

典型金属立体目标的毫米波辐射特性研究

高远, 张光锋, 于畅畅, 刘静

(南京理工大学 电子工程与光电技术学院, 南京 210094)

摘要: 针对规则金属立体目标的毫米波辐射特性数据库不完善的问题, 对金属球、金属柱和金属立方体 3 种典型目标分别进行 3 mm 和 8 mm 2 个波段辐射特性研究, 并对对比分析不同结构对目标毫米波辐射特性的影响; 通过理论计算金属平面目标天线温度对比度, 利用面元法推导出天线主波束范围内的金属立体目标表面的视在温度; 在此基础上使用辐射计对不同金属立体目标进行实际的测量, 分析了造成视在温度差异的原因; 实验丰富了金属立体目标的毫米波辐射特性数据库, 为典型金属立体目标成像和目标识别提供准确有效的数据支持。

关键词: 金属目标; 辐射特性; 天线温度对比度; 视在温度

Research on MMW Radiation Characteristic of Typical Mental Targets

Gao Yuan, Zhang Guangfeng, Yu Changchang, Liu Jing

(Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: Aim at solving the problem of the imperfect database of millimeter-wave radiation characteristics of regular metal stereoscopic targets, the radiation characteristics of three typical targets, such as metal spheres, metal columns and metal cubes, were studied. The effects of different structures on the MMW radiation characteristics of targets were compared and analyzed. The temperature contrast of the metal plane target antenna is calculated theoretically, and the apparent temperature of the surface of the metal stereo target within the main beam range of the antenna is deduced using the face element method. Based on this, using radiometers to make actual measurements of different metallic stereo targets, the causes of apparent temperature differences were analyzed. The experiment enriches the millimeter-wave radiation characteristics database of metallic stereo targets, providing accurate and effective data support for typical metal stereoscopic target imaging and target recognition.

Keywords: metal target; radiation characteristics; antenna temperature contrast; apparent temperature

0 引言

从本质上来说, 自然界中的物体都会向外产生辐射, 包括本身发射的电磁能量和反射来自其它物体的电磁能量。毫米波的频率介于微波和红外之间, 与微波和红外相比, 毫米波具有探测精度高、抗干扰能力强、受气候影响较小等特点^[1-2], 因此被广泛应用于通信、辐射测量、遥感等领域, 其中被动毫米波探测技术使用的毫米波辐射计由于只接收物体以及周围环境的热辐射, 自身并不发射电磁波, 具有很强的隐蔽性和抗干扰能力, 此外, 金属目标在毫米波段具有区别于周围环境的亮度温度, 温差从几十 K 到一百多 K 不等, 通过这种特性, 辐射计能够有效的识别背景下的金属目标, 达到探测目的。

随着毫米波探测技术的不断发展, 越来越多的学者投入该领域的研究中。李贝贝等使用多层介质建模的方法, 着重对水面植被进行研究^[3]; 齐学慧等利用狄克式辐射计, 对以水为背景的金属目标进行检测研究, 对以地面为背景的一些典型金属目标缺乏研究^[4]; 陈曦等利用射线追踪法

对金属球进行建模与分析, 缺少对其它典型金属目标的毫米波辐射特性分析与研究^[5]。本文对金属球、金属柱和金属立方体 3 种规则金属立体目标的辐射特性进行研究, 并分析不同的结构对金属目标辐射特性的影响。

1 毫米波辐射计原理

毫米波全功率辐射计是用来测量物体在毫米波段热辐射的高灵敏度接收机, 是最早投入应用的一种辐射计, 一般用于近距离探测, 全功率辐射计通过测量物体的亮度温度来区分不同的物体^[6]。图 1 给出了典型的毫米波全功率辐射计的系统框图。全功率辐射计主要由检波前部分、平方率检波器、低通滤波器和积分器组成, 使用平方率检波器可以保证辐射计的输出和输入的天线温度是线性相关的。使用低通滤波器可以有效的滤除平方率检波器输出电压中的高频分量, 滤波后的电压通过积分器可得到辐射计的输出电压 V_{out} , 输出电压 V_{out} 通过分步定标或者整体定标的方式转换成天线温度 K。

辐射计的输出信号除了有用信号外, 还包括接收机的内部噪声, 系统噪声温度记为 T_{sys} , 输入到辐射计的天线温度为 T'_A , 高频前端的总增益为 G , 检波前的系统总带宽为 B , 平方律检波器的功率灵敏度常数为 C , 那么辐射计的输出电压表示如下:

$$V_{out} = CGkB(T'_A + T_{sys}) \quad (1)$$

收稿日期: 2018-07-07; 修回日期: 2018-08-13。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(61371038); 江苏省高校优秀中青年骨干教师和校长境外研修计划。

作者简介: 高远(1994-), 男, 江苏盱眙人, 硕士研究生, 主要从事毫米波目标辐射特性方向的研究。

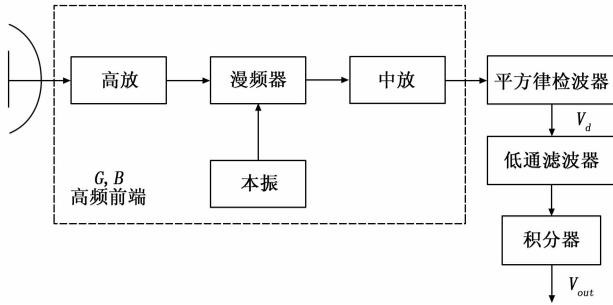


图 1 全功率辐射计原理框图

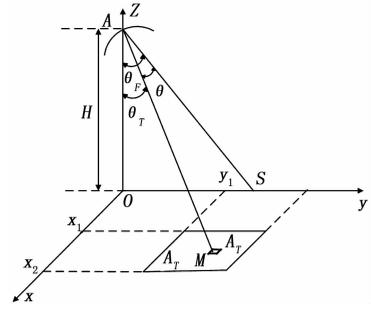


图 2 辐射计测量金属平面目标

灵敏度是衡量毫米波辐射计的重要指标，由噪声起伏和增益起伏决定，噪声起伏和增益起伏在统计上可以认为是独立的。设由噪声起伏所引起的温度均方根测量的起伏为 ΔT_n ，对一次保持固定温度取样， n 为取样次数，当检波器后面有积分器时， n 可用 $B\tau$ 表示，理想低通滤波器的积分时间 τ 与某些专用积分器的时间常数 τ_c 来决定，由一般统计平均值公式可得：

$$\Delta T_n = \frac{T'_A + T_{sys}}{\sqrt{n}} = \frac{T'_A + T_{sys}}{\sqrt{B\tau}} \quad (2)$$

接收机增益受环境温度的影响较大，增益起伏 ΔG 引起的附加温度变化为：

$$\Delta T_G = (T'_A + T_{sys}) \frac{\Delta G}{G} \quad (3)$$

通常认为噪声起伏和增益起伏在统计上是独立的，毫米波辐射计的灵敏度定义如下：

$$\Delta T_{min} = [(\Delta T_n)^2 + (\Delta T_G)^2]^+ \quad (4)$$

综合以上两式可得毫米波全功率辐射计的灵敏度^[7-8]为：

$$\Delta T_{min} = (T'_A + T_{sys}) \left[\frac{1}{B\tau} + \left(\frac{\Delta G}{G} \right)^2 \right]^+ \quad (5)$$

由上式可知，全功率辐射计的灵敏度主要与系统的噪声特性、高频前端的等效噪声带宽、辐射计的积分时间以及增益起伏相关。

2 金属目标毫米波辐射特性与建模

使用微波辐射测量技术进行目标探测时，其基本的参数是天线温度对比度 ΔT_A ，这也是系统设计的主要依据。目前，大多数军事目标均为金属立体目标，在被动探测领域，金属目标的发射率近似为 0，相对于周围环境，它总可以被看作是“冷”的，通过毫米波辐射计根据此特性能有效识别金属目标。根据微波辐射测量的基本原理以及金属目标的辐射特性，先推导出金属平面目标的天线温度对比度表达式，再推广到金属立体目标。

2.1 金属平面目标辐射特性分析

建立如下图所示的数学模型，背景上有一块平面金属目标，辐射计从点 A 处观测目标，天线高度为 H ，观测角为 θ_F ，辐射计观测方向为 AM ，天线主波束的立体角为 Ω_M ，目标对天线的立体角为 Ω_T 。

用 $T_{APT}(\theta, \varphi)$ 表示目标的视在温度， $T_{APB}(\theta, \varphi)$ 为背景

的视在温度， $G(\theta, \varphi)$ 为天线增益。则天线温度对比度 $\Delta T_A(\theta_F)$ 可以表示为：

$$\Delta T_A(\theta_F) = \frac{1}{4\pi} \int_{\Omega_T} [T_{APT}(\theta, \varphi) - T_{APB}(\theta, \varphi)] G(\theta, \varphi) d\Omega \quad (3)$$

通常，毫米波辐射计采用旋转对称的天线波束，即 $G(\theta, \varphi) = G(\theta)$ 。在微波波段，地物和目标的辐射特性与 φ 无关，即 $T_{AP}(\theta, \varphi) = T_{AP}(\theta)$ ，当观测高度 H 很大时， Ω_T 很小，此时 $T_{APT}(\theta) = T_{APT}(\theta_T)$ ， $T_{APB}(\theta) = T_{APB}(\theta_T)$ ，均可视作常数， θ_T 是 AM 与地面垂直线的夹角， M 是目标的中心。在微波辐射测量中，天线主波束效率很高，旁瓣影响可以忽略，则 $G(\theta) = G_0 e^{-b\theta^2}$ ，对于特性不同的天线，选取不同的 b 值，为了保证天线的效率足够高， b 取值必须足够大。令 $\Delta T_{AP}(\theta_T) = T_{APT}(\theta_T) - T_{APB}(\theta_T)$ ，根据图 2，可得：

$$d\Omega = \frac{h}{(h^2 + x^2 + y^2)^{3/2}} dx dy \quad (7)$$

$$\theta = \cos^{-1} \frac{h \cos \theta_F + y \sin \theta_F}{(h^2 + x^2 + y^2)^{1/2}} \quad (8)$$

带入公式 (5) 可得天线温度对比度 $\Delta T_A(\theta_F)$ 。当观测高度 H 很大时，金属平面目标完全处于辐射计天线的主波束范围内，此时，目标对天线的张角 θ_T 较小，对于任意 $\theta \leq \theta_T$ ，有 $\sin \theta \simeq \theta$ ，故可将将天线温度对比度中的 $\sin \theta$ 用 θ 替代，则有：

$$\Delta T_A(\theta_F) = \Delta T_{AP}(\theta_F) \frac{1}{4\pi} \int_{\Omega_T} G_0 e^{-b\theta^2} \theta d\theta d\varphi \quad (9)$$

2.2 金属立体目标辐射特性分析

在毫米波段，由于金属目标的高反射率，使得金属立体目标在辐射计天线主波束范围内的亮度温度主要源自于该目标反射周围环境的辐射温度，环境的辐射温度主要由大气的辐射和背景的辐射温度组成。相较于金属平面目标，金属立体目标由于具有不同的几何结构，环境的辐射温度会在目标上以及目标和背景之间形成不同角度的反射甚至多次反射，最终进入辐射计的天线主波束范围。

要准确获取目标在天线主波束范围内的视在温度，则必须知道目标周围环境产生的辐射温度是通过何种传播路径进入辐射计天线主波束范围的。根据辐射温度在目标和背景间反射的次数，可将传播路径分为直接反射路径和二次反射路径两种。其中，由于环境产生的辐射温度的入射方向不同，直接反射路径又可划分为两种，一种是辐射经过目标或背景反射直接进入天线，另一种情况下，考虑到存在后向散射，当天线到物体的距离远大于辐射计天线的

口径时, 天线方向的辐射经过目标反射后原路返回进入天线。二次反射路径主要是大气辐射经过金属目标或周围背景反射后, 再次经过背景或者目标, 二次反射进入天线的主波束范围。

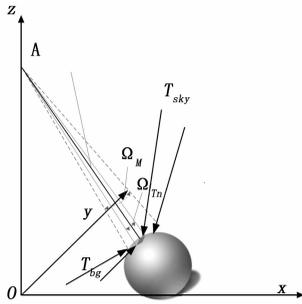


图 3 辐射计测量金属立体目标

在计算时, 通常将天线主波束范围内的金属立体目标表面细分为 n 多个细小的微元, 当微元的面积足够小时, 可视为在每个微元上只有一种反射路径, 每个微元反射的辐射温度决定了该微元贡献的亮度温度。每个微元反射的辐射路径不同, 每条路径的视在温度可以表示为:

$$T_{path}(\theta, \varphi) = (1 - \epsilon_g) T_{sky}(\theta, \varphi) + \epsilon_g T_{bg}(\theta, \varphi) \quad (10)$$

上式中 $T_{sky}(\theta, \varphi)$ 表示天空辐射温度, $T_{bg}(\theta, \varphi)$ 表示背景的辐射温度, ϵ_g 表示背景的发射率。将天线主波束内所有微元贡献的亮度温度加权平均即可得到目标的亮度温度^[9]:

$$T_A(\theta, \varphi) = \frac{1}{n} \sum_n T_{path}(\theta, \varphi) G(\theta, \varphi) \quad (11)$$

在探测过程中, 保持辐射计天线位于 A 点, 辐射计天线高度为 H , 则 A 点坐标为 $(0, 0, H)$ 。如图 4 所示, 对每个微元 O_i 反射来自 \vec{s} 方向的辐射, \vec{n} 为法线方向, 则辐射由反射方向 \vec{r} 进入辐射计天线。

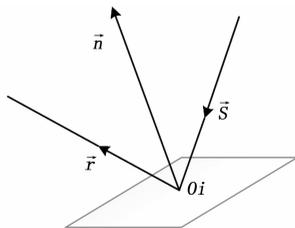


图 4 微元辐射路径示意图

设辐射计探测过程中微元 O_i 对应地面坐标 B 点 $(x_B, y_B, 0)$, 设微元中心点 O_i 的坐标为 (x_o, y_o, z_o) , 则 O_i 与 A 点和 B 点的坐标关系如下所示:

$$\frac{x_B - x_o}{x_o} = \frac{y_B - y_o}{y_o} = \frac{z_B - z_o}{z_o} \quad (12)$$

当大气辐射最终经过背景反射后被辐射计接收, 存在两种情况, 一是大气辐射直接经过背景反射然后进入天线; 二是大气辐射经过目标反射后再经过背景反射, 最后被辐射计接收。这种情况下, 用 θ_{bg} 来表示背景辐射源方向的俯角, 那么天空辐射源方向的仰角为 θ_{sky} , 此时 $\theta_{bg} = \theta_{sky}$, 值可用 $\arctan\left(\frac{y_B}{x_B}\right)$ 表示。当大气辐射最终经过目标反射后被辐射

计接收, 同样存在两种情况, 即直接由目标反射进入辐射计和经过背景反射后再经过目标反射最终被辐射计所接收。通常, 当 AB 连线与目标表面有 2 个交点, 即 AB 与立体目标表面不相切时, 2 个交点的其中一个为对应的微元的有效反射面元, 取 AB 与立体目标的第一个交点为有效面元中心点, 此时, O_i 点满足 $\min(AO_i)$ 。

根据数学关系, 微元单位法向量 \vec{n} 与其入射单位向量 \vec{s} 与反射单位向量 \vec{r} 满足的坐标关系如下:

$$\frac{s_x - r_x}{n_x} = \frac{s_y - r_y}{n_y} = \frac{s_z - r_z}{n_z} \quad (13)$$

微元单位法向量由目标表面结构所决定, 单位向量 \vec{r} 与直线 AB 平行, 由此可得 \vec{r} 的计算关系为:

$$\vec{r} = (r_x, r_y, r_z) = \frac{(-x_B, -y_B, H)}{\sqrt{x_B^2 + y_B^2 + H^2}} \quad (14)$$

根据向量 \vec{n} 与 \vec{r} 和公式 11 可求出入射单位向量, 其相应的辐射源方向俯仰角为 $\theta = \arcsin(s_y)$, 辐射路径可以根据俯仰角的值来判断: 当 θ 的值大于零时, 可认为辐射路径天空辐射经金属表面反射后进入辐射计天线主波束范围; 若 θ 的值小于零, 则认为辐射路径是天空辐射经过背景反射后由目标二次反射进入辐射计, 此时, 背景辐射源方向的俯角与天空辐射源方向仰角相同, 均为 θ 。由 θ_{bg} 、 θ_{sky} 和 θ 得到辐射路径的相应辐射源俯仰角度后, 根据相应的天空与背景辐射温度, 由公式 (8) 计算得到各条路径的视在温度, 最后通过公式 (9) 计算得到目标在该位置的视在温度 $T_A(\theta, \varphi)$ 。

3 实验结果与分析

实验以吸波材料为背景, 测量了金属球、金属柱、金属立方体表面固定点的视在温度。实验使用 3 mm 和 8 mm 两台辐射计, 极化方式采用垂直极化。实验环境为: 相对湿度 40%, 温度 18 °C, 辐射计测量高度 1.5 m。

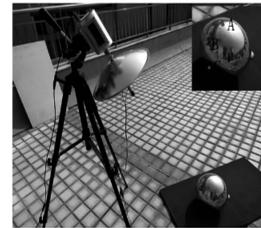


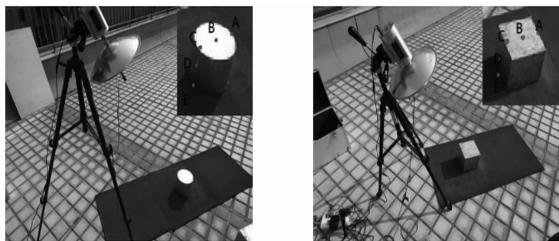
图 5 金属球测试场景图

图 5 为金属球测试场景图。吸波材料在 3 mm 波段和 8 mm 波段的视在温度分别为 281.40 K 和 294.78 K。实验结果如下, 视在温度单位为 K。

表 1 金属球的视在温度

金属球	3mm 视在温度	8mm 视在温度
吸波材料	281.40	294.78
A	201.90	130.05
B	244.30	249.23
C	265.50	290.90

首先研究金属球表面视在温度变化，金属球表面的视在温度由顶端至底部呈现递增状态，这是由于越靠近顶部，背景贡献的辐射温度越少，天空的贡献越多。在顶部 A 点，视在温度主要是反射来自大气的向下辐射温度，背景的贡献可以忽略不计，故 A 点的视在温度最低；视在温度最高的点是金属球和吸波材料的切点 C，其值接近吸波材料的视在温度，符合理论值。AB 两点的亮温差明显大于 BC 两点的亮温差，这说明由顶端至底部金属球表面点的亮度温度变化并不是均匀的，虽然亮度温度在递增，但是增长的速度却在衰减。



(a) 金属柱测试场景图 (b) 金属立方体测试场景图
图 6 金属柱和金属立方体测试现场图

上图为金属柱和立方体的测试场景图，实验数据如表 2 和表 3 所示。金属柱和金属立方体表面视在温度随着高度的上升而逐渐降低 (E→D→C)，与金属球相似。与金属球不同的是，金属柱和金属立方体的上表面为平面结构，在点 C→B→A 的变化过程中，视在温度先降低后升高，B 点为温度最低点，金属柱和金属立方体在 B 点处的视在温度近似相等。A 点的视在温度大于 C 点，这是由于 A 点处，天线波束范围内存在部分金属目标和背景，而在 C 点，波束范围内只有金属表面，背景的辐射温度要明显高于金属所反射的天空的辐射温度，符合理论。

表 2 金属柱的视在温度

金属柱	3mm 视在温度	8mm 视在温度
吸波材料	281.40	294.78
A	222.50	243.42
B	172.75	131.98
C	212.50	171.71
D	239.00	260.86
E	260.20	287.99

表 3 金属立方体的视在温度

金属立方体	3mm 视在温度	8mm 视在温度
吸波材料	281.40	294.78
A	234.55	237.61
B	167.45	126.17
C	207.20	165.90
D	244.30	272.49
E	265.50	288.96

金属球 A、B、C 三点处在一个球面，金属柱 C、D、E 三点处在一个弧面，而金属立方体 C、D、E 三点处在一个

平面，在 3 mm 波段，金属球 AB、金属柱和立方体 CD 两点之间视在温度差近似相等 (约 30 K)，金属球 BC、金属柱和立方体 DE 两点之间视在温度差近似相等 (约 30 K)，这表明在近距离探测中，3 mm 辐射计对金属立体形状的辨识度较差；在 8 mm 波段，金属球的 AB 两点视在温度差为 119 K，BC 两点为 40 K，金属柱 CD 两点温差为 90K，DE 两点温差为 30 K，金属立方体 CD 两点温差为 113 K，DE 两点温差为 16 K，根据视在温度的差异：平面对金属目标辐射特性影响最大，视在温度变化率较大，球面次之，弧面在 3 种结构中影响较小，8 mm 辐射计对不同形状的金属目标探测性能较好。

4 结束语

绝大部分现代化军事目标均为金属立体目标，因此研究金属立体目标的毫米波辐射特性具有很强的现实意义。本文研究了规则金属立体目标的毫米波辐射特性，使用微元法推导出金属目标在毫米波辐射计天线主波束范围内的视在温度。实验选取金属球、金属柱和金属立方体 3 种不同的金属目标表面具有代表性的点进行测量，并分析了造成各点视在温度差异的原因。实验结果表明：结构的不同影响金属立体目标的毫米波辐射特性，根据这种特性差异，使用毫米波辐射计可以对目标进行探测以区分不同目标，弥补了规则金属目标毫米波辐射特性数据的缺乏。未来，可对金属目标表面进行逐点采集温度，应用于规则金属目标的毫米波成像中，通过成像的方式进一步研究结构对金属目标毫米波辐射特性的影响。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 张光锋, 张祖荫, 郭伟. 3 mm 波段辐射成像研究 [J]. 红外与毫米波学报, 2005, 24 (6): 422-426.
- [3] 李贝贝, 张光锋, 娄国伟, 等. 基于毫米波辐射特性的水面植被检测方法 [J]. 计算机测量与控制, 2016, 24 (7): 45-48.
- [4] 齐学慧, 张光锋, 娄国伟, 等. 3 mm 与 8 mm 波段水面金属目标的辐射特性检测方法 [J]. 探测与控制学报, 2016, 38 (3): 9-12.
- [5] 陈曦, 曹东任, 吴礼, 等. 金属球毫米波辐射特性建模与分析 [J]. 光电工程, 2013, 40 (4): 31-37.
- [6] Ulaby F T, Moore R K, Fung A K. Microwave remote sensing: Active and passive [J]. Volume 1—Microwave remote sensing fundamentals and radiometry, 1981, 22 (5): 1223-1227.
- [7] 李兴国, 李跃华. 毫米波近感技术基础 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2009.
- [8] Zhang Guangfeng, Zhang Zuyin, Guo Wei. Research on antenna temperature contrast of metal solid objects [J]. International Journal of infrared and Millimeter waves, 2004, 25 (6): 929.
- [9] 刘静, 张光锋, 褚庆国, 等. 基于被动毫米波图像的金属目标特征提取方法 [J]. 计算机测量与控制, 2017, 25 (5): 169-172.