

②255-261

毫米波辐射计的波形模拟与目标识别

汪敏 李兴国

(南京理工大学毫米波光波近感技术研究所, 江苏, 南京, 210094)

TN015

摘要 在毫米波辐射计工作原理的基础上,建立了辐射计探测金属目标输出信号的模型.根据波形特点提出一种目标识别方案,给出仿真结果,并讨论了识别方案的计算量问题.

关键词 毫米波辐射计, 表观温度, 目标识别.

波形模拟

引言

随着无源探测技术的发展,毫米波被动式探测技术有着广阔的应用前景.本文在分析被动式毫米波探测器工作原理的基础上,建立了毫米波辐射计天线温度的数学模型,并进一步把目标特性模型推广到接收机输出端口.根据辐射计波形的特点,提出一种被动式目标识别方案,利用目标特性模型进行了目标识别的仿真;还讨论了这一识别方案的实时性问题,为进一步的工作提供了依据.

1 毫米波辐射计的建模

1.1 毫米波辐射计工作原理^[1]

毫米波辐射计是一种高灵敏度无线电接收系统,它利用物体在毫米波段的辐射特性差异来探测目标.物体的表观温度 $T_{ap}(\theta, \varphi)$ 与实际温度 T 的关系为

$$T_{ap}(\theta, \varphi) = \epsilon(\theta, \varphi)T, \quad (1)$$

式(1)中, θ 为入射角, φ 为方位角, $\epsilon(\theta, \varphi)$ 为物质在 (θ, φ) 方向的发射率.由于 ϵ 不同,同一环境下物理温度相同的不同物质表观温度可能相差很大.金属目标的毫米波发射率近似为零,地面发射率则很高,为 0.935 左右.因此,放在地面上的金属无论实际温度多高,其表观温度总近似为 0(仅反射天顶温度),与地面有较高的温度对比度.故被动式毫米波探测器能探测及识别地面金属目标.

不计电磁辐射穿过大气时的衰减效应,同时假设辐射特性变化缓慢,方位角的变化不影响测量,接收机接收地面辐射时,天线附近的辐射温度可表示为

$$T_{Bg}(\theta, \Delta f) = \rho_g(\theta)T_s + \epsilon_g(\theta)T_g + \epsilon_a(\theta)T_a + \rho_g(\theta)T_a\epsilon_a(\theta), \quad (2)$$

式(2)中, Δf 为接收机带宽; ρ_g 为地面反射系数; ϵ_g, ϵ_a 分别为地面和大气的发射率; T_g, T_a 分别为地面和大气的物理温度; T_s 为天空的辐射温度.当天线波束扫描到金属目标时,辐射计

天线附近温度为

$$T_{BR} = \rho_T T_s + \rho_T T_a \epsilon_a(\theta), \quad (3)$$

式(3)中, ρ_T 为金属目标的反射系数. 由式(3)和(4)得到地面和金属目标的对比度为

$$\begin{aligned} \Delta T_T &= T_{Bg}(\theta, \Delta f) - T_{BR} \\ &= \rho_s(\theta) T_s + \epsilon_s(\theta) T_g + \epsilon_a(\theta) T_a + \rho_s(\theta) T_a \epsilon_a(\theta) - \rho_T T_s - \rho_T T_a \epsilon_a(\theta). \end{aligned} \quad (4)$$

一般金属目标和地面之间具有较高的温度对比度, 检测 ΔT_T 就能探测及识别地面金属目标.

1.2 辐射计输出信号的数学模型

设接收机天线功率方向图为 $G(\theta, \varphi)$, 物体的辐射温度为 $T(\theta, \varphi)$, 则天线温度可表示为

$$T_a = \frac{1}{4\pi} \int_{4\pi} T(\theta, \varphi) G(\theta, \varphi) d\Omega, \quad (5)$$

式(5)中, $T(\theta, \varphi)$ 采用式(4)的模型. $G(\theta, \varphi)$ 则可近似为

$$G(\theta, \varphi) = G_0 e^{-b\theta^2}. \quad (6)$$

式(6)中 G_0 为天线波束中心的功率增益; b 为波形系数; θ 为扫描点与波束中心夹角. 辐射计与目标交会情况如图 1 所示. 图 1 中天线距 x - y 面的高度为 H , 波束对称轴与 z 轴夹角为 θ_s , 目标面积为 $(x_2 - x_1) \times (y_2 - y_1)$, 目标中心的方位角为 α , 目标中心 O' 与原点 O 的距离为 r . 依据物体的电磁辐射机理, 利用式(4)和(5), 可推出(推导过程从略)计算辐射计天线温度的数学模型^[1~2]为

$$\Delta T_a = \frac{G_0 H \Delta T_T}{4\pi} \int_{y_1}^{y_2} \int_{x_1}^{x_2} \frac{\exp\left\{-b\left[\arccos \frac{H \cos \theta_s + y \sin \theta_s}{(x^2 + y^2 + H^2)^{\frac{1}{2}}}\right]^2\right\}}{(x^2 + y^2 + H^2)^{\frac{3}{2}}} dx dy, \quad (7)$$

式(7)中, $\Delta T_T = T_T - T_{BR}$ 代表目标与背景之间的温度对比度, $\Delta T_a = T_a - T_s$ 代表天线温度变化量.

在交流式全功率辐射计中, 天线波束在温度对比度为 ΔT_T 的“热”背景(如地面)和冷目标之间扫描, 得到天线温度变化量 ΔT_a 的信息, 经天线接收进来之后, 经过混频、中放, 再经过平方律检波、视放, 将功率转化为电压的形式. 根据式(7), 辐射计的输出信号(电压)可表示为

$$\mu_a(t) = f'(\Delta T_a, \chi) = f(\Delta T_T, x_2 - x_1, y_2 - y_1, H, \alpha, r, t, \chi), \quad (8)$$

式(8)中, χ 为与接收机处理电路有关的参数(其中包括平方律检波器功率灵敏度常数、放大器增益、系统带宽以及机内噪声影响等).

从式(8)可见, 辐射计输出信号中包含着目标的所有信息, 即辐射特性(ΔT_T)和几何尺

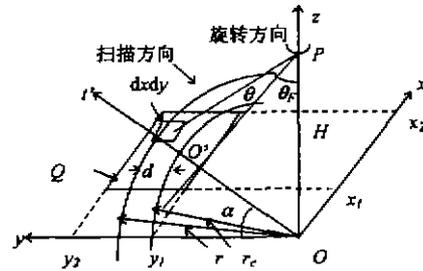


图 1 辐射计与目标交会情况
Fig. 1 The crossing condition about radiometer and target

寸以及交会的距离、方位、扫描情况等信息。目标识别的任务就是通过对输出信息进行分析来分辨真假目标及确定目标中心部位。

1.3 辐射计输出信号的仿真

仿真实验中设定辐射计参数为: 天线增益 $G_0=26\text{dB}$; 天线 3dB 波束宽度 $\theta_{3\text{dB}}=4^\circ$; 辐射计下落方向与地面法线夹角 $\theta_r=30^\circ$; 恒定转速为 $n=4\text{rps}$; 恒定降落速度为 10m/s 。同时假设目标与背景有确定的温度对比度 ΔT_r 。采样间隔为 0.1875ms 。利用式(8)可求出任意交会情况下的仿真输出波形。图2给出方位角 $\alpha=0^\circ$, 偏移量 $d=m$ 时, 对 $3\times 6\text{m}^2$ 长方形目标进行扫描获得的 $30\sim 130\text{m}$ 、每隔 10m 的辐射计输出波形。图3所示为 $H=40\text{m}$, $\alpha=0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, d=0, 0.5\text{m}$ 时扫描 $3\times 4\text{m}^2, 3\times 6\text{m}^2, 4\times 6\text{m}^2$ 目标得到的每组6个波形。

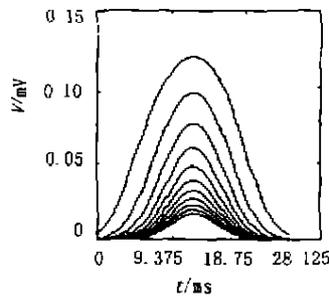


图2 $3\times 6\text{m}^2$ 目标不同高度下的波形
Fig. 2 The waveform of $3\times 6\text{m}^2$ target at different height

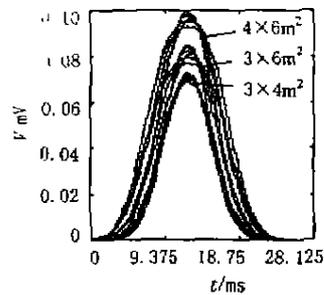


图3 相同高度下不同尺寸的目标波形
Fig. 3 The waveform of the targets with different scale at the same height

由图(2)和(3)中波形可见:(1)当天线波束在地面投影面积与目标面积相近的情况下,辐射计的输出信号为钟形脉冲,峰值点对应着与扫描方向垂直的目标中线,且具有近似对称性(因目标面积的对称性而异);(2)随着高度的降低,峰值变高(输出信号变强),脉冲变宽,斜率变大;(3)输出波形的峰值及脉宽同时受到扫描方向角及偏移量的影响;(4)辐射计输出信号的强弱受到目标尺寸的影响;尺寸越大,信号越强。

为比较仿真信号与实际信号,本实验室利用具有上述工作参数的 8mm 辐射计对不同面积的仿真目标进行高塔实验,并利用 $\text{HY}-6020$ 系列数据采集系统采出信号。图4给出了 $\alpha=0^\circ$ 时测量高度分别为 $60\text{m}, 90\text{m}$ 及 120m 下对 $3\times 4\text{m}^2$ 和 $3\times 6\text{m}^2$ 目标实际测得的波形。从最小相对误差能量的角度出发,引入相关参数

$$\rho_{xy} = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} x(t)y(t)dt}{\left[\int_{-\infty}^{+\infty} x^2(t)dt \int_{-\infty}^{+\infty} y^2(t)dt \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (9)$$

来表示信号 $x(t)$ 和 $y(t)$ 的相似度。利用式(9),求各自目标 $30\text{m}\sim 100\text{m}$ 每一高度下 15 组,共 8×15 组仿真波形与相应实测波形的平均相似度,计算结果为 92.63% 。

在实际测试中,辐射计输出信号受诸多因素的影响,如大气干扰、地面杂波、辐射计本身振动和抖动、电路噪声及目标辐射特性的不均匀性、形状不规则性等,因此输出信号包含许多杂波。在波形仿真中,我们根据环境采用不同的杂波模型进行杂波仿真,叠加在理想信号

上. 对输出信号分析之前, 首先采用平滑滤波器进行预处理; 同时, 杂波中的目标检测可采用恒虚警处理, 常见的方法有滑窗式检测和杂波图 CFAR. 滑窗式检测利用临近单元的杂波样本对杂波强度进行估计以形成检测门限, 实现简单, 并能满足实时性要求.

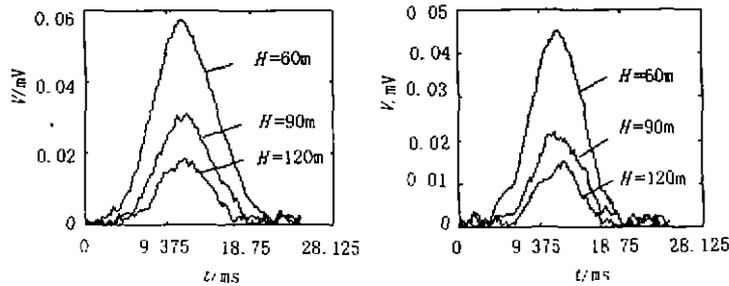


图4 仿真目标的实测波形
Fig. 4 The test waveform of simulated targets
(a) $3 \times 6\text{m}^2$ target (b) $3 \times 4\text{m}^2$ target

2 被动式探测系统目标的识别

主动体制探测系统可以发射各种调制信号, 从而能够获得大量关于目标距离、方位、速度甚至形状的信息, 而被动式的目标识别只能立足于辐射计的一维输出信号.

2.1 特征提取

基于一维波形的常用特征有 FOBW 特征、波形特征及频谱特征等. 从目标仿真实验得出结论: 目标的尺寸、探测系统与目标的交会情况等信息, 反映在回波信号的能量、峰值、脉冲宽度、最大最小升降斜率以及波形的对称性等各个方面. 因此可根据具体情况选择时域回波参量中合适的特征作为模板. 经过对不同目标和各种交会条件下的大量计算、分析, 本文选取输出信号波形的宽度、峰值和反映目标辐射能量的波型面积, 作为特征, 建立不同高度下真目标及两类与真目标相近的假目标的模板库, 利用模式识别方法将真假目标分开.

为建立某一高度下的目标模板, 对交会参数设置如下: 方位角取 $0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ 等 5 个角度, 基本代表 $0 \sim 360^\circ$ 范围内的不同方位角情况; 偏移量取 $0, 0.25, 0.5\text{m}$, 保证了接收信号是扫描过物体中心时得到的. 这样, 在一个高度下产生 3×5 共 15 个波形, 基本上能覆盖该高度下的所有数据空间, 求出 15 组波形特征, 并统计均值和方差, 分别作为模板及用于求模板各特征量的隶属函数. 表 1 给出真假 3 种目标在四个高度下的模板.

从表 1 中可以看出, 同一高度下特征矢量的值随目标尺寸的增大而增大, 不同大小的目标特征有明显而稳定的差异. 同一目标在不同高度下的特征量随高度的降低而增大. 因此利用对应高度下的模板可识别大小不同的目标.

2.2 目标识别

在毫米波辐射计目标识别中, 既要考虑识别方法的抗噪性、有效性, 又要尽量减少计算量, 满足实时性要求. 本文提出一种基于模糊识别与统计模式识别的方法.

本文引入模糊方法的依据是: 在一定高度下目标特征受方位角、偏移量等影响具有一定的模糊度, 利用模糊函数能表示出目标模式的软边界, 较几何边界更可靠. 这里基于统计意

义,假定所用特征均为单一参数特征量,关于目标类别的隶属度函数符合正态分布^[3]:

表 1 三种目标在不同高度下的模板
Table 1 Models of three targets at different height

目标/m ²	高度/m	能量/mV·ms	峰值/mV	脉宽/ms
3×6	30	1.1078±0.2056	0.0996±0.0026	11.025±2.5276
	60	0.3824±0.0258	0.0518±0.0022	6.7312±0.5926
	90	0.1864±0.0200	0.0284±0.0012	5.7562±0.4716
	120	0.1068±0.0150	0.0177±0.0017	5.0875±0.7982
3×4	30	0.8684±0.0575	0.0932±0.0023	9.0625±0.7944
	60	0.2717±0.0218	0.0401±0.0018	6.1031±0.3520
	90	0.1248±0.0135	0.0211±0.0014	5.1375±0.5522
	120	0.0742±0.0187	0.0131±0.0014	4.1750±0.9176
4×6	30	1.3900±0.1617	0.1110±0.0016	12.6250±1.8174
	60	0.4989±0.0301	0.0645±0.0019	7.1625±0.5726
	90	0.2467±0.0197	0.0368±0.0016	6.1312±0.3994
	120	0.1520±0.0159	0.0235±0.0017	5.5500±0.6640

$$f_{ij} = \exp[-(x_i - a_{ij})^2/4b_{ij}], \quad (10)$$

式(10)中 a_{ij}, b_{ij} 分别为第 j 类目标若干样本的第 i 个特征的均值及方差, x_i 为待识别特征向量的第 i 个分量. 先利用式(9)求出 x_i 相对于 j 类模式的隶属度 f_{ij} , 然后对 f_{ij} 加权平均:

$$C_j = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N w_i f_{ij}, \quad (11)$$

将 C_j 作为 X 对于 j 类模式的隶属度, w_i 为权值. 分类的判别规则根据统计意义确定:

$$C_k = \max_{j=1}^N C_j, \text{ 且有 } C_k \geq \delta_1, C_{j \neq k} < \delta_2, \quad (12)$$

则 X 判为 k 类, 否则拒识. δ_1, δ_2 为两个决策门限, 可根据系统的灵敏度、设计工作情况和精度要求确定.

在目标识别方案中, 将 $3 \times 6 \text{ m}^2$ 的金属物体视为真目标, 为作对比, 设置 $3 \times 4 \text{ m}^2, 4 \times 6 \text{ m}^2$ 两种假目标, 利用前面所述方法对三种目标在 $30 \leq h \leq 130 \text{ m}$ 之间预先建立每隔 10 m 的特征模板. 对未知目标回波识别时, 先求波形特征, 然后求出该特征对应于相应高度下三类模板的隶属度, 利用式(11)的判别规则进行分类, 给出三类模板的隶属度与分类结果. 表 2 为 $30 \text{ m} \sim 130 \text{ m}$ 高度下, 对 20 组 $3 \times 6 \text{ m}^2$ 目标波形的识别结果.

由表 2 识别结果可看出, 辐射计对 $3 \times 6 \text{ m}^2$ 目标的最佳识别距离为 $50 \sim 90 \text{ m}$. 辐射计距离目标较近时, 方位角和偏移量的变化使目标特征量不稳定, 影响了真实目标特征与目标模板的匹配; 在较高的高度下, 辐射计接收到的信号较弱, 使辐射计目标识别率随高度增大而

降低. 表 2 中 30m 以下和 120m 以上识别率下降很快, 除特征不稳定原因外, 还跟门限选取有关. 实际应用中, 可适当调整门限 δ_1 和 δ_2 , 以获得最佳识别效果.

表 2 不同高度下的识别率
Table 2 Recognition rate at different height

高度/m	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
识别率/(%)	25	60	75	85	80	80	80	65	55	25	0

2.3 计算量的分析

在工程实现中, 特征的提取采用模拟及高速数字电路, 可近似及时地得到三个特征量. 在隶属度计算中, 待识别特征矢量对三个模板的隶属度计算共需 12 次加法、21 次乘法、9 次指数运算. 若利用工作频率为 12MHz 的单片机 8098/96 系列实现 3 字节浮点运算, 精度 $< 1/65536^{[4]}$, 整个隶属计算及判别共用时间不超过 4ms. 如果指数运算根据计算范围和精度预先建表, 然后通过查表方式获得, 则时间不超过 2ms. 因此, 整个特征提取和目标识别系统工作时间 $< 5ms$.

本文讨论了毫米波辐射计探测金属目标时的波形建模及目标识别等问题. 基于毫米波辐射计的工作原理, 给出了弹载模式下关于目标辐射特性 (ΔT_r)、尺寸以及交会情况的输出波形模型. 在背景温度确知的条件下对不同尺寸的目标进行仿真, 通过仿真波形和时测波形的对比论证了模型的准确性与实用性. 根据仿真波形的变化规律设计了满足实时性要求的目标识别方案, 识别结果说明辐射计的最佳作用距离为 50~90m. 这些结论为进一步研究弹载辐射计在复杂环境下形状对不规则目标的识别提供了依据.

REFERENCES

- 1 LI Xing-Guo. *Millimeter Wave Near-sensing Tech. & Appli.*, Beijing: National Defence Industry Publishing House (李兴国. 毫米波近感技术及其应用, 北京: 国防工业出版社), 1991, 35~41
- 2 LIAO Su-Peng. *Research on Target Identification of Radio Detection Systems*, Doctor's Thesis, East China Institute of Tech. (廖苏鹏. 无线电探测系统目标识别方法的研究. 华东工学院博士论文), 1992, 6
- 3 MAO Jing-Hong, XU Xiao-Jian. *Systems Engineering and Electronics* (毛京红, 许小剑. 系统工程与电子技术), 1994, (10), 11~18
- 4 ZHANG You-Tong. *Utility Guide of MCS8098 System*, Beijing: Tsinghua Univ. Press (张幽彤. MCS8098 系统实用大全, 北京: 清华大学出版社), 1993, 344~430

SIGNAL SIMULATION AND TARGET RECOGNITION OF MMW RADIOMETER

WANG Min LI Xing-Guo

(Research Institute of MMW & Light Wave Near-sensing Tech., Nanjing Univ.
Sci. & Tech., Nanjing, Jiangsu 210094, China)

Abstract Based on the working principle of MMW radiometer, an output signal model when detecting the metal target was presented. According to the feature of waveforms, a method of target recognition was advanced, and experimental simulation results were obtained.

Key words MMW radiometer, apparent temperature, target recognition.