

文章编号:1001-9014(2007)02-0129-04

3mm 波段辐射计特性参数的测试

彭树生¹, 吴礼¹, 殷兴辉², 徐之材²

(1. 南京理工大学 电子系统系, 江苏 南京 210094; 2. 南京紫金山天文台, 江苏 南京 210008)

摘要:对新设计的一种 3mm 波段辐射计的特性参数进行了测量, 辐射计的特性参数包括灵敏度、测温范围以及辐射计中参考负载和定标黑体的辐射温度修正量。由于受国内 3mm 波段技术的限制, 给 3mm 波段辐射计的设计和测量带来很大的困难。本文采样口面定标方法, 在实验室确定了新设计的 3mm 波段辐射计的特性参数, 以保证它的实际使用意义。

关键词: 3mm 波段; 辐射计; 特性参数; 口面定标

中图分类号: TP732.1 **文献标识码:** A

CHARACTERISTIC PARAMETERS MEASUREMENT OF A 3mm BAND RADIOMETER

PENG Shu-Sheng¹, WU Li¹, YIN Xing-Hui², XU Zhi-Cai²

(1. Elec. Sys. Depart., Nanjing Univ. of Sci. & Techn., Nanjing 210094, China;

2. Nanjing Purple Mountain Observatory, Nanjing 210008, China)

Abstract: The characteristic parameters, such as calibration sensitivity, dynamic range, modified quantity of radiating temperatures of radiometer's reference load and calibration blackbody of a new 3mm band radiometer, were measured. Due to the restriction of 3mm band technology in our country, there are many difficulties for designing and measuring a 3mm band radiometer. In this study, an aperture calibration technology was adopted to measure these characteristic parameters of this 3mm band radiometer by experiments.

Key words: 3mm band; radiometer; characteristic parameter; aperture calibration

引言

毫米波是指频率在 30GHz ~ 300GHz 的电磁波, 它与微波几乎具有同样悠久的历史。但是, 在微波技术蓬勃发展的时期, 由于毫米波的大气传播损耗较大和关键器件的发展缓慢, 导致毫米波技术的应用远不如微波那样广泛。从 20 世纪 80 年代开始, 世界各个主要发达国家加大对工作于毫米波段武器系统研发, 特别是进入 90 年代以来, 随着科学技术的发展, 毫米波器件的许多关键技术得到突破或解决, 尤其是大功率相干辐射源、高稳定固态源、传输媒介以及以它们为基础的毫米波单片电路的研发与应用, 带动了整个毫米波领域的高速发展, 使得它在通信、遥感、雷达与制导等领域取得了广泛的应用。在以各种战术、战略制导武器为主体的新武器技术革命中, 军事电子学的重点将转移到毫米波

频段, 可以预见, 毫米波技术将以持续稳定、甚至相当高的速度向前发展, 特别是向高频段的毫米波发展^[1,2]。

在现代战争中, 为了对抗各种主动、被动式以及主被动复合式毫米波制导武器, 释放烟幕是一种技术难度不大而且经济性好的有效方法。对于主动式毫米波探测设备, 烟幕对毫米波的衰减(插入损耗)降低了接收机接收信号的强度, 导致探测设备难以从回波中检测到目标; 而对基于目标辐射特性的被动式毫米波探测设备, 烟幕本身的辐射特性掩盖了真实目标的辐射特性, 而造成了“假像”。所以, 烟幕这两个方面的作用都能够达到隐蔽目标、保护目标的目的。为了研究烟幕在 3mm 波段的辐射特性, 我们研制了 3mm 波段辐射计。本文在描述 3mm 波段辐射计的基础上, 研究此辐射计的特性参数测量, 以确保它的使用价值。

1 辐射计系统

由于 3mm 波段器件的特殊性,在 3mm 波段辐射计设计时采用改进型的 Dicke 辐射计,如图 1 所示.设计中采用斩波轮作为 3mm 波段的 Dicke 开关,采用一高温毫米波“黑体”作为 Dicke 型辐射计的参考负载,构成图 1 所示的改进型 Dicke 型辐射计.高温毫米波黑体是放在温度均匀的恒温箱中的毫米波辐射源,它的物理温度 T_H 由经过国家级计量局标定的高精度的电子温度计实时测量,它的辐射信号由斩波轮调制通过接收天线输入接收机,作为辐射计接收机的参考信号.辐射计的接收天线采用具有良好特性的多模喇叭^[3],接收机的输出电压与输入天线温度 T_A 的关系为^[4]

$$V_A = G_0(T_A - T_H^*) \quad (1)$$

式(1)中, V_A 为辐射计接收机的输出电压, T_H^* 为高温参考负载的辐射温度, G_0 为接收机的功率增益.

辐射计接收机被放置在恒温箱中,包括一室温的定标毫米波黑体,和定标用的挡板及其伺服机构.辐射计的输出电压输入到外置的 PC104 嵌入系统,同时正式测试的过程也由 PC104 嵌入系统控制,实现智能化测量^[5].

天线温度 T_A 的反演通过机箱内的室温定标黑体口面定标得到,反演公式为^[6]

$$T_A = \frac{V_A(T_0^* - T_H^*)}{V_0} + T_H^* \quad (2)$$

式(2)中 V_A 和 V_0 分别是观测和机箱内定标时的输出电压; T_0^* 和 T_H^* 分别为机箱内的室温定标黑体和高温参考负载的辐射温度,它们与物理温度的关系分别为

$$\begin{cases} T_0^* = T_0 + \Delta T_0^* \\ T_H^* = T_H + \Delta T_H^* \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中 T_0 和 T_H 分别为机箱内的室温定标黑体(图 1 中用 T_0 表示)和高温参考负载(图 1 中用 T_H 表示)的物理温度,物理温度由计量过的电子温度计测定. ΔT_0^* 和 ΔT_H^* 分别为机箱内的室温定标黑体和高温

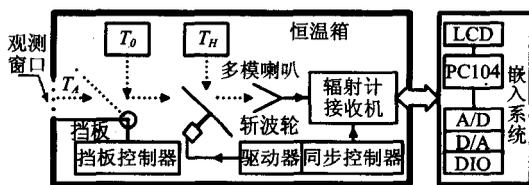


图 1 3mm 波段辐射计
Fig.1 3mm band radiometer

参考负载的辐射温度与物理温度的差值,即辐射温度的修正量.由于定标黑体和参数负载不是理想的黑体,它们的辐射温度需要进行修正,即要求出 ΔT_0^* 和 ΔT_H^* .

为了了解 3mm 波段辐射计的灵敏度、测温动态范围以及机箱内的高温参考负载的修正量 ΔT_H^* 和室温定标黑体的修正量 ΔT_0^* ,在实验室中对辐射计进行了标定.下面介绍实验的测量方法和导出结果.

2 测试方法

为了测试方便和保证最高的采样精度,测试实验中采用一高性能的 A/D 卡和 PC 计算机代替辐射计中的 PC104 嵌入系统,如图 2 所示.采用口面定标的方法^[7],用“理想”室温定标黑体^[8]和浸泡在液氮的“理想”冷温定标黑体分别覆盖辐射计的观测窗口,由计算机自动采集接收机的输出电压,然后处理测量数据,得到需要的参数.

室温黑体和机内定标黑体进行定标时,分别保持测量 5min 的数据采样,液氮黑体进行定标时,保持测量 3min 的数据采样.根据测量结果,可以推算出接收机的灵敏度、测温范围和机箱内定标黑体和参考负载的修正量.

具体的测量步骤如下:

- ① 辐射计上电,通过计算机控制界面设置辐射计的接收机工作状态,控制接收机进入正常的工作模式,并等待辐射计工作状态的稳定以及机箱内高温参考负载物理温度的均匀稳定(采用三点测温).
- ② 将辐射计的观测窗口对准室温定标黑体,以 2Hz 的采样频率采集接收机的输出电压 V_{A0} .同时用电子温度计测量室温 T_0 ,此值作为室温定标黑体遮挡天线口面时的天线温度 T_0 .
- ③ 将辐射计的观测窗口对准浸泡液氮的冷温黑体,以 2Hz 的采样频率采集接收机的输出电压 V_{AC} .冷温黑体的物理温度为它辐射温度.
- ④ 通过计算机控制机箱内的定标挡板到 45° 状

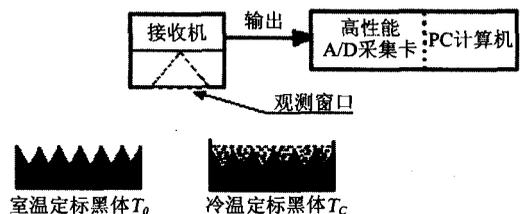


图 2 测试示意图框图
Fig.2 Measurement sketch

态,让机箱内室温定标黑体辐射信号进入接收机的天线,进行口面定标,并以 2Hz 的采样频率采集接收机的输出电压 V_0 。用机内电子温度计测量机内定标黑体的物理温度,此值作为机内定标黑体的物理温度 T_0 。

3 测试数据

经过多次实验和实验细节上的改进,得到了有益的实验数据。图 3 是步骤 2 观测室温定标黑体的输出电压记录,图 4 是步骤 3 观测冷温黑体的输出电压记录,图 5 是步骤 4 观测机箱内室温定标黑体的输出电压记录。实验数据的均值和均方根值如表 1 所示。

4 结果

根据实验数据,下面导出辐射计在天线温度为室温时的灵敏度、最大的测温范围、机箱内室温定标黑体的辐射温度修正量和高温参考负载的辐射温度修正量。

实验室中的室温定标黑体和液氮浸泡的冷温定标黑体是比较理想的,它们的物理温度可以等效为它们的辐射温度。室温定标黑体的物理温度由计量过的电子温度计测定,液氮浸泡黑体的物理温度一般就是实验当时的液氮沸点。液氮沸点公式为

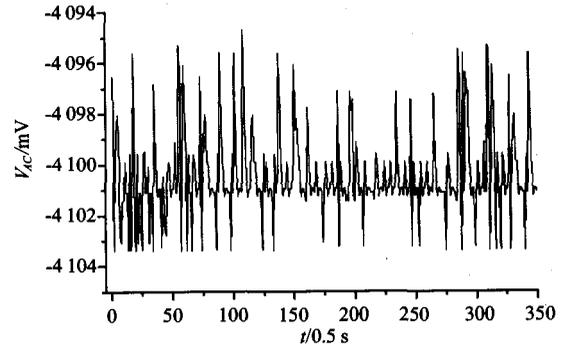


图 4 冷温定标黑体定标时辐射计输出波形
Fig. 4 Output voltage for a calibration of cool temperature blackbody

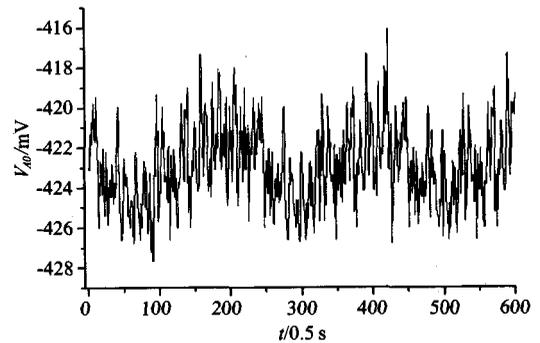


图 5 机内室温定标黑体定标时辐射计输出波形
Fig. 5 Output voltage for a calibration of radiometer blackbody

表 1 测量数据

Table 1 Measured data

步骤	状态	记录时间	输出电压均值 (mV)	均方根值 (mV)	温度值
2	室温定标黑体定标	5min	-417.0	2.49	297.5k
3	液氮定标黑体定标	3min	-4100.5	1.73	100k
4	机内定标黑体定标	5min	-422.6	2.33	297.5k

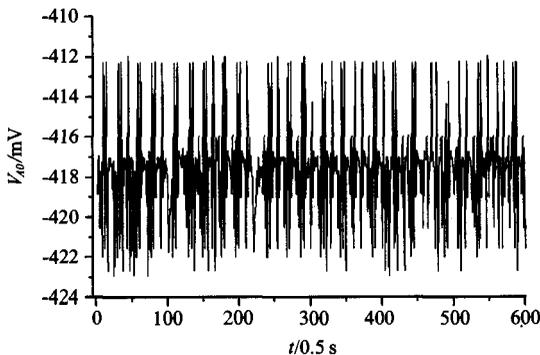


图 3 室温定标黑体定标时辐射计输出波形
Fig. 3 Output voltage for a calibration of room temperature blackbody

$$T_C = 77.36 + 0.011(P - 760) \quad (4)$$

式中 P 为大气压,单位为毫米汞柱。考虑到当时实验条件,测量时冷温定标黑体无法一直浸泡在液氮中,就采用另一频段的辐射计对这种冷温定标黑体的辐射温度进行标定,同时考虑气压和温度对液氮的影响,确定浸泡液氮的冷温定标黑体的亮温为 $T_C = 100\text{K}$ 。

4.1 灵敏度

采用实验室的室温定标黑体和冷温定标黑体测量辐射计的灵敏度。室温黑体定标时输出电压的平均值为 $\bar{V}_{A0} = -417.0\text{mV}$,均方根值为 $\sigma_{A0} = 2.49\text{mV}$,电子温度计测量得到的室温为 $T_0 = 273.15 + 24.3 = 297.5\text{K}$ 。冷温定标黑体定标时输出电压的平均值为 $\bar{V}_{AC} = -4100.5\text{mV}$,它的温度为 $T_c = 100\text{K}$ 。先求出在 2 种黑体定标时辐射计输出电压差值与输入温度差值之比(即辐射计增益),然后将输出电压的均方根值 σ_{A0} 反算到辐射计体现输入口面,即得到辐射计的灵敏度。

这样,可以计算出辐射计的灵敏度为

$$\begin{aligned}\Delta T_{\min} &= \frac{\sigma_{A0}(T_0 - T_C)}{V_{A0} - V_{AC}} \\ &= 2.49 \times (297.5 - 100) / (-417.0 - (-4100.5)) \\ &= 0.133 \text{ K}\end{aligned}$$

4.2 测温范围

辐射计接收机的输出电压的动态范围是 $-5\text{V} \sim +5\text{V}$, 接收机最大的输出电压为: $V_{A\max} = 5.0\text{V} = 5000\text{mV}$, 最小的输出电压为: $V_{A\min} = -5.0\text{V} = -5000\text{mV}$. 辐射计的测温上限和下限分别对应着最大和最小输出电压时的输入天线温度, 即测温上限等于辐射计输出电压为 $V_{A\max}$ 对应的输入天线温度, 测温下限等于辐射计输出电压为 $V_{A\min}$ 对应的输入天线温度.

测温上限为

$$\begin{aligned}T_{A\max} &= \frac{V_{A\max} - \bar{V}_{A0}}{V_{A0} - \bar{V}_{AC}}(T_0 - T_C) + T_0 \\ &= (5000 - (-417.0)) \times (297.5 - 100) / (-417.0 - (-4100.5)) + 297.5 \\ &= 587.9 \text{ K}\end{aligned}$$

测温下限为

$$\begin{aligned}T_{A\min} &= \frac{V_{A\min} - \bar{V}_{A0}}{V_{A0} - \bar{V}_{AC}}(T_0 - T_C) + T_0 \\ &= (-5000 - (-417.0)) \times (297.5 - 100) / (-417.0 - (-4100.5)) + 297.5 \\ &= 51.8 \text{ K}\end{aligned}$$

可见, 辐射计的测温范围为: $51.8\text{K} \sim 587.9\text{K}$.

4.3 机箱内室温黑体辐射温度修正量

在实验室定标测量时, 将机箱内室温黑体辐射温度 T_0^* 作为未知量来标定, 然后根据式(3), 得到辐射温度的修正量为

$$\begin{aligned}\Delta T_0^* &= T_0^* - T_0 \\ &= \frac{\bar{V}_0 - \bar{V}_{A0}}{V_{A0} - \bar{V}_{AC}}(T_0 - T_C) \\ &= (-422.6 - (-417.0)) \times (297.5 - 100) / (-417.0 - (-4100.5)) \\ &= -0.30 \text{ K}\end{aligned}$$

4.4 机箱内高温参考负载辐射温度修正量

机箱内高温参考负载的物理温度由内置的3个电子温度计测量值取均值得到: $T_H = (273.15 + 47.3) = 320.45\text{K}$. 同样, 根据式(3), 机箱内高温参考负载辐射温度修正量为

$$\begin{aligned}\Delta T_H^* &= T_H^* - T_H = \frac{T_C \bar{V}_{A0} - T_0 \bar{V}_{AC}}{V_{A0} - \bar{V}_{AC}} - T_H \\ &= [100 \times (-417.0) - 297.5 \\ &\quad \times (-4100.5)] / (-417.0 + 4100.5) - 320.45 \\ &= -0.59 \text{ K}\end{aligned}$$

5 结语

辐射计的灵敏度和测温范围是辐射计设计的重要性能指标, 在实验室中应用实验方法标定得出, 以确定辐射计的性能. 从测量结果可以看出, 所设计的3mm波段辐射计具有很高的灵敏度和大于500K的测温动态范围.

3mm辐射计是用于野外测量的便携设备, 现场测量需要使用的定标源不能采用象实验室使用液氮冷却的理想黑体. 在此设备中采用常温和加温的“黑体”, 作为“二级”定标源. 因此需要对“二级”定标源的辐射温度进行修正, 将修正的结果保存在计算机中, 在实际测量应用时进行补偿.

REFERENCES

- [1] XIANG Jin-Cheng, ZHANG Ming-You. *Millimeter Radar and its Application* [M]. Beijing: National Defence Industry Press (向敬成, 张明有. 毫米波雷达及其应用. 北京: 国防工业出版社), 2005: 1—12.
- [2] XIE Liang-Jin. *Base of Millimeter Wave Engineering* [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press (薛良金. 毫米波工程基础. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社), 2004: 1—15.
- [3] YIN Xing-Hui. A new design technique for millimeter wave horn antennas [C]. Beijing: Microwave and Millimeter Wave Technology Proceedings, 1998: 380—381.
- [4] Ulaby F T, Moore R K, Fung A K. *Microwave Remote Sensing* [M]. Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Company, 1981, 1: 410—418.
- [5] PENG Shu-Sheng, LUO Li-Heng. Design of data sampling and control circuit based on PC104 of a 3mm receiver [J]. *Control & Automation* (彭树生, 罗立恒. 3mm接收机的PC104数据采集与控制电路设计. 微计算机信息: 测控自动化), 2003, 19(11): 36—38.
- [6] Tiuri M E, Raisanen A V. *Radio-Telescope Receiver. Chapter 7 in Radio Astronomy* [M]. Edited by Kraus J D. 2nd ed., London: McGraw-Hill, 1986: 7-0-7-74.
- [7] PENG Shu-Sheng. Research on improvement of absolute measure precision of a microwave radiometer [D]. Nanjing: Nanjing Purple Mountain Observatory (彭树生. 提高微波辐射计绝对测量精度的研究. 南京: 南京紫金山天文台), 1995.
- [8] HARDY W N. Precision temperature reference for microwave radiometry [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1973, MTT-22(4): 382—390.