

典型地物的毫米波双极化辐射特性 测量技术研究

史 强, 张光锋, 李 珊, 张 琪

(南京理工大学 电子工程与光电技术学院, 南京 210094)

摘要: 针对典型地物目标的毫米波双极化辐射特性数据库不完善的问题, 对天空、水面和植被土地 3 种典型地物目标进行 8 mm 波段双极化辐射特性研究, 并对比水平和垂直方向的辐射温度, 分析它们的极化现象; 根据毫米波辐射测量的基本原理, 设计了 8 mm 波段双极化辐射计和定标源; 以典型地物背景的毫米波辐射特性为基础, 利用 8 mm 双通道辐射计对 3 种地物背景的辐射特性数据进行采集, 并进行处理与分析; 实验探究了不同地物背景的极化效应, 丰富了辐射特性数据库, 为典型地物目标成像和目标识别提供了有效的数据支持。

关键词: 双极化; 毫米波辐射计; 极化天线; 面目标

Study on Measurement Technology of Millimeter-wave Dual Polarized Radiation Characteristics of Typical Ground Objects

Shi Qiang, Zhang Guangfeng, Li Shan, Zhang Qi

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

Abstract: Aim at the incomplete database of millimeter-wave dual-polarization radiation characteristics of typical ground objects, the 8 mm-band dual-polarization radiation characteristics of three typical ground objects in the sky, water surface, and vegetation land were studied, and the horizontal and vertical radiation temperature were compared, analyze their polarization. Based on the basic principle of millimeter-wave radiation measurement, an 8 mm dual-polarization radiometer and a calibration source are designed. Based on the millimeter-wave radiation characteristics of typical feature backgrounds, the 8 mm dual-channel radiometer is used to radiate three types of feature backgrounds. Characteristic data were collected, processed and analyzed; experiments explored the polarization effects of different ground objects backgrounds, enriched the radiation characteristics database, and provided effective data support for typical ground object imaging and target recognition.

Keywords: dual polarization; millimeter wave radiometer; polarized antenna; face target

0 引言

黑体辐射理论阐明, 自然的物体会辐射电磁波, 且物体辐射特性也不相同。毫米波辐射计是高灵敏度噪声功率接收机, 可根据物体辐射特性的不同或检测的辐射信号强弱, 对目标进行探测识别, 并提供红外探测器无法获取的信息^[1-3]。由于自然界各类典型地物的表面及其内部结构不尽相同, 发射和反射电磁波的能力也有所不同, 对各类典型地物进行毫米波辐射特性分析与实验, 探究其极化效应, 将有助于毫米波目标探测的长足发展。

随着毫米波探测技术的不断发展, 越来越多的学者投入到该领域的研究中, 张英浩等设计了直检式 8 mm 波段双极化全功率辐射计, 在最小信噪比条件下, 该系统信噪比

比单通道辐射计输出的更强, 作用距离更大^[4]。李尊良等分析复相关器乘法器单元和正交模耦合器, 并对全极化毫米波辐射计的工作原理进行详细讲述^[5]。本文主要利用双极化毫米波辐射计系统对各种目标进行识别并研究物体的极化辐射信息。

1 毫米波辐射测量原理及定标方法

周围物体的电磁波可被毫米波辐射计接受。物体产生的辐射能量一方面可用辐射理论解释, 另一方面环境中的能量也来自物体反射、辐射或透射。物体的能量辐射由分子热运动引起, 其在各方向的极化都均匀^[6]; 物体产生的辐射能量不同, 这由其材质及结构特性决定。假设天线被面辐射包围, 接收天线模型如图 1 所示, $B_f(\theta, \varphi)$ 表示辐射源的谱亮度, 与天线之间的距离为 r , $F_n(\theta, \varphi)$ 表示天线的归一化功率增益方向图, A_r 为天线有效面积, 则用 $A_r F_n(\theta, \varphi)$ 表示天线的有效接收面积, (θ, φ) 表示辐射源方向, 则天线在有效接收面积范围内对元辐射面所张立体角可表示为:

$$d\Omega = \frac{A_r F_n(\theta, \varphi)}{r^2} \quad (1)$$

收稿日期: 2020-04-11; 修回日期: 2020-03-18。

基金项目: 国家自然科学基金(61371038)。

作者简介: 史 强(1995-), 男, 山西大同人, 硕士研究生, 主要从事毫米波目标辐射特性方向的研究。

通讯作者: 张光锋(1975-), 男, 河北石家庄人, 副研究员, 主要从事目标辐射特性与控制技术方向的研究。

则天线在有效接收面积范围内接收到的元辐射谱功率可表示为:

$$dP_f = B_f(\theta, \varphi) ds d\Omega_r = B_f(\theta, \varphi) ds \frac{A_r F_n(\theta, \varphi)}{r^2} \quad (2)$$

式中, ds 表示一个微元面积。

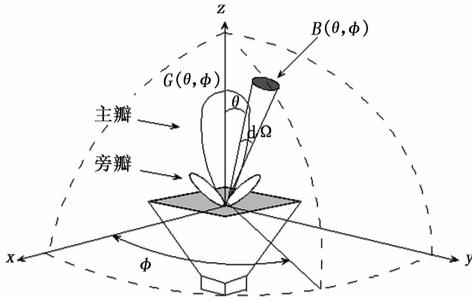


图1 天线—功率分析模型

由元辐射面对天线所张立体角 $d\Omega = \frac{ds}{r^2}$, 式(2)可写为:

$$dP_f = B_f(\theta, \varphi) A_r F_n(\theta, \varphi) d\Omega \quad (3)$$

式中, $d\Omega = \sin\theta d\theta d\varphi$ 。通常 $B_f(\theta, \varphi)$ 是无极化的, 但实际探测中辐射计使用的天线是有极化方向的, 所以能进入天线口径的只有入射能量的一半。由于毫米波辐射计天线和接收机都工作在较窄的频带, 即 $\Delta f \ll f^2$, 因此在 Δf 范围内, $B_f(\theta, \varphi)$ 的变化与频率无关, 根据相关理论, 则天线的接收功率可表示为:

$$P = \frac{1}{2} A_r \Delta f \iint_{4\pi} B_f(\theta, \varphi) F_n(\theta, \varphi) d\Omega \quad (4)$$

假设封闭面辐射源保持温度不变, 根据瑞利—金斯公式可得:

$$P_{\omega} = kT\Delta f \frac{A_r}{\lambda^2} \iint_{4\pi} F_n(\theta, \varphi) d\Omega \quad (5)$$

因为:

$$\Omega_p = \iint_{4\pi} F_n(\theta, \varphi) d\Omega \quad (6)$$

$$D_0 = \frac{4\pi}{\lambda^2} A_r = \frac{4\pi}{\Omega_p} \quad (7)$$

那么可以得到:

$$\Omega_p = \int_{4\pi} F_n(\theta, \varphi) d\Omega = \frac{\lambda^2}{A_r} \quad (8)$$

将式(8)代入(5)可得:

$$P_{\omega} = kT\Delta f \quad (9)$$

由此可知, 毫米波辐射计天线的接收功率与目标的热力学温度 T 呈线性关系, 因此在无源毫米波探测中, 天线所接收的功率可以通过被测目标的热力学温度表示出来。

由于物体的极化特性, 毫米波辐射计获得的能量极化特性来源于该极化辐射能量。电磁辐射的偏振可用斯托克斯参数描述^[7]。假设波沿 z 轴正方向传播, 传播在 xy 方向垂直的电场 E 的正交分量分别为 $E_x(t)$ 和 $E_y(t)$, 可用 $e_x(t)$ 和 $e_y(t)$ 表示电场振幅。根据斯托克斯参数内容, 4

个参数 $[I, Q, U, V]$ 可用下式进行计算^[8-9]:

$$\begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{bmatrix} = \frac{\lambda^2}{K_B \cdot \eta} \begin{bmatrix} \langle e_x(t)^2 \rangle + \langle e_y(t)^2 \rangle \\ \langle e_x(t)^2 \rangle - \langle e_y(t)^2 \rangle \\ 2\langle e_x(t) e_y(t) \cos\delta \rangle \\ 2\langle e_x(t) e_y(t) \sin\delta \rangle \end{bmatrix}$$

式中, λ 表示自由空间波长; η 表示特性阻抗; K_B 表示玻尔兹曼常数; δ 表示 $E_x(t)$ 和 $E_y(t)$ 相位差。

在探测目标之前, 毫米波辐射计都要进行定标, 从而获取毫米波辐射计的输出电压与天线温度的线性关系。定标方法有两种, 分布定标和整体定标。分布定标较为繁琐但精确度较高, 通常包括两个部分: 其一是对接收机定标, 获取输入端噪声温度 T'_A 与输出电压 V_{out} 之间的关系; 其二是对天线定标, 获取天线输出温度 T'_A 和天线接收温度 T_A 之间的关系, 那么有:

$$T'_A = \eta T_A + (1 - \eta) T_0 \quad (10)$$

式中, η 为天线的效率, T_0 为天线热力学温度。

根据 T'_A 与 T_A 之间的关系, 得到输出电压 V_{out} 和天线接收温度 T_A 的关系, 即定标方程。

整体定标较为简单便捷, 所以应用范围更广。通常将接收机和天线看为一个整体, 使用定标负载盒对高低温两点进行采样, 从而获取输出电压和天线温度之间的关系, 负载盒的结构如图2所示。

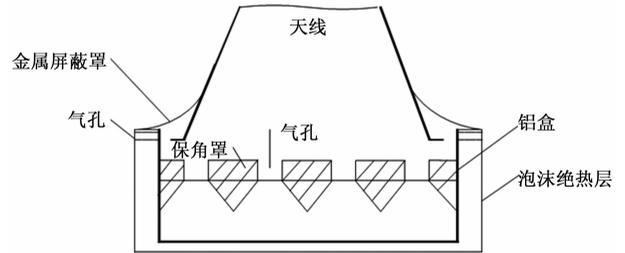


图2 整体定标负载盒

一般情况下, 高温参考点为室温, 记为 (T_h, V_h) ; 低温参考点为液氮, 记为 (T_l, V_l) , 则定标方程为:

$$T = \frac{T_h - T_l}{V_h - V_l} \cdot V + \frac{T_l \cdot V_h - T_h \cdot V_l}{V_h - V_l} \quad (11)$$

相较而言, 整体定标法的操作更为简便, 无需测量过多的参数, 由于实验室条件的各种限制, 本文的实验中均采用整体定标法确定定标方程。

为使实验结果更为可靠, 参照图2的负载盒制作了装载液氮的定标源装置, 使对低温点的采样更为准确。定标源分为上下两个部分, 外壁为金属材质, 内壁贴满吸波材料。上半部分是一个椎体, 便于将辐射计天线直接对准上方测试口, 下半部分装载液氮, 定标源表面金属反射了周围环境带来的亮温贡献, 使其对液氮的测量结果更为准确, 从而得到更加精确的定标方程, 使实验结果更具有可靠性。

2 双极化毫米波辐射计系统硬件设计

Ka 波段 (即 8 mm 波段) 毫米波辐射探测是一种典型

的被动遥感探测方式。目前, 国内外关于 Ka 波段毫米波辐射探测的研究主要涉及海洋、土壤、月壤等领域, 对于目标辐射特性的研究主要涉及草地、金属、水面等^[10]。而现有的星载、机载辐射计系统都是以单通道为主, 无法同时获取水平极化与垂直极化的测试数据, 需手动拆卸辐射计调整极化方向, 使试验繁琐复杂。基于此设计了基于无人机的目标 Ka 波段双极化辐射获取方法与装置。

Ka 波段双极化辐射计的系统参数如表 1 所示, 辐射信息获取可分为两路进行: 一路是进行 Ka 毫米波辐射计系统的水平极化辐射特性分析。一路是进行 Ka 毫米波辐射计系统的垂直极化辐射特性分析。两路的输出结果由无线传输系统传回软件控制端, 得到系统定标方程。通过反演运算得到目标材料的辐射特性。

表 1 8 mm 双通道辐射计系统参数

	垂直极化	水平极化
中心频率/GHz	35	35
波束宽度/°	1.5	1.5
带宽/GHz	2	2
低放增益/dB	35	35
混频器噪声系数/dB	4	4
积分时间/s	1	1
灵敏度/K	0.2	0.2

所述 Ka 波段双极化辐射获取方法与装置结构如图 3 所示, 采用弯波导连接两根透镜天线, 从而同时获取水平及垂直极化通道的天线温度。采用全功率直放式辐射计, 省去了传统狄克式辐射计中“DICKE 开关”等部件, 采用直放式接收模块, 不含有本振, 将射频低噪放大器与检波器安装在同一个腔体内, 使结构简单、紧凑、体积小, 总质量小于 2 kg, 易于实现无人机载。与采用单极化天线的传统辐射计相比, 该系统体积小、质量轻, 无需手动拆卸辐射计, 旋转天线便可以获取双极化辐射信息, 操作简便, 具有良好的平台适应性

数据处理部分包括数据采集和处理电路、数据显示电路, 主要由 AD 转换、运算控制器及加减法器构成, 结构简单。分离后的极化分量都以模拟信号输出, 信号处理器则利用 AD 转换将模拟信号转变为数字信号, 最后通过运算控制器的功能实现运算, 以上电路的功能就是对目标材料的毫米波 Ka 波段辐射特性进行综合判别。

3 实验结果与分析

对天空、水面、植被土地使用双极化辐射计进行数据采集实验。实验环境指标为: 温度 25 °C, 天气阴, 相对湿度为 48%, 气压为 1 025 hPa 近似为标准大气压。实验使用 8 mm 双通道辐射计, 指标如表 1 所示, 辐射计距地面高度为 1.2 m。实验前进行整体定标, 将天线口分别对准装载液氮的特制定标装置, 进行低温定标; 将天线口对准吸波材料进行高温定标, 从而获得 8 mm 双通道辐射计的定标方程。

图 4 为双极化辐射计数据采集场景图, 操作时, 首先将入射角调至 0°, 再缓慢转动辐射计, 逐渐改变其对所测目标的入射角, 平均每 5°记录一次双极化辐射波数据, 直至转动至 90°, 停止数据记录, 最后通过定标方程计算出亮度温度, 并将所得数据绘制成曲线。



图 4 辐射数据采集场景图

图 5 为天空辐射温度随顶角变化示意图, 根据分析可知: 天空的亮度温度在水平极化与垂直极化的条件下差值微乎其微, 即天空的亮度温度与极化方式无关; 当辐射计与天空顶角夹角为 0°时, 所测的温度最低; 随着天空顶角夹角增大, 天空辐射温度也越来越高; 当天空顶角夹角大于 80°时, 辐射计受环境因素干扰, 实验数据存在较大误差; 随着入射角度的增加, 在不同极化条件下天空亮度温度的变化速率都逐步增加, 与仿真模型较为吻合。

图 6 是水面辐射温度随天空顶角变化示意图, 从图中可以看出, 在 8 mm 波段, 水面的辐射温度在水平极化与垂直极化的条件下差值明显, 即存在极化效应; 当辐射计处于水平极化条件下, 水面的辐射温度随着入射角度的增加而增大; 当辐射计处于垂直极化条件下, 水面的辐射温度随着入射角度的增加先缓慢减小后增大; 在同样的入射角度, 水面的辐射温度在垂直极化条件下所测量的数据均高于在水平极化条件下所测量的数据。在入射角度取 50°, 两者出现最大差值, 约为 80 K, 此时入射角度即为布儒斯特角。由于水面底层分布泥块和碎石, 对测试结果产生些

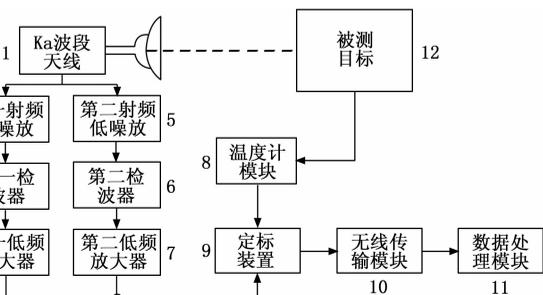


图 3 双极化毫米波辐射计系统框图

检波器检出包络信号; 低频放大器采用交流和直流两种模式, 可以根据要求辐射特性测试进行切换; 温度计模块用来采集被测目标材料的温度; 定标装置把电压信号化为温度信号; 无线传输模块将测试数据传送至软件控制端;

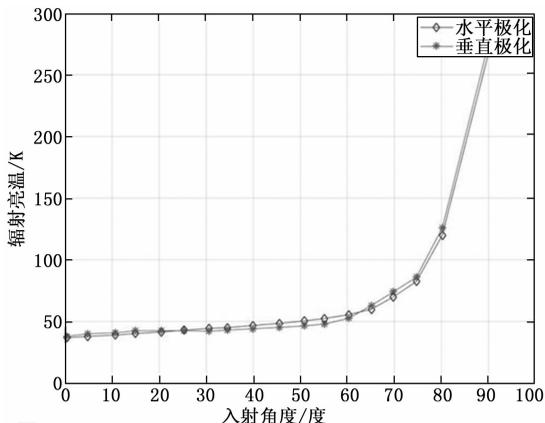


图 5 天空辐射温度随天空顶角变化示意图

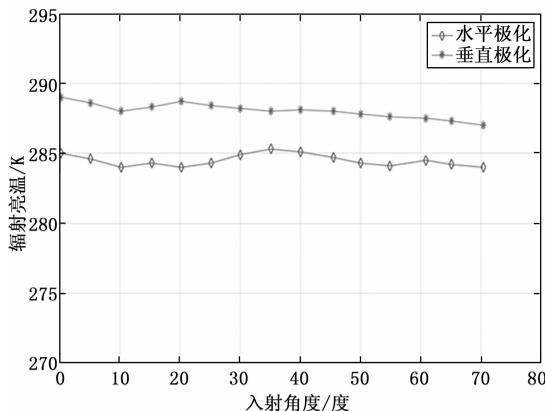


图 7 植被土地辐射温度随天空顶角变化示意图

许影响，使实际测量值与理论值存在相应误差。

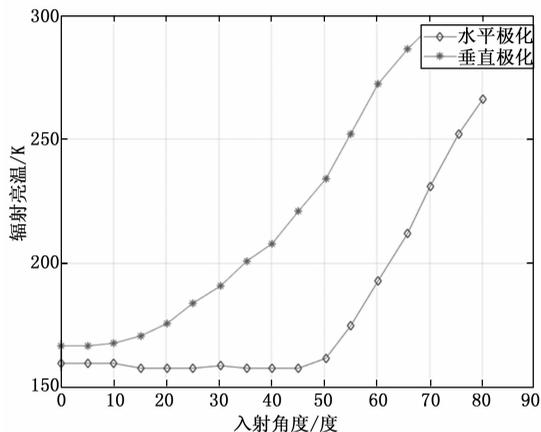


图 6 水面辐射温度随天空顶角变化示意图

植被层可视为弱散射媒质层，即在计算植被层表面的辐射温度时可忽略植被层内部的散射现象。植被层的辐射温度主要来自其自身对电磁波的吸收与反射，与植被层厚度、观测频率及入射角度息息相关。Ulaby 等人通过大量实验发现：当观测频率小于 10 GHz 时（尤其是低于 5 GHz），土壤层对植被土地的辐射温度贡献较大，需要考虑双层介质模型对其辐射温度的影响；当观测频率大于 10 GHz 时，土壤层对植被土地的辐射温度贡献较小，可以忽略不记。实验使用 8 mm 波段辐射计，其中心频率为 35 GHz，故只需考虑表面植被层对植被土地辐射温度的影响。

图 7 是植被土地辐射温度随天空顶角变化示意图，结合图中数据可知，植被土地的亮度温度在水平极化与垂直极化的条件下差值不大，不具有明显的极化效应。Peake 和 Oliver 等人使用中心频率为 10 GHz 的辐射计测试了近 14 种不同的植被土地（包括小麦、土豆等）在不同生长时期的辐射特征信息，实验结果与本次实验基本相似：植被土地不具有明显的极化效应，但在垂直极化条件下所测的辐射温度值略高于水平极化下的测试数据，其辐射温度与观测角度近似无关。

4 结束语

本文探究了一些典型地物背景（包括天空、水面、植被土地）的辐射特征信息，分析了其极化现象。地物背景的自身结构与组成相对复杂，影响其相对介电常数的因素较多，故其吸收与反射的电磁波也存在差异，通常情况下，典型地物背景的辐射温度均远高于天空的亮度温度。由于周边环境的物体及实验测试的面目标均为实际目标，实际情况较为复杂如目标有一定的起伏，会产生测试差异，对实验结果产生一定的影响，未来的实验中需要将这些情况尽可能地考虑到，达到优化实验的目的。

参考文献：

- [1] K. J. 巴顿, J. C. 威尔茨. 毫米波系统 [M]. 方再根, 等译. 北京: 国防工业出版社, 1989.
- [2] 向敬成. 毫米波雷达及其应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.
- [3] 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.
- [4] 张英浩. 毫米波被动双极化探测及相控阵扫描关键技术研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2011.
- [5] 李尊良. 全极化毫米波辐射计关键技术研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2013.
- [6] David A. Wikner, and Greg Samples. Polarimetric passive millimeter-wave sensing [J]. SPIE Proceedings: Passive Millimeter-Wave Imaging Technology V. 2001, 86-93.
- [7] Neil A. Salmon, Roger Appleby and Peter Coward. Polarimetric passive millimeter wave imaging [J]. Proceedings of SPIE. 2001 (4373): 82-85.
- [8] Aleksandar Duri and Andreas Magun. SPIRA—A Scanning Polarimetric Imaging Radiometer In W-Band [J]. Institute of Applied Physics, 2011, 23-26.
- [9] Yayun, Cheng Fei, Hu Liangqi Gui, Liang Wu, and Liang Lang. Polarization-Based Method for Object Surface Orientation Information in Passive Millimeter-Wave Imaging [J]. IEEE, 2015 (8): 655-667.
- [10] 桂良启, 张祖荫, 郭伟. 毫米波段典型目标辐射特性地研究 [A]. 全国微波毫米波会议论文集 [C]. 2006.