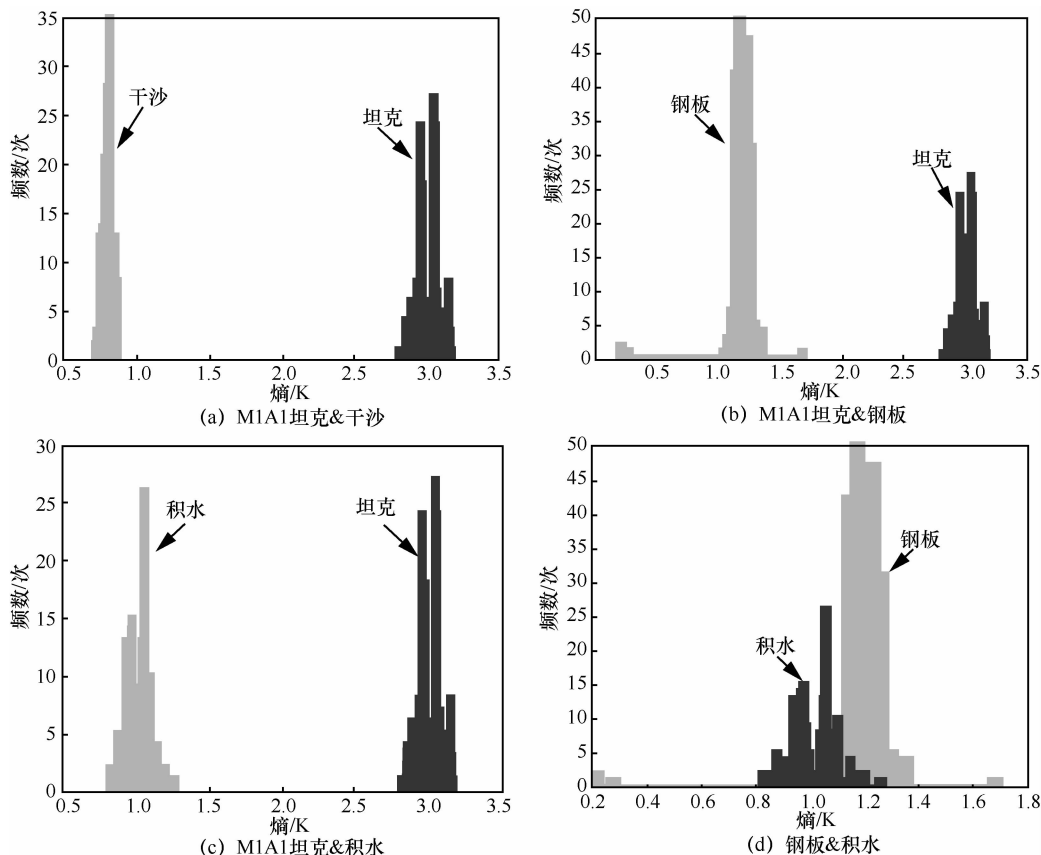


图3 坦克及典型“干扰物”的熵直方图

6 结束语

依据毫米波被动探测的基本原理,分析了装甲目标视在温度的组成,建立了装甲目标的毫米波辐射模型。根据装甲目标天线温度的波动性,提出了以熵为特征的装甲目标的识别方法,在以实测数据验证了熵的有效性的基础上,仿真分析了装甲目标和典型地面背景及“干扰物”的熵,分别以熵的直方图和平均值统计表论证了该方法对装甲目标识别的有效性和可靠性,具有简洁、易实现、计算量小、实时性好等优点。

参考文献:

- [1] KIM W G, MOON N W, KIM H K, et al. Linear polarization sum imaging in passive millimeter-wave imaging system for target recognition [J]. Progress in Electromagnetic Research, 2013, 136(1): 175-193.
- [2] CHEN X, XU J Z. Research on millimeter-wave radiation characteristics of solid target [J]. Progress in Electromagnetics Research M, 2013, 29: 151-164.
- [3] ZHANG Y M. Study on the technique of passive millimeter wave detector [J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2005, 14(4): 391-395.
- [4] 张彦梅,崔占忠. 利用毫米波辐射计探测坦克顶甲的研究[J]. 探测与控制学报, 2004, 26(3): 17-20.
ZHANG Y M, CUI Z Z. Study on tank top armour detection by using millimeter wave radiometer [J]. Journal of Detection & Control, 2004, 26(3): 17-20.
- [5] 张彦梅. 基于被动毫米波探测技术的近场目标识别方法[J]. 北京理工大学学报, 2006, 26(7): 622-625.
ZHANG Y M. Method of identification for close target based on passive MMW detection technique [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2006, 26(7): 622-625.
- [6] 方向,丁凯,张卫平,等. 地面装甲目标声信号的混沌特征提取[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2013, 14(2): 218-221.
FANG X, DING K, ZHANG W P, et al. Chaotic feature extraction of acoustic signals from armored vehicles [J]. Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2013, 14(2): 218-221.
- [7] 张彦梅,阳进. 一种基于小波能量分析的目标识别方法[J]. 北京理工大学学报, 2010, 30(7): 831-834.
ZHANG Y M, YANG J. A target identification method based on wavelet energy analysis [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2010, 30(7): 831-834.
- [8] 张彦梅,于敬波. 坦克目标时频特征分析 [J]. 北京理工大学学报, 2009, 29(1): 50-53.
ZHANG Y M, YU J B. Analysis of the signal characteristics of tank in time and frequency domain [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2009, 29(1): 50-53.
- [9] 张彦梅,于敬波. 基于 Zoom-FFT 变换域的坦克被动式毫米波探测识别方法 [J]. 南京理工大学学报, 2007, 31(3): 346-349.
ZHANG Y M, YU J B. Method of identifying tank by passive millimeter wave detection technology based on Zoom-FFT [J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2007, 31(3): 346-349.
- [10] 冯建利,张效民. 基于多次反射的毫米波被动探测装甲目标辐射特性研究 [J]. 西北工业大学学报, 2015, 33(1): 135-140.
FENG J L, ZHANG X M. Research on armored target radiation characteristics with passive millimeter wave detection based on multiple reflection [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2015, 33(1): 135-140.
- [11] 王可达,张之翔. 熵的定义和物理意义[J]. 汕头大学学报(自然科学版), 1997, 12(2): 88-93.
WANG K D, ZHANG Z X. Entropy: its definitions and physical meaning [J]. Journal of Shantou University (Natural Science), 1997, 12(2): 88-93.

[作者简介]



冯建利(1981-),女,西安石油大学讲师,西北工业大学博士生,主要研究方向为毫米波被动探测信号处理及目标识别技术。



翟明世(1966-),男,西安石油大学副教授,主要研究方向为信息与通信系统、无线通信网络等相关技术。



张效民(1963-),男,博士,西北工业大学教授、博士生导师,主要研究方向为信号检测与辨识、目标识别等相关技术。