

地面积水与装甲目标毫米波被动探测信号差异研究

冯建利^{1,2}, 张教民¹

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

摘要: 以往毫米波被动探测中以平面金属目标代替立体金属目标(如装甲目标), 而平面金属目标的探测信号又和地面积水的探测信号非常相似, 所以导致这3种目标难以分辨; 针对这一问题, 从毫米波被动探测平面金属、积水、装甲目标探测信号的基本理论出发, 通过建立目标模型、推导天线温度计算模型, 仿真得到了这3种目标的探测信号, 查找信号差异并分析总结了造成差异的根源; 仿真结果证实了分析的正确性和有效性, 为地面装甲目标识别算法的研究提供了必要的理论支撑和分析依据。

关键词: 兵器学科与技术; 毫米波被动探测; 地面积水; 装甲目标; 信号差异

Research on Signal Differences of Water and Armored Target with Passive Millimeter Wave Detection Technology

Feng Jianli^{1,2}, Zhang Xiaomin¹

(1. College of Marine Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

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

Abstract: In the past, people always use planar metal instead of armored target in passive millimeter wave detection, and the detection signal of planar metal and water is very similar, so it is difficult to distinguish these three targets. To solve this problem, started from the basic theory of passive millimeter wave detection, established the target model, deduced the antenna temperature calculation model, simulated the detection signal and found the source of signal differences, summarized and analyzed the roots of the differences. The simulation results demonstrate the validity and feasibility of the conclusion, which provides necessary theoretical support and analytical basis for the study of armored target recognition algorithm.

Keywords: ordnance science and technology; passive millimeter wave detection; water; armored target; signal differences

0 引言

毫米波被动探测利用不同目标在毫米波段的辐射特性不同对目标进行识别, 而金属目标与典型地面背景在毫米波段的辐射能量具有明显差异, 所以利用毫米波被动探测技术对地面装甲目标进行探测是一种行之有效的方法^[1-2]。但是, 与其它典型地面背景相比, 地面积水的毫米波辐射能量与金属目标差异较小^[3-4]。以往毫米波被动探测的研究多为地面典型背景中装甲目标的探测, 而且在建立辐射模型时都是将装甲目标等效为平面金属目标或简单立方体^[5-10], 即很有可能导致对平面金属目标、积水、立体金属目标(如装甲)的模糊识别与错误识别。为了从本质上区分地面积水、平面金属目标与装甲目标, 本文对地面积水与平面金属目标及立体金属目标(装甲)的毫米波被动探测信号进行了详细的理论分析, 并推导出了它们之间存在的差异。

1 毫米波被动探测基本原理

被动毫米波探测是一种对探测目标及背景自然辐射毫米波能量的无源检测方法。在相同环境温度下, 不同目标的毫米波辐射能量(亮温)不同, 通过辐射计探测所得能量即天线温度可表示为^[11]:

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

其中: T_A 为天线温度, θ 为入射角, φ 为方位角, $F(\theta, \varphi)$ 为归一化天线方向图, $T_{AP}(\theta, \varphi)$ 为 (θ, φ) 方向的视在温度, Ω 为天线主瓣立体角(忽略旁瓣)。

通常, 对于同一个毫米波被动探测系统, (θ, φ) 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, 对地面积水、平面金属目标、装甲目标毫米波被动探测信号差异的分析, 首先需要从理论上对它们的视在温度进行分析。

毫米波近程被动探测体系的探测距离通常在距离地面几十米范围内, 此时可以忽略大气向上辐射的亮度温度和大气损耗, 所以视在温度是到达探测器天线口面的所有辐射能量之和, 表示为:

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

式(2)中, $\epsilon(\theta, \varphi)$ 为地物的辐射率(发射率); T_s 为地物自身的物理温度(环境温度); $\Gamma(\theta, \varphi)$ 为地物的反射率(满足 $\epsilon(\theta, \varphi) + \Gamma(\theta, \varphi) = 1$); T_B 为周围环境或大气的辐射温度。

特殊地, 当探测器仅照射到地面背景时, 由于 8 mm 波段典型地面背景(如: 沥青、混凝土、干沙地等)的辐射率很高, 大气向下辐射亮温较小, 地面背景反射大气向下的辐射温度与背景自身辐射温度相比可忽略不计。所以根据式(2)可得地面背景的视在温度约等于地面背景的亮度温度。

1.1 平面金属目标视在温度组成

为方便, 首先对地面背景上平面金属目标的视在温度进行

收稿日期: 2014-10-23; 修回日期: 2014-11-24。

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。

讨论。假设平面金属目标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。

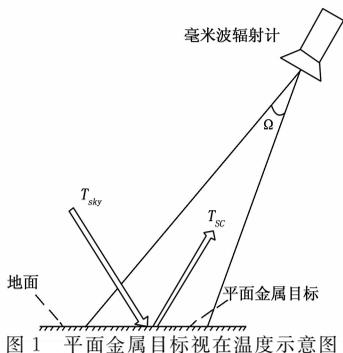


图 1 平面金属目标视在温度示意图

在毫米波段，金属是白体，辐射率 $\epsilon(\theta, \varphi) = 0$ ，发射率 $\Gamma(\theta, \varphi) = 1$ ，由图 1 知 $T_{sc}(\theta, \varphi)$ 是平面金属目标反射的大气向下辐射温度 T_{sky} ，根据式 (2)，平面金属目标的视在温度为：

$$T_{AP}(\theta, \varphi) = T_{sky} \quad (3)$$

即，当平面金属目标填充在整个天线波束内时，平面金属目标视在温度等于大气向下辐射亮温。

1.2 积水目标视在温度组成

为讨论毫米波被动探测金属目标与积水目标信号的差异，从理论上分析地面积水目标视在温度的组成。同样，假设地面积水目标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 2 所示。

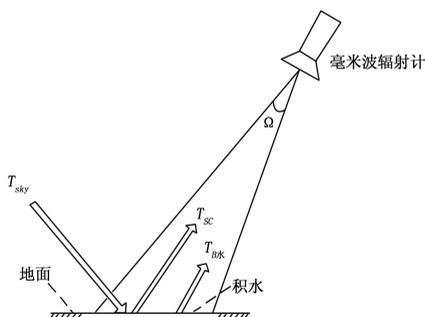


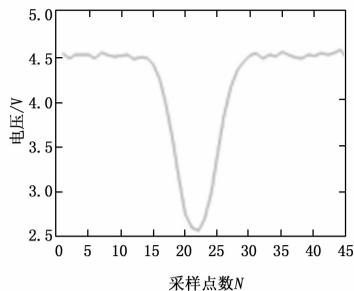
图 2 积水目标视在温度示意图

从图 2 可以看出，水面目标视在温度除了经水面反射大气辐射温度 T_{sky} 向 (θ, φ) 方向散射能量外，还有水面自身的辐射温度。根据式 (2) 得到此时积水的视在温度为：

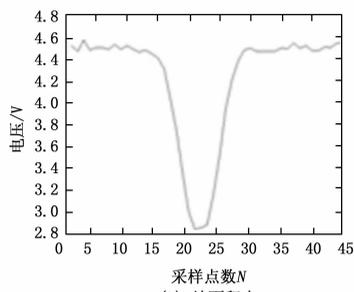
$$T_{AP}(\theta, \varphi) = \epsilon_{水}(\theta, \varphi) \times T_{水} + \Gamma_{水}(\theta, \varphi) \times T_{sky} \quad (4)$$

当毫米波被动探测器在运动过程中探测金属目标时，探测到的地面积水目标信号其形式与平面金属目标比较接近，只采用能量判别的方法探测地面装甲目标，很容易受到地面积水的干扰产生误识别。如图 3 所示为环境温度为 25℃ 下，草地背景中，探测器高度 5 m，天线波束宽度 30°，钢板（平面金属目标）和积水的毫米波被动探测信号曲线。图 3 (a) 为 1 m × 2 m 钢板测试结果，图 3 (b) 为 1.6 m × 2 m 积水目标测试结果。

根据图 3 可知，虽然钢板与积水目标的面积不相等，但在相同测试条件下，它们的幅度特征非常相近。在复杂战场环境下，仅依靠毫米波被动探测信号的幅度特征来进行金属目标探测很容易受到地面积水目标的干扰。



(a) 钢板目标

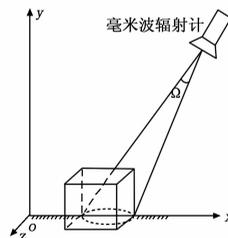


(b) 地面积水

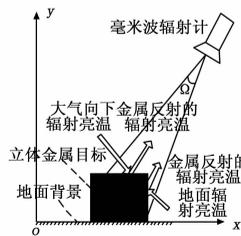
图 3 钢板与积水毫米波被动探测信号实测曲线

1.3 立体金属目标视在温度组成

假设立体金属目标充满整个天线波束，探测器天线没有照射到地面背景，如图 4 所示。由于金属是白体，其本身不辐射能量，但可以反射周围环境的辐射能量。因此，对比式 (3)（平面金属目标的视在温度）知：立体金属目标的视在温度不能仅考虑其反射大气的辐射温度，还需考虑其反射地面背景的辐射温度。



(a) 立体示意图



(b) 截面示意图

图 4 立体金属目标视在温度示意图

如图 4 所示，立体金属目标的一部分表面有可能反射来自大气向下的辐射温度 T_{sky} ，形成向探测器天线口面方向散射能量 T_{sc1} ；同时也存在一部分表面反射来自地面背景向上的辐射温度 $T_{B地}$ ，形成向天线口面方向散射的能量 T_{sc2} 。因此可知立体金属目标视在温度可表示为：

$$T_{AP}(\theta, \varphi) = \begin{cases} \Gamma_{金属}(\theta, \varphi) \cdot T_{sky} & (\theta, \varphi) \in \Omega_1 \\ \Gamma_{金属}(\theta, \varphi) \cdot T_{B地} & (\theta, \varphi) \in \Omega_2 \end{cases} \quad (5)$$

式 (5) 中， $\Gamma_{金属}(\theta, \varphi)$ 为金属目标的反射系数， $T_{B地}$ 为地面背

景的亮度温度, Ω_1 为金属反射大气辐射到达天线口面的金属目标表面所张立体角, Ω_2 为金属反射地面辐射到达天线口面的金属目标表面所张立体角。由此可看出, 平面金属目标、积水及立体金属目标的视在温度存在明显差异, 为了进一步分析, 必须对各目标建立目标模型、分析战场环境下探测时各目标的视在温度、仿真分析, 最终得到对比分析结果。

2 地面积水与装甲目标模型

在理论分析地面积水、平面金属和立体金属目标毫米波被动探测信号差异的基础上, 建立仿真模型, 编制仿真软件并计算得到地面积水和装甲目标毫米波被动探测信号, 为进一步分析提供数据支持。

2.1 地面积水目标模型

从地面积水视在温度的分析中不难得知, 地面积水是一种具有一定反射率的平面目标, 因此地面积水模型的建立需要着重考虑其尺寸和反射率的因素。图 5 所示为地面积水目标模型示意图。可以通过设定图中 (x, y) 值设定水面大小, 并且可以通过探测器天线波束与水面间空间关系由式 (4) 计算得出地面积水的视在温度。

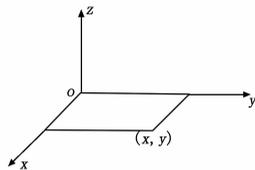


图 5 地面积水模型示意图

2.2 装甲目标模型

装甲目标可视为复杂的立体金属目标。在毫米波段其发射率为 0。其视在温度的组成由目标与探测器天线空间关系相关, 因此目标模型重在表述装甲目标其自身的几何特性。

采用 Pro/E Wildfire 2.0 建立某坦克全尺寸三维几何模型, 采用 ANSYS 软件的前处理模块进行面元剖分, 生成装甲目标的面元模型。如图 6 为某装甲目标模型。

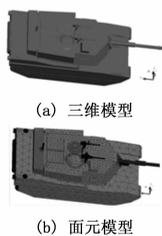


图 6 某装甲目标模型

3 地面积水及装甲目标天线温度计算模型

3.1 地面积水天线温度计算模型

为了得到完整的天线温度计算方法, 假设天线波束内不仅有地面积水, 也有地面背景, 如图 7 所示。

由图 7 中可知, 毫米波辐射计的天线温度既包括地面积水的视在温度, 也包括地面背景的视在温度。根据式 (4) 可得此时探测器天线温度可表示为:

$$T_A = \frac{1}{4\pi} \iint_{\Omega_{\text{水}}} (\epsilon_{\text{水}}(\theta, \varphi) \times T_{\text{水}} + \Gamma_{\text{水}}(\theta, \varphi) \times T_{\text{sky}}) F(\theta, \varphi) d\Omega + \frac{1}{4\pi} \iint_{\Omega_{\text{地}}} (\epsilon_{\text{地}}(\theta, \varphi) \times T_{\text{地}}) F(\theta, \varphi) d\Omega \quad (6)$$

式 (6) 中, $\Omega_{\text{水}}$ 为积水对探测器天线所张立体角, $\Omega_{\text{地}}$ 为地面背

景对天线所张立体角。

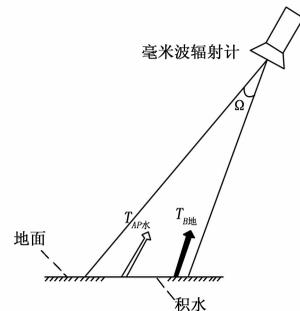


图 7 地面积水天线温度组成

3.2 装甲目标天线温度计算模型

用同样的方法分析装甲目标的天线温度组成, 如图 8 所示。

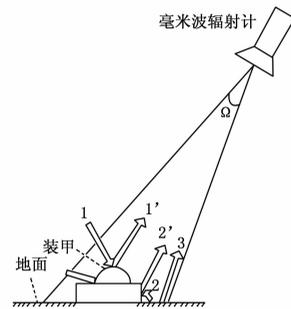


图 8 装甲目标天线温度组成

图 8 中, 射线 1 表示大气向下辐射的亮温, 射线 1' 表示装甲反射的大气向下辐射亮温, 射线 2、射线 3 表示地面背景辐射的亮温, 射线 2' 表示装甲反射的地面背景辐射亮温。

由图 8 和式 (5) 可得装甲目标的天线温度为:

$$T_A = \frac{1}{4\pi} \iint_{\Omega_{\text{装甲反射大气}}} \Gamma_{\text{金属}}(\theta, \varphi) T_{\text{sky}} F(\theta, \varphi) d\Omega + \frac{1}{4\pi} \iint_{\Omega_{\text{装甲反射地面}}} \Gamma_{\text{金属}}(\theta, \varphi) T_{\text{B地}} F(\theta, \varphi) d\Omega + \frac{1}{4\pi} \iint_{\Omega_{\text{地面背景}}} T_{\text{B地}}(\theta, \varphi) F(\theta, \varphi) d\Omega \quad (7)$$

式 (7) 中, $\Omega_{\text{地面背景}}$ 为地面背景对毫米波探测器天线所张立体角; $\Omega_{\text{装甲反射大气}}$ 为反射大气向下辐射的装甲目标表面对天线所张立体角; $\Omega_{\text{装甲反射地面背景}}$ 为反射地面背景的装甲目标表面对天线所张立体角。 $\Omega_{\text{装甲反射大气}}$ 和 $\Omega_{\text{装甲反射地面背景}}$ 可由装甲面元和天线空间关系求得。

4 结果与分析

4.1 仿真结果对比分析

以天线温度计算方法为基础, 编写仿真软件。对地面积水和装甲目标进行毫米波被动探测信号仿真。设定地面积水尺寸为 $3 \times 6 \text{ m}^2$ 、探测器飞行高度为 5 米、天线波束宽度 18° 、地面背景为混凝土。仿真结果如图 9 所示。

从图 9 可以看出, 仿真得到的地面积水和装甲车的天线温度有明显差异, 为了证明仿真结果的正确性, 进行了试验实测, 得到了如图 10 所示的实测结果。

4.2 测试结果对比分析

试验条件: 环境温度 30°C ; 地面背景为混凝土; 系统采样率 2 000 Hz; 天线采用口面半径为 0.1 米的卡塞格伦天线; 弹丸以 200 m/s 的速度从目标正前方上空沿着直线轨迹匀速掠

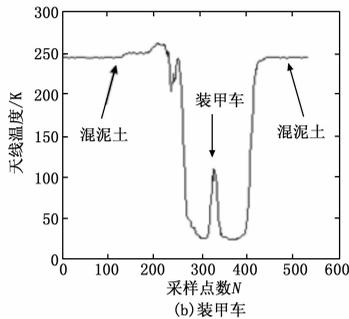
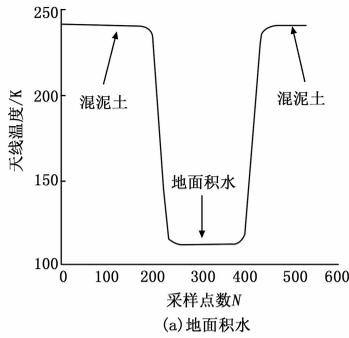


图 9 天线温度仿真结果对比图

过目标；探测俯角 30°；探测器距离地面高度 5 米，得到地面积水和装甲车天线温度实测曲线如图 10 所示。

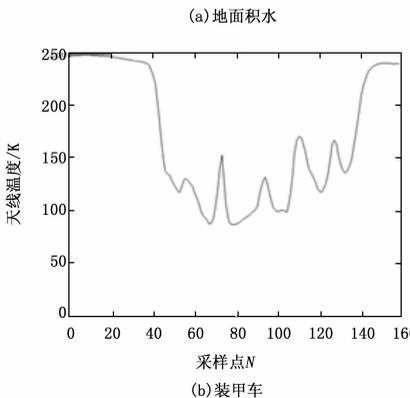
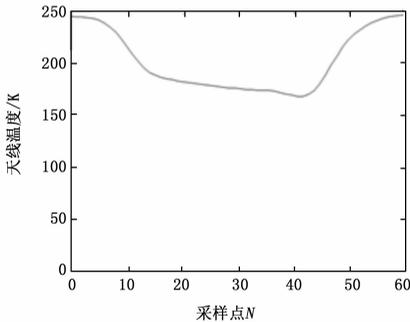


图 10 天线温度实测结果对比图

对比分析图 9 所得的仿真结果和图 10 所得的试验实测结果可得如下结论：

- 1) 由于水和金属的辐射率均低于混凝土，所以它们的天线温度值均低于混凝土。
- 2) 地面积水和装甲车（复杂立体金属）的天线温度曲线存在明显差异。地面积水可近似为平面目标，而装甲车是形状较为复杂的立体金属目标，因此地面积水天线温度曲线相对平

滑，而装甲车天线温度曲线存在明显的起伏。

3) 地面积水天线温度曲线的最小值大于装甲车天线温度曲线的最小值。

4) 造成地面积水与地面装甲车天线温度曲线存在明显差异的根本原因在于视在温度组成起到决定作用的能量不同，概括为表 1 所示。

表 1 不同地物目标的视在温度组成统计表

地物背景或目标	视在温度主要组成
典型地面背景 (如混凝土)	背景自身的辐射亮温
平面金属目标	平面金属目标反射大气的辐射亮温
地面积水目标	水面自身的辐射亮温 + 水面反射大气的辐射亮温
立体金属目标	在探测器天线照射范围内,目标的一部分表面反射大气的辐射亮温 + 目标的另一部分表面反射地物背景的辐射亮温

为方便比较，表 1 不仅给出了地面积水和立体金属目标的视在温度组成，同时还给出了地面背景和平面金属目标的视在温度组成。

5 结论

以平面金属目标、地面积水和立体金属目标毫米波被动探测视在温度的不同组成为理论基础，建立了平面金属模型、地面积水模型、装甲目标模型，推导出平面金属目标、地面积水及装甲目标天线温度的计算方法。通过仿真计算和试验实测得到了平面金属目标、地面积水及装甲目标的毫米波被动探测信号，进一步分析了它们之间的差异，并推导出存在差异的原因是各目标的视在温度组成不同。本文的分析为毫米波被动探测装甲目标中抗地面积水信号干扰，以及装甲目标识别算法研究提供了必要的理论依据和数据支持。

参考文献：

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 时翔, 娄国伟, 李兴国. 毫米波被动探测与目标辐射特性的控制 [J]. 探测与控制学报, 2006, 28 (2): 10-12.
- [6] 聂建英, 李兴国, 娄国伟. 毫米波辐射探测目标亮温的估计 [J]. 微波学报, 2003, 19 (2): 24-27.
- [7] 周珩, 娄国伟. 毫米波辐射计的缩比测试 [J]. 制导与引信, 2006, 27 (4): 36-39.
- [8] Chen X, Xu J Z. A novel method for waveform jamming based on millimeter-wave alternating current radiometer [J]. Journal of Electromagnetic Waves and Applications (S1059-2362), 2013, 27 (1): 66-76.
- [9] 陈曦, 陈自力, 许建中, 等. 基于波形诱骗的末敏弹毫米波有源干扰研究 [J]. 兵工学报, 2014, 35 (1): 49-54.
- [10] 赵裔昌, 马岸英, 马秋华. 毫米波辐射探测立体目标元法建模 [J]. 探测与控制学报, 2008, 30 (3): 41-45.
- [11] 张祖荫, 林士杰. 微波辐射测量技术及应用 [M]. 北京: 电子工业出版社, 1995.