

## 毫米波被动探测信号的熵特征研究

冯建利<sup>1,2</sup>, 赵裔昌<sup>3</sup>, 张效民<sup>2</sup>

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

3. 机电动态控制重点实验室, 西安 710065)

**摘要:** 针对毫米波被动探测系统中以幅度值作为判决特征时, 容易将无源干扰(如平面金属、地面积水等)误识别为装甲目标的问题, 提出了毫米波被动探测信号的新特征量——熵; 从毫米波被动探测典型地物目标的天线温度基本组成出发, 提出了熵的提取方法; 对一定样本量的地物探测信号进行熵特征分析, 结果表明装甲目标的熵与平面金属及地面积水有明显差异, 对装甲目标识别的研究提供了新的分析思路和理论指导。

**关键词:** 毫米波被动探测; 熵特征; 天线温度; 装甲目标; 目标识别

## Research on the Entropy Feature of Analysis of Passive Millimeter Wave Detection Signal

Feng Jianli<sup>1,2</sup>, Zhao Yichang<sup>3</sup>, Zhang Xiaomin<sup>2</sup>

(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;

3. Key Laboratory of Electromechanical Dynamic Control, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** In passive millimeter wave detection system, it is easy to be passive jamming (such as planar metal, ground water, etc.) mistakenly identified as an armored target, when the signal amplitude value was deemed as a decisive characteristic. In order to solve this problem, this paper proposes a new feature named as entropy. According to the antenna temperature's composition of typical targets, proposed the extraction method of signal entropy feature. Analyzed a large number of detection signal entropy features, the results showed that the entropy feature of armored target significantly different with planer metal and ground water. The results of this paper provide a new analytical thinking and theoretical guidance for the armored target identification.

**Keywords:** passive millimeter wave detection; entropy feature; antenna temperature; armored target; target recognition

### 0 引言

在毫米波段, 地面背景和金属的亮度温度存在很大差异, 因此利用毫米波被动探测可以有效检测地面装甲目标<sup>[1]</sup>。但由于地面其它低亮温目标(如平面金属、地面积水等)的毫米波被动探测信号与装甲目标信号在幅度域上有一定相似度, 因此容易被误识别为装甲目标<sup>[2-5]</sup>。为了探寻被动毫米波探测地面装甲目标抗无源干扰的有效方法, 从毫米波被动探测的基本原理出发, 分析了典型地物的辐射探测机理, 提出了基于熵特征的毫米波被动探测信号提取方法, 计算了装甲目标信号和其他无源干扰信号熵特征, 为毫米波被动探测地面装甲目标的识别技术提供必要支撑。

### 1 毫米波被动探测机理

天线温度是毫米波被动探测地物目标所得探测结果的表现形式, 其表达式为<sup>[6]</sup>:

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

式(1)中,  $T_A$  为天线温度;  $G(\theta, \varphi)$  为归一化天线增益;  $\Omega_M$  为天线主波束立体角,  $T_{AP}(\theta, \varphi)$  为  $(\theta, \varphi)$  方向的视在温度。

由辐射测量学理论知, 当忽略大气向上辐射亮温及大气衰减时, 视在温度表示为:

$$T_{AP}(\theta, \varphi) = T_B(\theta, \varphi) + T_{SC}(\theta, \varphi) = \epsilon(\theta, \varphi) \cdot T_s + \Gamma(\theta, \varphi) \cdot T_{Bother}(\theta, \varphi) \quad (2)$$

式(2)中  $T_B(\theta, \varphi)$  为被测目标自身向外辐射的亮度温度, 简称亮温;  $T_{SC}(\theta, \varphi)$  为被测目标反射的来自于其它辐射源辐射的亮温;  $\epsilon(\theta, \varphi)$  为被测目标的辐射率;  $T_s$  为被测目标的物理温度;  $\Gamma(\theta, \varphi)$  为被测目标的反射率, 满足  $\Gamma(\theta, \varphi) + \epsilon(\theta, \varphi) = 1$ ;  $T_{Bother}(\theta, \varphi)$  表示其它辐射源辐射到被测目标上的亮温。

通常, 对于同一个毫米波被动探测系统,  $(\theta, \varphi)$  方向其天线方向图  $F(\theta, \varphi)$  函数值不变, 该方向的视在温度  $T_{AP}(\theta, \varphi)$  决定了天线温度。因此, 典型地物毫米波被动探测机理的研究重在对其目标和背景的视在温度组成的讨论。

### 2 典型目标视在温度

#### 2.1 平面金属视在温度

为了便于分析, 假设平面金属填充在整个天线波束内, 即探测器天线没有照射到背景, 如图1所示。

图1中  $T_{DN}(\theta, H)$  为大气向下辐射亮温。当图1中的被测平面目标为平面金属时, 由于金属在 8 mm 波段辐射率  $\epsilon(\theta, \varphi) \approx 0$ , 反射率  $\Gamma(\theta, \varphi) \approx 1$ , 根据式(2)得辐射计探测平面金属时视在温度如式(3)。

$$T_{AP\text{平面金属}}(\theta, \varphi) = T_{DN} \quad (3)$$

收稿日期: 2015-07-10; 修回日期: 2015-08-25。

作者简介: 冯建利(1981-), 女, 陕西人, 讲师, 博士研究生, 主要从事毫米波被动探测辐射原理及信号处理方向的研究。

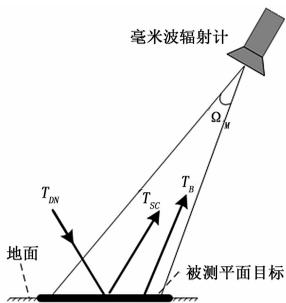


图 1 平面目标视在温度示意图

### 2.2 积水目标视在温度

在图 1 中取被测平面目标为积水, 8 mm 波段, 水的辐射率  $\epsilon(\theta, \varphi) \approx 0.63$ , 反射率  $\Gamma(\theta, \varphi) \approx 0.37$  [7]。因此, 积水目标与平面金属目标的不同之处在于, 积水除了主要反射大气向下辐射亮温之外, 本身还向外辐射能量。根据式 (2) 得积水的视在温度可表示为:

$$T_{AP水}(\theta, \varphi) = 0.63 \times T_s + 0.37 \times T_{DN} \quad (4)$$

### 2.3 装甲目标视在温度

相比于平面目标, 装甲目标是几何形状复杂的立体金属目标, 其视在温度组成如图 2 所示。

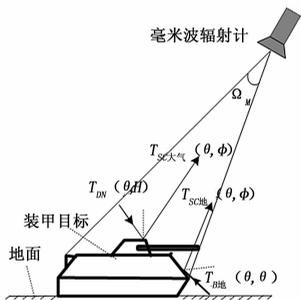


图 2 装甲目标视在温度示意图

从图 2 中可以看出, 装甲目标不同于平面金属目标和积水之处在于装甲目标的散射温度由两部分构成: (1), 部分面元反射的大气向下辐射亮温  $T_{DN}(\theta, H)$  形成的向天线口面方向散射的能量  $T_{SC大气}$ ; (2), 部分面元反射的地面背景辐射亮温  $T_{B地}$  向天线口面方向散射的能量  $T_{SC地}$ 。因此, 根据式 (2) 得装甲目标视在温度表示为

$$T_{AP装甲}(\theta, \varphi) = \sum_i T_{DN_i} + \sum_j T_{B_{地j}} \quad (5)$$

式 (5) 中  $T_{DN_i}$  表示装甲目标的第  $i$  个面元反射大气向下辐射亮温;  $T_{B_{地j}}$  表示装甲目标的第  $j$  个面元反射地面背景的辐射亮温。

## 3 毫米波被动探测信号的熵特征

由平面金属、地面积水和装甲目标视在温度组成的分析可知, 毫米波探测器运动过程中扫描所得平面金属目标和地面积水目标天线温度曲线呈现较均匀变化, 而装甲目标视在温度大小由照射条件决定。在探测器波束扫描装甲目标过程中, 天线与装甲目标的空间关系不断发生变化, 导致同一面元在不同的扫描时刻既有可能反射大气向下辐射亮温, 又有可能反射地面背景辐射亮温, 而且还有可能存在面元之间能量的多次反射[8]。因此, 装甲目标的天线温度曲线存在一定的不均匀性。

针对装甲目标探测信号的不均匀性, 借鉴物理学中混乱程度的表征量——熵[9], 提出毫米波被动探测信号的熵。假设毫米波被动探测所得地物目标天线温度曲线数据为  $N$  个采样点的集合  $T_A = \{T_{A1}, T_{A2}, T_{A3} \dots T_{AN}\}$ , 则毫米波被动探测信号的熵定义为:

$$S = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} |T_{A(i+1)} - T_{Ai}| \quad (6)$$

式 (6) 中,  $E$  表示天线温度曲线的熵;  $T_{Ai}$  表示探测目标的第  $i$  个天线温度值, 为叙述方便, 定义  $\{|T_{A(i+1)} - T_{Ai}|, i = 1, \dots, N-1\}$  为差值序列。  $E$  的大小体现了天线温度曲线的起伏即混乱程度,  $E$  值越大天线温度曲线的波动程度越大、混乱程度越高。

## 4 典型地物目标毫米波被动探测信号的熵

为了对毫米波被动探测地物目标天线温度进行熵分析, 采用目标面元法分别建立地面积水目标模型、平面金属目标模型和装甲目标模型, 编写仿真程序得到各种目标在草地背景下的天线温度曲线, 并计算了不同目标的熵。为了更加明确的分析天线温度曲线的波动程度, 进一步计算了差值序列。仿真参数设置: 系统采样率 2 000 Hz, 背景为草地, 环境温度为 30 °C, 天线为卡塞格伦天线, 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 20 米处匀速直线掠过。如图 3 为草地的天线温度曲线及其差值序列。

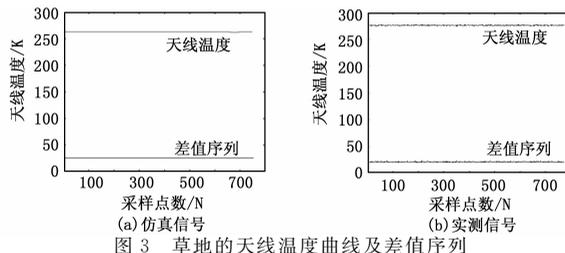


图 3 草地的天线温度曲线及差值序列

如图 3 所示, 无论是草地背景的仿真信号还是实测信号, 差值序列趋于平缓, 根据式 (6) 计算得到仿真信号和实测信号的熵分别为 0.026 6 和 0.781 9。图 4 所示为地面积水的天线温度曲线及差值序列。

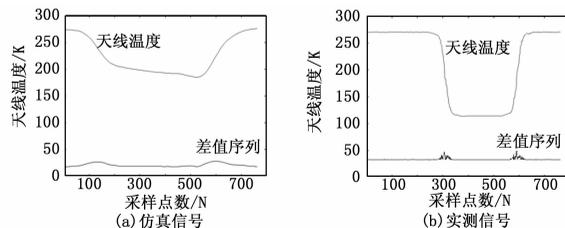


图 4 积水目标的天线温度曲线及差值序列

如图 4 所示, 地面积水的天线温度差值序列与草地不同, 有一定的起伏特性, 根据式 (6) 计算得到仿真信号和实测信号的熵分别为 0.412 1 和 0.984 0。图 5 所示为平面金属目标的天线温度曲线及差值序列。

如图 5 所示, 平面金属的天线温度差值序列与地面积水相似, 有一定的起伏特性, 同时由于平面金属与地面背景的天线温度差大于地面积水与地面背景的天线温度差, 所以平面金属的天线温度差值序列的起伏程度略高于地面积水。根据式 (6) 得到仿真信号和实测信号的熵分别为 1.037 8 和 1.192 0。如图 6 所示为某装甲目标的天线温度曲线及差值序列。

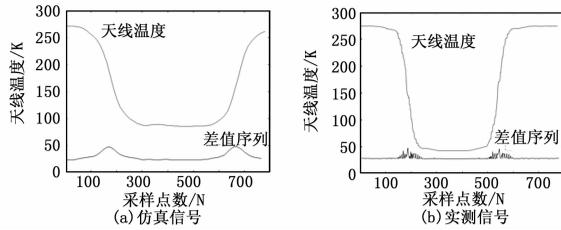


图 5 平面金属的天线温度曲线及差值序列

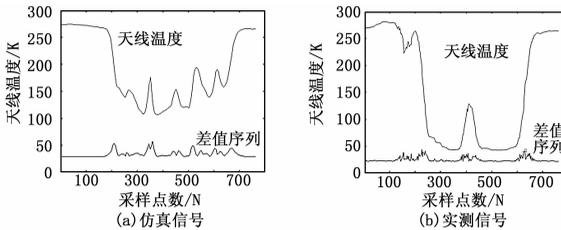


图 6 装甲目标的天线温度曲线及差值序列

如图 6 所示, 装甲目标信号的差值序列起伏特性尤为明显, 根据式 (6) 计算得到装甲目标天线温度的仿真曲线和实测曲线的熵分别为 2.924 2 和 3.756 1。

### 5 仿真分析

仿真条件同上, 为了统计得到各目标的熵, 对各目标进行了 200 次的仿真, 对仿真得到的天线温度曲线计算熵, 然后计算熵均值, 得到各地物目标熵的统计平均值如表 1 所示。

表 1 不同目标天线温度熵的统计平均值

	草地	地面积水	平面金属	装甲目标
熵的均值	0.7926	1.0078	1.2370	3.1030

从表 1 可知在样本量为 200 时得到的各目标天线温度熵统计平均值与上节单次实测和仿真得到的结果相符, 即熵值由低到高的排序依次为: 草地、地面积水、平面金属、装甲目标。原因在于: (1) 实测和仿真均以草地为背景, 所以当目标也为草地时, 目标和背景相同, 所以熵最小; (2) 地面积水的天线温度低于草地, 即地面积水和草地之间存在一定的天线温度差, 所以地面积水的差值序列存在一定程度的起伏, 熵大于草地; (3) 平面金属的天线温度低于地面积水, 即平面金属与草地之间存在更大的天线温度差, 所以其差值序列的波动大于地面积水, 从而熵大于地面积水; (4) 装甲目标实际为金属目标, 所以装甲目标与草地之间也存在较大的天线温度差; 同时, 装甲目标又是几何外形复杂的立体金属目标, 面元的反射能量可能来源于大气向下辐射亮温、地面背景辐射亮温以及其它面元反射的辐射亮温等多种情况, 所以装甲目标的天线温度曲线波动程度最高, 其熵最大。因此, 根据熵的大小可以明确将装甲目标从其它目标中识别出来。为了进一步说明该方法的可行性, 图 7 绘制了不同目标熵的直方图。

分析图 7 (a) 可知, 地面积水与平面金属的熵分布存在明显交集, 所以从概率论理论知, 它们彼此误识别的概率较高。因此, 以熵作为特征量难以将地面积水与平面金属进行区分。但是, 分析图 (b)、(c) 和 (d) 可以看出, 坦克和草地、地面积水及平面金属的熵分布几乎不存在交集, 所以依据概率论知: 以目标的天线温度的熵作为特征量可以准确地将坦克与

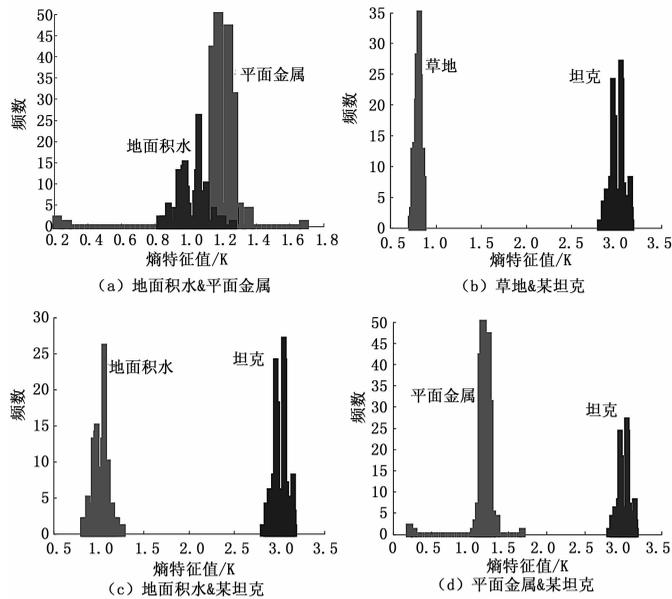


图 7 典型地物信号熵特征分布直方图对比

草地、地面积水及平面金属区分, 从而实现了在典型地物中对装甲目标的有效识别。

### 6 结论

从被动毫米波探测的基本原理出发, 详细分析了地面装甲目标与易误判为装甲目标的典型无源干扰——平面金属和地面积水的视在温度组成, 分析了他们的差异。根据存在差异的特点提出了毫米波被动探测信号熵特征的概念及计算方法, 并对大量典型地物目标及背景的实测信号和仿真信号分别进行了熵分布的统计。结果表明, 利用目标天线温度的特征量——熵可以有效地将装甲目标从典型地物背景中识别出来, 进一步提高了毫米波被动探测系统抗无源干扰的能力。

#### 参考文献:

- [1] Ulaby F T, Moore R K, Fung A K. Microwave Remote Sensing, Active and Passive. Vol. 1 [M]. Addison - Wesley Publishing Company, 1981.
- [2] Zhang Y M. Study on the technique of passive millimeter wave detector [J]. Journal of Beijing Institute of Technology. 2005, 14 (4) : 391 - 395.
- [3] 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, 24.
- [4] 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.
- [5] 时翔, 娄国伟, 李兴国, 等. 装甲目标毫米波辐射温度的建模与计算 [J]. 红外与毫米波学报, 2007, 26 (1) : 43 - 46.
- [6] 李兴国, 毫米波近感技术及其应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1991.
- [7] 时翔. 被动毫米波探测及其隐身技术研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2007.
- [8] 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.
- [9] 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.