

## 3 mm 与 8 mm 辐射计探测特性的分析

王贺涛 李 静

(西安工业大学电子信息工程学院 西安 710021)

**摘要:**为了测试毫米波探测器在实际工作状态中的性能和分析其对目标输出信号的特性,研究了毫米波辐射计的工作原理及输出信号表达式,并推导建立了探测器输出信号的数学理论模型。通过在野外进行模拟实验,获取半实物仿真的数据,研究辐射计输出信号的特性。不考虑大气损耗及天线旁瓣的作用,推导出 3 mm 和 8 mm 辐射计探测水泥路面时的天线温度对比度以及最大探测距离,并通过得到的实验数据分析对比两者的性能,为辐射计的选型提供依据。

**关键词:**无源探测; 天线温度对比度; 最大探测距离

**中图分类号:** TN850.7    **文献标识码:** A    **国家标准学科分类代码:** 510.40

## Analysis of 3 mm and 8 mm radiometer detection characteristics

Wang Hetao Li Jing

(Institute of Electronic Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710021, China)

**Abstract:** In order to test the performance of millimeter wave detector in the actual working status and analysis of it on the target characteristics of the output signal, this paper studies the working principle of millimeter wave radiometer and output signal expression. The characteristics of the radiometer output signal are studied by simulating experiment in the field and obtaining the data of semi-physical simulation. Without considering atmospheric loss and the effect of antenna sidelobe, 3 mm is deduced and 8 mm radiometer antenna temperature contrast in detecting cement road surface and the maximum detection range, and through the analysis of the experimental data are compared both performance, provide the basis for selection of radiometer.

**Keywords:** passive detection; contrast of antenna temperature; maximum detection distance

## 0 引言

毫米波辐射计因其独特的优势得到广泛的使用。它不仅可以在所有的工作时间上都接收毫米波信号,而且能够分析辐射计的输出信号。并且它的构造简单、抗干扰能力强、隐蔽性好,因而在军事、农业、环境监测等各方面具有很大的使用价值。本文基于其工作原理,在野外进行模拟实验,得到毫米波辐射计的输出信号波形,根据信号波形对辐射计无源探测特性进行研究,分析对比两种辐射计的性能。

## 1 无源探测水泥路面的原理

毫米波辐射计实际上是一种接收机,与其它的接收机不一样,只用来接收信号<sup>[1]</sup>。本文的辐射计选用全功率型辐射计,它的结构较简单,最大特点是加了一个隔直电容

容,其目的是隔断本机噪声的直流分量,最大限度的减少对毫米波信号的干扰<sup>[2]</sup>。天线波束在高空中匀速旋转,扫描地面背景中的水泥路面目标接收到的毫米波信号依次通过辐射计的各个模块,输出含有目标信息的信号。辐射计的原理框图如图 1 所示。

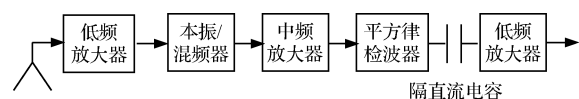


图 1 交流全功率辐射计原理框图

根据辐射计的工作原理,设计模拟实验。设有一位于草地中间的水泥路面,长度为 2 000 m,宽度为 50 m。现将辐射计斜挂在降落伞上,从距离水泥路面高度为  $h$  的地方旋转下降,并且是匀速下降。基于辐射计的工作模式,令下落速度  $v=100$  m/s,保证其匀速下落,旋转速度  $\omega=$

3 圈/s。天线波束倾角为 25°。天线正下方为坐标原点,草地中间的水泥路面在  $xy$  平面上。辐射计随降落伞匀速旋转下落时,天线主波束开始扫描水泥路面与草地,在地面形成椭圆投影<sup>[3]</sup>。

设天线增益为  $G(\theta, \varphi)$ ,地面亮度温度分布为  $T_B(\theta, \varphi)$ ,天线从水泥路面接收的总功率为<sup>[4]</sup>(忽略大气损耗及天线旁瓣的作用):

$$W_r = \frac{k\Delta f}{4\pi} \int_{4\pi} T_B(\theta, \varphi) G(\theta, \varphi) d\Omega \quad (1)$$

整理得天线温度为:

$$T_A(\theta_F) = \iint_{4\pi} \frac{1}{4\pi} T_B(\theta, \varphi) G(\theta, \varphi) d\Omega \quad (2)$$

实验过程中,综合各方面的影响,使用方向图旋转对称的天线,得到  $G(\theta, \varphi) = G(\theta)$ ,则上式只需要在主波束  $\Omega_m$  内积分<sup>[5]</sup>。

$$T_A(\theta_F) = \iint_{\Omega_m} \frac{1}{4\pi} T_B(\theta, \varphi) G(\theta, \varphi) d\Omega \quad (3)$$

$xoy$  内的椭圆投影为天线主波束在水泥路面的投影,如图 2 所示。

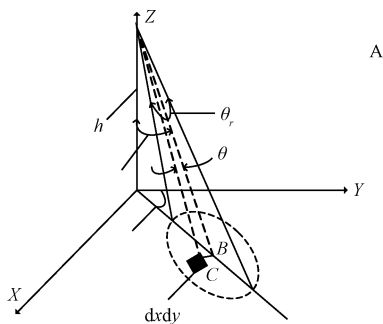


图 2 输出信号计算方法示意图

本文采用微分法计算天线温度表达式,令水泥路面的微分单元为  $dxdy$ ,那么微分单元在天线方向上的投影面积为  $\frac{h}{\sqrt{(x^2 + y^2 + h^2)}} dxdy$ 。 $\theta$  为  $AC$  与  $AB$  的夹角,以天线波束中心投影为原点,投影面积对应于天线的微分立体角为<sup>[6]</sup>:

$$d\Omega = \frac{dxdy \cdot \cos\theta_F}{r^2} = \frac{dxdy \cdot h}{r^3} \quad (4)$$

式中:  $AC = r = \sqrt{(x^2 + y^2 + h^2)}$ ,  $\cos\theta_F = \frac{h}{r}$ ,  $B$  点的坐标为  $B(x_B, y_B)$ ,  $C$  点的坐标为  $C(x, y)$ , 因为  $x_B = h \sin\theta_R \tan\theta_F$ ,  $y_B = h \cos\theta_R \tan\theta_F$ , 所以

$$BC = \sqrt{((x - h \sin\theta_R \tan\theta_F)^2 + (y - h \cos\theta_R \tan\theta_F)^2)}$$

因为  $AB = h \sec\theta_F$ , 所以

$$\cos\theta = \frac{AC^2 + AB^2 - BC^2}{2AB \cdot AC} = \frac{h \cos\theta_F + \sin\theta_F (x \sin\theta_R + y \cos\theta_R)}{\sqrt{(x^2 + y^2 + h^2)}}$$

为了计算方便,本文选用方向图旋转对称的天线。增益的表达式为<sup>[7]</sup>:

$$G(\theta, \varphi) = G_0 e^{-b\theta^2} \quad (5)$$

式中:  $G_0$ : 天线波束中心的功率增益,  $b$ : 表征天线方向图的常数,  $\theta$ : 3 dB 波束带宽的一半。

整理得:

$$T_A = \frac{T_S(\theta_F) \cdot G_0 \cdot h}{4\pi}$$

$$\iint_S \frac{\exp\left\{-b \left[\cos^{-1} \frac{h \cos\theta_F + \sin\theta_F (x \sin\theta_R + y \cos\theta_R)}{\sqrt{(x^2 + y^2 + h^2)}}\right]\right\}}{\sqrt{(x^2 + y^2 + h^2)^3}} dxdy \quad (6)$$

式(6)为天线温度表达式,该式具有通用性,  $S$  为天线主波束在地面的椭圆投影。其形式上为二重积分,积分区域对应于椭圆目标。考虑到天线扫描的原理,要使水泥路面处在天线波束扫描的最佳位置。该公式既能计算波束中心在水泥路面中心,也能计算其不在目标中心<sup>[8]</sup>。

## 2 3 mm、8 mm 波段下的天线、地物和辐射计特性

两种辐射计在不同条件下有不同的特性,本文实验是在某一特定的条件下进行,为了分析对比两种辐射计的特性,天线口径都选择 360 mm。本文实验主要由天线的主波束扫描水泥路面与草地来完成,测得主波束的宽度分别为 1.5° 和 4°。

为了保证实验的可靠性,需要得到大量、充分的实验数据。野外实验过程中,采用两种不同波段的辐射计测量草地和水泥路面的相关数据,测量的草地和水泥路面的亮度温度。如表 1 所示。

表 1 3 mm、8 mm 波段下的地物亮温

	草地/k	水泥/k
3 mm 辐射计	298.12	280.31
8 mm 辐射计	275	252

辐射计的灵敏度与噪声起伏和增益起伏有关,实验过程中,综合考虑各方面的因素,需要改变辐射计的积分时间。当积分时间为 15 ms 时,辐射计能更好的接收目标信号,对应的灵敏度分别为 1.6 k 和 0.4 k<sup>[9]</sup>。

## 3 天线温度对比度 $\Delta T_A$ 和最远探测距离的计算

当天线波束中心对准水泥路面中心时,天线温度变化量  $\Delta T_A$  可以表示为<sup>[10]</sup>:

$$\Delta T_A = \Delta T_T \left[ 1 - \exp(-bA_T/\pi R^2) \right]$$

式中:  $\Delta T_T$  为水泥路面与草地之间的温度对比度,  $A_T$  为水泥路面等效辐射面积,  $b$  为天线方向图系数,  $R$  为辐射计的探测距离。

将参数代入下式,得:

$$\frac{S}{N} = \frac{\Delta T_a}{\Delta T_{\min}} = \frac{\Delta T_T [1 - \exp(-bA_T/\pi R^2)]}{\Delta T_{\min}}$$

可以得到辐射计的最大探测距离为<sup>[11]</sup>:

$$R_{\max} = \left( \frac{-bA_T}{\pi \ln(1 - \Delta T_{\min} / \Delta T_T)} \right)^{\pm} = \left( \frac{-bA_T}{\pi \ln(1 - F_m T_0 / \Delta T_T \sqrt{B_T})} \right)^{\pm}$$

根据上述的推导过程,将地物亮温  $T_s(\theta_F)$  和天线特性  $G_0, b$  代入公式,因为天线在不同位置有不同的温度,通过计算,可以得出天线在随降落伞匀速旋转过程中不同的天线温度  $T_A(\theta_F)$ ,得到天线温度对比度  $\Delta T_A(\theta_F)$ 。野外实验数据获取时,需要对辐射计天线在不同位置进行采样,记录 100 个数值。同时要求记录第 50 个数值的的时间,波束中心、目标中心在一条线上<sup>[12]</sup>。通过以上的计算和分析得出:毫米波探测器天线温度对比度随着探测高度  $h$  的增加而减小。当  $\Delta T_A(\theta_F) \leq \Delta T_{\min}$  时,天线温度对比度将被辐射计的本机噪声淹没,从而无法检测到  $\Delta T_A(\theta_F)$ 。为保证检测的可靠性以及实验的顺利进行,一般要求  $\Delta T_A(\theta_F) \geq 6\Delta T_{\min}$ <sup>[13]</sup>。综合上述分析,对信号波形进行仿真,得到两种辐射计扫描水泥路面的  $\Delta T_A(\theta_F)$  曲线和有效探测距离,为分析辐射计接收的信号波形提供依据,如图 3(a)、(b) 所示。

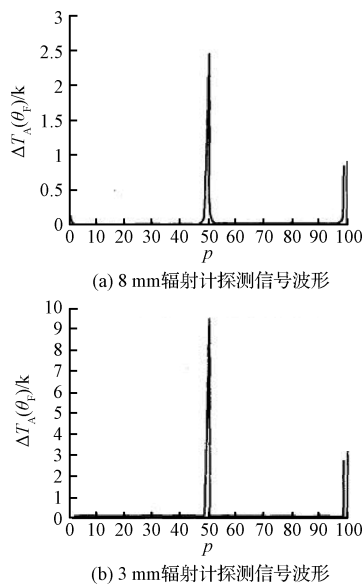


图 3 8 mm、3 mm 辐射计探测信号波形

由上图可知,降落伞在高度  $h=8\ 500\ \text{m}$  开始旋转下落时,3 mm 辐射计随降落伞下降,同时天线波束旋转扫描水泥路面,测得的  $\Delta T_A=9.512\ 3\ \text{k}$ ;降落伞在高度  $h=12\ 000\ \text{m}$  开始旋转下落时,同理得到 8 mm 辐射计的  $\Delta T_A=2.396\ 5\ \text{k}$ 。通过本次实验的分析对比可知,在天线口径都为 360 mm 的情况下,3 mm、8 mm 辐射计的最远探测距离分别为 8 500 m 和 12 000 m。为了深入研究辐射计的特性,保持其他条件不变,只减小辐射计的天线口径,令其都变为 100 mm,此时天线波束扫描到的水泥路面减小,两种辐射计的最远探测距离都不同程度的减小,总的来说,8 mm 波段辐射计的有效探测距离更好。分析结

果如表 2 所示。

表 2 不同口径天线的辐射计最远探测距离

天线口径/mm	辐射计波段/mm	最远探测距离/m
360	3	8 500
360	8	12 000
100	3	2 400
100	8	4 600

#### 4 结 论

本次实验是在特定工作环境下进行,首先在野外获取实验数据,其次对获取的实验数据处理,并且根据实验数据推理出最远探测距离的表达式,最后仿真辐射计输出的毫米波信号,得到上述的信号波形图。随着技术的发展,辐射计的灵敏度会进一步的提高,但在现有技术条件下,受某些因素的影响,8 mm 辐射计的灵敏度较高;在同一天线口径下,8 mm 辐射计的实际探测效果较好。如果保持其他条件不变,只减小辐射计的天线口径,天线波束扫描到的水泥路面将会减少,故两种辐射计的探测效果会受到不同程度的影响。辐射计的最远探测距离随着天线口径的减小而减小。通过以上的分析对比,对毫米波辐射计的特性有了深入的了解,这些特性为辐射计的选择提供了重要的根据。

#### 参 考 文 献

- [1] 冯建利,赵裔昌,张效民. 毫米波被动探测信号的熵特征研究[J]. 计算机测量与控制, 2016, 24(1): 223-225.
- [2] HOEFLE M, PENIRSCHKE A, COJOCARI O, et al. Advanced RF characterization of new planar high sensitive zero-bias Schottky diodes[C]. Microwave Integrated Circuits Conference, 2011: 89-92.
- [3] 王本庆,李兴国. 近程毫米波合成孔径辐射计成像算法[J]. 电子学报, 2009, 37(6): 1353-1356.
- [4] 宋建军,童力,陈旭锋. 利用毫米波辐射计探测金属目标的研究[J]. 现代电子技术, 2010, 33(19): 47-49, 53.
- [5] 马国君,聂建英. 毫米波辐射计线性回归定标方法研究[J]. 火箭与制导学报, 2010, 30(2): 243-245, 252.
- [6] 邢业新,娄国伟,李兴国. 毫米波辐射计在探测空中涂层隐身目标中的应用研究[J]. 红外技术, 2010, 32(12): 727-730.
- [7] 张跃东,江月松,何云涛,等. 基于电光调制的毫米波辐射计研究[J]. 光电子·激光, 2011, 22(7): 1018-1021.
- [8] ALUIGI L, ALIMENTI F, ROSELLI L. Fullyintegrated millimeter-waveradiometers: Development level and perspectives[C]. 2010 IEEE Radio and Wireless Symposium, 2010: 1-4.
- [9] 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.
- [10] 王桂丽, 李兴国. 毫米波交流辐射计成像研究[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(5):1089-1093.
- [11] 冷朋, 赵浩. 微波功率测量中的小信号检测[J]. 国外电子测量技术, 2017, 36(3):67-69.
- [12] 王琦. 射频与微波开关系统的设计与应用[J]. 国外电子测量技术, 2015, 34(5):12-14.
- [13] 刘虎, 赵建洋, 周蕾. 基于斩波时域积分射频导纳物位

仪研究与设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(9):1005-1012.

#### 作者简介

王贺涛, 1991年出生, 工学硕士, 主要研究方向为仪器与测量技术、图像处理与识别等。  
E-mail: 960812950@qq.com

## 《2018 NI 趋势展望报告》与您一起探索驱动未来加速到来的力量

NI 提供了对机器学习、物联网(IoT)、5G 以及车辆电气化等领域主流趋势的见解

2017年10月26日, NI(美国国家仪器公司, National Instruments, 简称NI)作为致力于为工程师和科学家提供基于平台的系统解决方案来应对全球最严峻工程挑战的供应商, 今日发布了《2018 NI 趋势展望报告》, 探讨技术的进步正以前所未有的速度推动我们奔向未来, 预言2018年工程师将面临的重大挑战。

“迈入21世纪, 我们的客户不断要求更高质量的设备、更快速的测试、更可靠的网络以及近乎实时的计算来帮助企业持续向前发展。”NI 企业营销副总裁 Shelley Gretlein 表示: “NI 不仅探索影响行业未来的趋势帮助客户与时俱进, 并基于以软件为中心的开放平台提供可行的洞察和建议, 帮助客户加速自定义测试、测量和控制系统的开发。”

《2018 NI 趋势展望报告》探讨了以下主题:

1) **机器学习让数据为您工作**-智能系统会产生数据并依赖于数据, 数据量的不断增加加剧了对大模拟数据(Big Analog Data™)的挑战。了解机器学习如何帮助工程师解决面对面的问题, 专注于探索和应对下一个重大挑战。

2) **5G 将颠覆测试过程**-5G 创新不止于设计。测试和测量解决方案将成为产品商业化周期中的关键环节, 但是5G 需要的测试方法与之前的无线技术截然不同。了解哪

些技术正在让5G 逐步变成现实。

3) **IIoT 的3大准则**-工业物联网(IIoT)中智能设备和互联设备的数量快速增加, 为提高性能和降低成本提供了巨大的机会, 但一个被忽视的挑战是如何高效地管理这些分布式系统。查看成功管理IIoT 设备的3大准则。

4) **电气化的影响**-汽车电气化趋势不只是全球从内燃机汽车和混合动力汽车向全电动汽车的转变。除了车辆本身日益复杂的影响, 还需要考虑对支持基础设施提出的新要求。

5) **打破摩尔定律**-尽管最近关于摩尔定律消亡的言论很多, 实际情况与摩尔定律也有所偏差, 但数十年的创新基本上还是一直遵循着摩尔定律。但现在, 这个经过50多年验证的定律再次面临挑战。了解这一现状如何影响半导体市场的未来发展。

访问 [www.ni.com/trend-watch](http://www.ni.com/trend-watch), 查看完整的报告。

Big Analog Data、National Instruments、NI 和 ni.com 均为美国国家仪器有限公司(National Instruments)的商标。此处提及的其它产品和公司名称均为其各自公司的商标或商业名称。