

文章编号: 1672-8785(2014)12-0019-04

## 利用 360 GHz 辐射计高空探测目标研究

邢业新<sup>1</sup> 范志应<sup>2</sup> 李跃华<sup>3</sup>

(1. 常州工学院计算机信息工程学院, 江苏 常州 213002;

2. 淮海工业集团有限公司, 山西 长治 046012;

3. 南京理工大学电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094)

**摘 要:** 亚毫米波会被大气严重吸收, 因此在底层大气中进行金属目标的被动探测很困难。提出了一种利用 360 GHz 亚毫米波辐射计在高空探测目标的方法。介绍了 360 GHz 辐射计系统的结构。利用 MPM 模型计算了大气辐射温度和目标的天线温度对比度。在地面温度为 0 °C、相对湿度为 20% 的天气条件下对辐射计进行了定标实验, 并对地面上方 3 m 处的 0.5 m×1 m 金属目标进行了探测试验。计算和试验结果表明, 天线温度对比度的计算模型是可行的。在地面温度为 20 °C、相对湿度为 20% 的天气条件下, 处于 5 km 高度的 360 GHz 辐射计对 1 m×5 m 目标的探测高度为 0.3 km, 而对 10 m×20 m 大目标的探测高度为 2 km。

**关键词:** 亚毫米波; 辐射计; 被动探测; 天线温度对比度

**中图分类号:** TJ43 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2014.12.004

## Detecting Target with 360 GHz Radiometer at High Altitude

XING Ye-xin<sup>1</sup>, FAN Zhi-ying<sup>2</sup>, LI Yue-hua<sup>3</sup>

(1. Department of Computer and Information Engineering, Changzhou Institute of Technology, Changzhou 213002, China;

2. Huaihai Industrial Group Co., Ltd., Changzhi 046012, China;

3. School of Electronic Engineering and Optoelectronic Technology, NUST, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** Submillimeter wave is absorbed in atmosphere seriously. So it is very difficult to detect a metal target in lower atmosphere passively. A method for detecting a metal target by a 360 GHz radiometer at high altitude is proposed. The configuration of the radiometer is presented. The contrast of the atmospheric radiation temperature to the antenna temperature of the target is calculated by using a MPM model. The radiometer is calibrated under the weather condition with the ground temperature of 0 °C and the humidity of 20% and is used to detect a 0.5 m×1 m metal target at the altitude of 3 m above the ground. The calculation and experimental results show that the model for calculating antenna temperature contrast is feasible. Under the weather condition with the ground temperature of 20 °C and the relative humidity of 20%, the 360 GHz radiometer at the altitude of 5 km can detect a 1 m×5 m metal target in the distance of 0.3 km above it and can detect a 10 m×20 m metal target in the distance of 2 km above it.

**Key words:** sub-millimeter wave; radiometer; passive detection; antenna temperature contrast

收稿日期: 2014-10-19

作者简介: 邢业新 (1974-), 男, 山东莱芜人, 博士, 高级工程师, 主要从事毫米波、亚毫米波探测技术研究。

E-mail: sxczhfxyx@sina.com

## 0 引言

亚毫米波 (频率范围为 300 GHz~3 THz) 又称为太赫兹波, 频率介于微波和红外之间, 它在基础学科、军事和工业等领域具有潜在的应用价值。相对于红外和可见光, 亚毫米波在云雾、烟尘中的衰减较小; 相对于微波, 亚毫米波具有高的分辨力、较小的体积和重量<sup>[1,2]</sup>。亚毫米波具有丰富的转动分子谱和振动分子谱, 通过搜索火箭羽烟的辐射谱可以对其进行探测和制导<sup>[3]</sup>。亚毫米波的可利用带宽比微波的大, 这有利于提高辐射计的灵敏度。因此, 可以考虑将亚毫米波辐射计探测系统用于导弹末制导中。

但是, 亚毫米波的大气吸收非常严重, 导致大气辐射温度很高。在低层大气金属目标的被动探测中, 天线温度的对比度很小, 因此很难探测识别出目标。在海拔几公里以上的高空, 由于大气密度特别是水汽密度迅速减小, 大气吸收随之急剧变小。基于这种想法, 本文提出了一种将 360 GHz 辐射计置于高空对金属目标进行探测的方法。首先介绍了辐射计系统, 其次计算了天线温度的对比度, 最后对地面金属目标进行了模拟探测试验。

## 1 辐射计系统

在弹载应用场合, 由于辐射计天线做高速扫描运动, 辐射计的积分时间很短, 故人们广泛采用结构简单、体积小和成本低的全功率辐射计<sup>[4]</sup>。全功率辐射计可采用超外差和直接检波式两种结构形式。与超外差式接收机相比, 直接检波式接收机具有系统噪声温度低、直流功耗小和结构简单等优点<sup>[5,6]</sup>。由于受器件水平的限制, 360 GHz 接收机仍然采用超外差式, 本振源通过 V 波段功率源的三倍频得到, 系统框图如图 1 所示, 实物如图 2 所示。

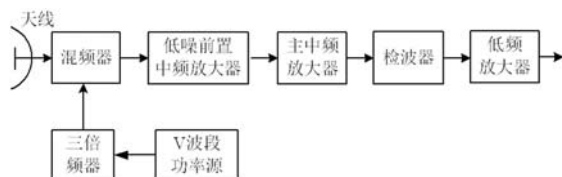


图 1 辐射计系统框图

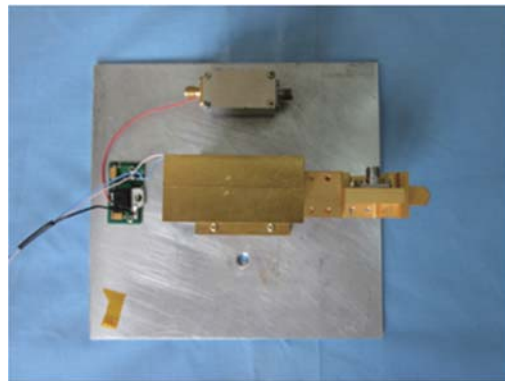


图 2 辐射计

## 2 天线温度对比度的计算

如图 3 所示, 辐射计置于高度  $H$  处, 以观测角  $\theta_F$  向上观测, 金属目标位于天线上方  $h$  处。

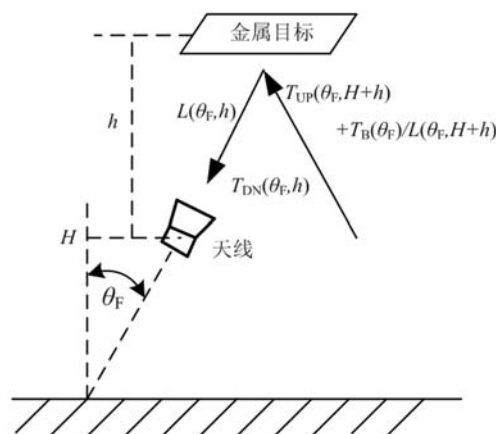


图 3 辐射计观测目标

目标的视在温度  $T_{APT}(\theta_F)$  可写为

$$T_{APT}(\theta_F) = \frac{1}{L(h)} \left( \frac{1}{L(H+h)} T_B(\theta_F) + T_{UP}(\theta_F, H+h) \right) + T_{DN}(\theta_F, h) \quad (1)$$

式中,  $L(h)$  为天线与目标间的大气衰减因子,  $L(H+h)$  为地面与目标间的大气衰减因子,  $T_B(\theta_F)$  为地物向上的辐射温度,  $T_{UP}(\theta_F, H+h)$  为大气的向上辐射温度,  $T_{DN}(\theta_F, h)$  为天线与目标间的大气向下辐射温度。

背景的视在温度是在没有目标时天线在  $H$  处接收到的大气向下的辐射温度  $T_{SKY}(\theta_F, H)$ 。根据辐射传递理论, 在忽略大气散射的情况下,

天线在  $H$  处接收到的大气向上辐射温度和大气向下辐射温度分别为<sup>[7]</sup>

$$T_{UP}(\theta_F, H) = \sec\theta_F \int_0^H k_g(z)T(z)e^{-\tau(z,H)\sec\theta_F} dz \quad (2a)$$

$$T_{DN}(\theta_F) = \sec\theta_F \int_H^\infty k_g(z)T(z)e^{-\tau(0,z)\sec\theta_F} dz \quad (2b)$$

式中,  $k_g(z)$  是高度  $z$  处的大气吸收系数,  $T(z)$  是高度  $z$  处的大气热力学温度。

在 1 GHz~1000 GHz 范围内, 大气吸收系数可采用 MPM 模型计算<sup>[8,9]</sup>。对流层内, 大气热力学温度近似为

$$T(z) = T_0 - 6.5z \quad (3)$$

式中,  $T_0$  是地面大气热力学温度。在亚毫米波段, 大气的吸收系数主要包括氧气的吸收系数  $k_o(z)$  和水汽的吸收系数  $k_w(z)$ 。氧气和水汽的吸收系数随高度的变化规律为<sup>[10]</sup>

$$k_o(z) = k_o(0)\exp(-0.183z) \quad (4a)$$

$$k_w(z) = k_w(0)\exp(-0.5z) \quad (4b)$$

在不同天气条件下, 当观测角为  $30^\circ$  时, 背景的 360 GHz 视在温度计算值见表 1。表 1 中的数据表明, 背景的视在温度随天气变化剧烈, 然而, 即使在  $0^\circ\text{C}$ 、相对湿度  $\text{RH}=20$  的天气条件下, 在  $H=1\text{ km}$  处, 背景视在温度还是比较高的; 而在  $30^\circ\text{C}$ 、 $\text{RH}=60$  的天气条件下, 在  $H=7\text{ km}$  处, 天线观测到的背景辐射温度才会比较低。所以, 在一般天气条件下, 几公里高度处天线观测到的背景视在温度都比较高, 背景是一个“热”源, 辐射计无法从这一背景中检测出目标。要想探测到目标, 必须提高观测高度  $H$ 。

表 1  $T_{SKY}(\theta_F, H)$  的计算值 /K

| 天气条件                                | H=1 km | H=3 km | H=5 km | H=7 km |
|-------------------------------------|--------|--------|--------|--------|
| $0^\circ\text{C}$ , $\text{RH}=20$  | 112    | 49     | 20     | 8      |
| $20^\circ\text{C}$ , $\text{RH}=40$ | 275    | 198    | 98     | 37     |
| $30^\circ\text{C}$ , $\text{RH}=60$ | 295    | 273    | 197    | 93     |

当目标位于天线波束中心时, 天线温度对比度最大, 可以表示为<sup>[11]</sup>

$$\Delta T_A(\theta_F) = [T_{APT}(\theta_F) - T_{SKY}(\theta_F)][1 - \exp(-\frac{bA_T}{\pi H^2} \cos^3 \theta_F)] \quad (5)$$

式中,  $b$  为天线参数,  $A_T$  为目标的面积。

以温度为  $20^\circ\text{C}$ 、 $\text{RH}=40$  的天气条件为例, 在  $H=5\text{ km}$  高度处, 假设  $b=25000$ (此时天线增益为 50 dB), 对于  $1\text{ m}\times 5\text{ m}$  的小目标和  $10\text{ m}\times 20\text{ m}$  的大目标两种情况, 天线温度对比度的计算值见表 2。

辐射计能够识别的最小天线温度变化称为灵敏度  $\Delta T_{min}$ 。当  $\Delta T_A(\theta_F) \geq 3\Delta T_{min}$  时, 可认为辐射计能识别出目标。因此, 为了增大探测距离, 一方面需要增大天线温度对比度, 另一方面需要提高辐射计的灵敏度。提高天线增益可以增大天线温度对比度, 但天线增益的提高必然会导致主波束变窄和搜索区域变小。增大系统的带宽可提高灵敏度, 由于亚毫米波的带宽远大于微波, 这是亚毫米波辐射计的一大优点, 但带宽的增大也会导致系统噪声系数增加, 故应权衡考虑。

表 2 天线温度对比度计算值 /K

| 探测高度 h/km    | 0.1   | 0.3  | 0.5   | 1     | 2    |
|--------------|-------|------|-------|-------|------|
| 1 m×5 m 目标   | 188.6 | 50.9 | 20.0  | 5.2   | 1.3  |
| 10 m×20 m 目标 | 204.0 | 204  | 200.7 | 131.4 | 46.5 |

### 3 地面目标探测试验

#### 3.1 辐射计定标

确定辐射计天线接受功率与输出指示之间的定量关系, 称为辐射计定标。对于线性接收机, 可采用“两点”定标法进行定标, 高温定标负载采用常温吸波材料, 低温定标负载采用液氮浸泡的吸波材料。用这种方法设计了定标盒, 如图 4 所示。辐射计天线在定标盒上方来回移动时, 得到的输出电压为  $V_{out}$ , 而天线温度对比度可近似为室温减去液氮温度。在 298 K 室温下, 经过测量, 得出 360 GHz 辐射计的定标方程为

$$V_{out} = 0.015\Delta T_A \quad (6)$$

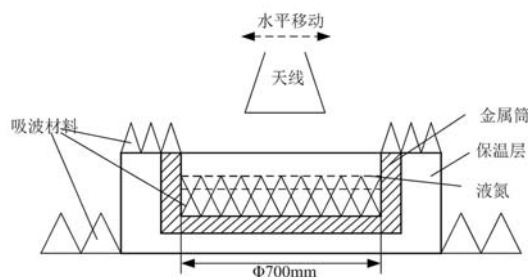


图4 辐射计定标

### 3.2 地面目标探测

在温度为  $0^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度  $\text{RH}=20$  的天气条件下，对位于草地上方 3 m 高度处的光洁平面金属进行了扫描试验。金属板长为 1 m，宽为 0.5 m，辐射计天线观测角为  $30^{\circ}$ ，输出电压波形如图 5(a) 所示。在温度为  $20^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度  $\text{RH}=40$  的天气条件下，输出电压波形如图 5(b) 所示。

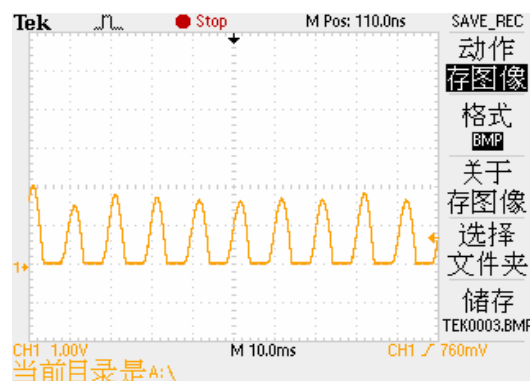
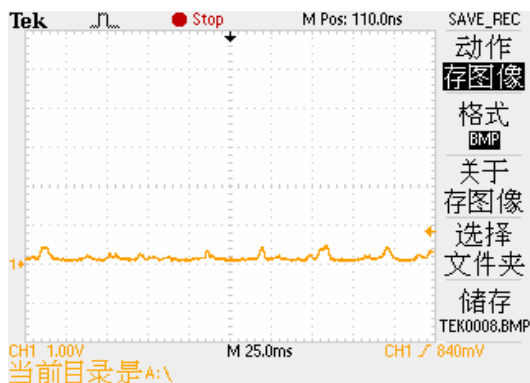
(a)  $0^{\circ}\text{C}$ ,  $\text{RH}=20$ (b)  $20^{\circ}\text{C}$ ,  $\text{RH}=40$ 

图5 辐射计输出

在低温干燥的天气条件下，大气辐射温度比较低，金属目标的视在温度对比度较大，辐射计有较大的输出电压。输出电压经定标方程换算为天线温度对比度，为 106.7 K，与理论计算

值 110 K 吻合较好。这说明，天线温度对比度的计算模型是可行的。随着温度和湿度的升高，大气辐射温度迅速增大，天线温度对比度减小，辐射计很难再有输出电压信号。参考图 5 中的测量数据，假设辐射计输出电压为 0.6 V 时辐射计能可靠识别出目标。那么，利用式 (6) 计算出天线温度对比度为 40 K。对比表 2 中的计算数据，可以预测出 360 GHz 辐射计在地面温度为  $20^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度  $\text{RH}=40$  的天气条件下，在  $H=5\text{ km}$  高度处，对  $1\text{ m}\times 5\text{ m}$  目标的探测高度略大于 0.3 km，对  $10\text{ m}\times 20\text{ m}$  目标的探测高度约为 2 km<sup>[12]</sup>。

### 4 结论

天线温度对比度是辐射计探测、识别目标的依据，其大小与观测角度、天线特性、目标和背景的辐射特性等因素有关。大气辐射与吸收相关联，由于大气对亚毫米波的吸收严重，辐射温度很高。利用 MPM 模型计算出了大气吸收系数，并进一步计算出了大气辐射温度和天线温度对比度。选取低温、干燥的天气条件 ( $0^{\circ}\text{C}$ 、 $\text{RH}=20$ )，在地面上用 360 GHz 辐射计对上方的金属目标进行了探测试验，试验结果与计算值吻合较好，说明天线温度对比度计算模型是可行的。因此，通过计算模型预测出 360 GHz 辐射计在地面温度为  $20^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度  $\text{RH}=40$  的天气条件下，在  $H=5\text{ km}$  高度处，对  $1\text{ m}\times 5\text{ m}$  目标的探测高度略大于 0.3 km，对  $10\text{ m}\times 20\text{ m}$  目标的探测高度约为 2 km。

### 参考文献

- [1] Mukherjee P, Gupta B. Terahertz (THz) Frequency Sources and Antennas-A Brief Review [J]. *Int J Infrared Milli Waves*, 2008, 29(2):1091-1102.
- [2] 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, 2009:228-231.
- [3] 夏亚, 何志毅. 亚毫米波导弹末制导技术前景分析[J]. *制导与引信*, 2004, 25(1):18-20.
- [4] 娄国伟, 李兴国, 宁军. 高速扫描全功率毫米波辐射计研究 [J]. *红外与毫米波学报*, 1998, 17(4):241-246.
- [5] 关福宏, 王闯, 田为中. 直接检波式毫米波接收机研制 [J]. *红外与毫米波学报*, 2007, 26(2):125-128.

(下转第 34 页)