

① 98,17(4) 24-246

1998/95821A/01/004

# 高速扫描全功率毫米波辐射计研究\*

娄国伟 李兴国 宁军

(南京理工大学毫米波光波近感技术研究所,江苏,南京,210094)

1241-320

TN015

**摘要** 提出一种高速扫描全功率8mm波段辐射计,在论述该系统原理及信号特征的基础上,计算了系统及部件的主要指标,并介绍了试验样机的性能.研究及实验表明,这种辐射计的设计有一定特色,而且电路和结构均较简化.

**关键词** 毫米波,高速扫描,全功率辐射计,灵敏度.

## 引言

本文研究的高速扫描全功率毫米波辐射计,其主要特点是作用距离从几十m至200m,辐射计天线波束在地面投影面积与探测目标面积相近,辐射计波束扫描线速度可达几千m,积分时间为几ms.这种辐射计不但体积小,成本低,而且系统设计及测试均有自己的特色.它可广泛应用于各种弹载反装甲目标探测系统.

## 1 基本工作原理

在相同的环境温度下,不同物体有不同的辐射率,利用其差异,可探测和识别不同的物体.毫米波辐射计就是接收目标与背景之间的毫米波辐射能量差来探测和识别目标的,因此毫米波辐射计实际上是一台高灵敏度接收机.辐射计一般可分为迪克辐射计和全功率辐射计两大类,本文主要研究全功率辐射计.其工作原理(见图1)如下:当天线波束在“热”背景(如地面)和冷目标(如金属目标)之间扫描时,金属目标与地面之间的毫米波辐射能量差经天线及隔离器进入混频器,在混频器中,输入信号与本机振荡信号混频,产生的差频信号经前置中频放大器、主中频放大器,再经检波器检波,检波器输出信号经隔离器至视频放大器,视频放大器输出含有目标信息的信号.这种辐射计最高扫描线速度可达3000m/s,而且积分

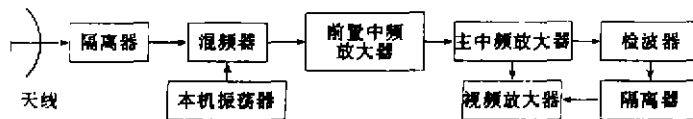


图1 高速扫描毫米波辐射计原理框图  
Fig. 1 Block diagram of high-speed-scan MMW radiometer

\* 国防预研基金(编号94J5.1.4BQ02)资助项目  
稿件收到日期 1998-02-25,修改稿收到日期 1998-05-04

时间短,一般为几 ms,输出信号是一种钟形脉冲,不需要经常校准,因此系统可大大简化.本文将这种辐射计叫作高速扫描辐射计.

## 2 高速扫描辐射计的信号特征

根据文献[1]可知,当毫米波辐射计对地面某一矩形金属目标扫描时,可导出辐射计天线温度变化量  $\Delta T_a$  为

$$\Delta T_a = \frac{G_0 H \Delta T_T}{A\pi} \int_{y_1}^{y_2} \int_{x_1}^{x_2} \frac{\exp\{-b[\arccos \frac{H \cos \theta_F + y \sin \theta_F}{(H^2 + x^2 + y^2)^{1/2}}]\}^2}{(x^2 + y^2 + H^2)^{3/2}} dx dy, \quad (1)$$

式(1)中,  $G_0$  为天线增益;  $H$  为辐射计离地面的高度;  $\Delta T_T$  为地面背景与金属目标之间的辐射温度差;  $\theta_F$  为辐射计天线波束与地面法线夹角;  $b$  为天线方向图系数.

已知  $\Delta T_T$ 、 $\theta_F$ 、 $G_0$  和  $b$ , 式(1)可用计算机编程进行计算, 计算结果表明, 当毫米波辐射计对地面金属目标高速扫描时, 辐射计天线输入是一个钟形脉冲信号(见图 2), 图 2 横坐标是波束相对目标的位置( $x$ ).

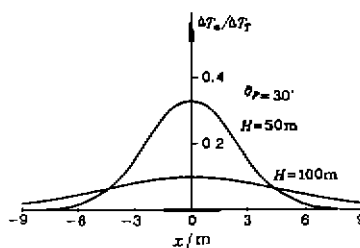


图 2 辐射计天线输入的信号波形  
Fig. 2 Signal waveforms for the radiometer antenna input

## 3 系统设计

### 3.1 灵敏度计算

一般全功率辐射计灵敏度公式<sup>[1]</sup>为

$$\Delta T_{\min} = (T_a + T_m) \left[ \frac{1}{B\tau} + \left( \frac{\Delta G}{G} \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (2)$$

式(2)中,  $T_a$  为天线温度;  $T_m$  为混频器至中放输出的噪声温度;  $\Delta G/G$  为系统增益起伏;  $B$  为系统带宽;  $\tau$  为系统积分时间.

如前所述,当高速扫描辐射计探测地面金属目标时,辐射计接收信号是一个钟形脉冲,为不失真地接收目标信号,要求辐射计终端积分时间为 ms 量级,一般为几个 ms. 设积分时间为 1~10ms, 系统带宽  $B=500\text{MHz}$  时, 则式(2)中  $1/B\tau=2 \times 10^{-6} \sim 2 \times 10^{-5}$ . 另外,在高速扫描状态下,辐射计波束与目标交会时间一般为几 ms 至几十 ms, 在这样短的时间内,辐射计系统增益变化  $\Delta G/G$  不太明显,一般  $\Delta G/G < 10^{-4}$ , 则  $(\Delta G/G)^2 < 10^{-8}$ . 因此,在高速扫描辐射计探测地面金属目标的条件下,可得

$$\frac{1}{B\tau} \gg \left( \frac{\Delta G}{G} \right)^2, \quad (3)$$

将式(3)代入式(2),经简化可得

$$\Delta T_{\min} = (T_a + T_m) / \sqrt{B\tau} = T_{\text{sys}} / \sqrt{B\tau}, \quad (4)$$

式(4)中,  $T_{\text{sys}} = (T_a + T_m)$ , 式(4)可作为高速扫描短积分时间辐射计灵敏度的计算公式。

### 3.2 系统噪声计算

接收机的噪声系统可以通过各级级联的噪声系数求得, 系统总噪声与各级噪声系数和增益的关系为

$$F_m = F_1 + \frac{F_1 - 1}{G_1} + \frac{F_2 - 1}{G_1 G_2} + \dots + \frac{F_n - 1}{G_1 G_2 \dots G_{n-1}}, \quad (5)$$

式(5)中  $F_i$  和  $G_i$  分别是第  $i$  级噪声系数和增益, 从图 1 可知, 混频器至中频放大器的系统噪声系数可根据式(5)导出

$$F_m = F_m + \frac{F_{f1} - 1}{G_m} + \frac{F_{f2} - 1}{G_m G_{f1}}, \quad (6)$$

式(6)中  $F_m$  为混频器噪声系数;  $F_{f1}$ 、 $F_{f2}$  为分别为前置中频和主中频放大器噪声系数;  $G_m$ 、 $G_{f1}$  分别为混频器和前置中频放大器增益。

### 3.3 中频放大器的设计与计算

#### (1) 中频放大器带宽的确定

一般系数带宽与中频放大器带宽的关系为

$$B = K_f B_f, \quad (7)$$

式(7)中  $K_f$  为噪声带宽窗常数,  $B_f$  为中频放大器带宽, 根据式(7)可确定中频放大器带宽  $B_f$ 。

#### (2) 中频放大器增益的计算

中频放大器增益设计对获得最佳系统特性具有至关重要的作用, 为保证辐射计输出信号能精确反映目标的特征及场景温度分布, 中频放大器设计应满足以下条件: 第一, 为保证接收机前端所要求的噪声系数, 必须有足够中放增益; 第二, 在中放与终端电路之间的包络检波器必须工作于平方律范围。

根据条件一, 应保证中放总增益  $G_f$  满足以下关系式

$$G_f \Delta T_{\text{min}} = A \Delta T_{\text{min}}, \quad (8)$$

式(8)中  $G_f$  为中频放大器纯增益;  $A$  为常数, 为保证足够高的中放, 文中取  $A=10$ ;  $\Delta T_{\text{min}}$  为辐射计平方律检波和终端放大器的最小可检测温度。

对于晶体检波器的辐射计, 则有

$$\Delta T_{\text{min}} = \frac{2}{C_d \sqrt{K}} \sqrt{T_0 R_v F_v} \left[ \frac{\sqrt{B_{LF}}}{B_{RF}} \right], \quad (9)$$

将式(9)代入式(8)可导出中频增益表达式为

$$G_f = \frac{2A}{C_d K \Delta T_{\text{min}} B_{RF}} \sqrt{K T_0 R_v F_v B_{LF}}, \quad (10)$$

式(10)中  $C_d$  为检波器灵敏度;  $K$  为波尔兹曼常数;  $T_0$  为环境温度;  $B_{RF}$  为射频总带宽, 相当

于二倍系统带宽;  $F_n$ 、 $B_{LF}$  分别为终端视频放大器噪声系数及带宽;  $R_n$  为平方律检波器的视频电阻;  $M_d$  为检波二极管品质因素.

根据条件二, 要求中频放大器纯增益为

$$G_{if} \geq \frac{P_{if}}{KT_{sys}BF_m}, \quad (11)$$

式(11)中  $P_{if}$  为中放输出功率, 即保证检波器工作于平方律的中放输出功率;  $T_{sys}$  为系统的噪声温度.

根据式(11)和式(12)分别计算出中频放大器的纯增益  $G_{if}$ , 取二者中的大者为系统的中频放大器纯增益. 另外, 实际中还应考虑各种附加损耗, 这样总的中频放大器增益必须提供 6~15dB 的附加增益作为损耗的补偿.

### 3.4 视频放大器的设计与计算

#### (1) 视频放大器带宽的计算

检波器后(视频放大器输入端)低通滤波器等效噪声的单边带带宽为

$$B_{LF} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\infty} |H(\omega)|^2 d\omega, \quad (12)$$

式(12)中  $H(\omega)$  为滤波器的脉冲响应;  $\omega$  为角频率.

对于 RC 滤波器, 其脉冲响应函数为

$$|H(\omega)|^2 = \frac{1}{1 + (\tau\omega)^2}, \quad (13)$$

将式(13)代入式(12), 并积分可得

$$B_{LF} = \frac{1}{2\pi\tau} \int_0^{\infty} \frac{\tau d\omega}{1 + (\tau\omega)^2} = \frac{1}{4\tau}, \quad (14)$$

根据式(14)可由积分时间计算出视频放大器的带宽  $B_{LF}$ .

#### (2) 视频放大器增益的计算

当辐射计探测地面金属目标时, 设毫米波辐射计温度范围是  $T_{\min} \sim T_{\max}$ , 则加至视频放大器输入端的电压  $U_{in}$  为

$$U_{in} = C_d K T_{sys} B F_m G_{if}, \quad (15)$$

系统温度的最大和最小值为

$$T_{sys \min} = T_{\min} + (L - 1)T_0 + L(F_m - 1)T_0, \quad (16)$$

$$T_{sys \max} = T_{\max} + (L - 1)T_0 + L(F_m - 1)T_0; \quad (17)$$

式中  $L$  为系统天线至混频器之间的传输损耗.

由上述可知, 在辐射计视频输入端, 系统噪声产生的视频噪声功率比有用信号的视频功率大得多, 一般大几百倍至千倍. 为使视频噪声不阻塞视频放大器, 必须设法加以抑制. 在本文研究的高速扫描辐射计中, 由于天线输出信号是一个钟形脉冲, 因此, 可十分方便地将机

内视频噪声与有用视频信号分离. 分离后的视频有用信号  $\Delta U_m$  可根据式(15)、式(16)和式(17)导出

$$\Delta U_m = C_d K B F_m G_d (T_{\max} - T_{\min}). \quad (18)$$

通常辐射计输出视频不但有电压要求, 而且还应有温度与视频输出电压变化斜率的要求, 若设辐射计终端斜率为  $D$  (单位  $\text{mV/K}$ ), 则视频放大器的增益  $G_v$  可表示为

$$G_v = \frac{D}{\Delta U_m / T_{\max} - T_{\min}}, \quad (19)$$

将式(18)代入式(19)得

$$G_v = \frac{D}{C_d K B F_m G_d}, \quad (20)$$

根据式(20)可计算辐射计终端视频放大器增益.

### 3.5 系统设计实例

根据国内现有 8mm 波段元器件, 设计一台高速扫描短积分时间辐射计. 辐射计中心频率为 35GHz; 系统带宽  $B=500\text{MHz}$ ; 积分时间  $\tau=2\text{ms}$ ; 动态范围 ( $T_{\min}-T_{\max}$ ) 为 30~350K; 利用现有元部件参数计算辐射计灵敏度、中频放大器和视频放大器等.

#### (1) 灵敏度计算

已知 8mm 波段混频器双边带噪声系数  $F_m=5\text{dB}$ ; 变频损耗  $L_m=6\text{dB}$ ; 天线至混频器之间损耗为 1.8dB; 前置中频放大器噪声系数  $F_{if1}=1.2\text{dB}$ ; 增益  $G_{if1}=20\text{dB}$ ; 环境温度  $T_0=290\text{K}$ .

先根据式(6)计算出混频器到中频放大器的噪声系数  $F_m=5.7\text{dB}$ ; 再根据式(16)和式(17)计算出全系统噪声温度  $T_{\text{sys},\min}$  和  $T_{\text{sys},\max}$  分别是 1349.5K 和 1669.5K. 将上述数据及已知参数  $B$  和  $\tau$  代入式(4), 分别计算出  $T_{\text{sys},\min}$  和  $T_{\text{sys},\max}$  两种状态下对应的灵敏度为 1.35K 和 1.7K. 为在整个动态范围内都能有效地探测目标, 辐射计灵敏度应定为  $\Delta T_{\min}=1.35\text{K}$ .

#### (2) 中频放大器计算

取系统噪声带宽的窗常数  $K_s=1.5$ , 根据系统带宽, 由式(7)可算出中频带宽  $B_d=333\text{MHz}$ .

已知  $C_d=500\text{V/W}$ ;  $K=1.38 \times 10^{-23}\text{J/K}$ ;  $\Delta T_{\min}=1.35\text{K}$ ;  $B_{RF}=1000\text{MHz}$  (二倍系统带宽);  $R_v=91\Omega$ ;  $F_v=2\text{dB}$ ;  $B_{LF}=250\text{Hz}$ ;  $P_{H1}=-20\text{dBm}$ , 根据式(10)和(11)计算出两种条件下的中频放大器纯增益分别为 44.6dB 和 54.7dB. 为使中频放大器同时满足上述两条件, 中频放大器纯增益应取 54.7dB. 再考虑中频放大器的其它附加损耗, 这里中频放大器总增益取为 64dB.

#### (3) 视频放大器计算

根据积分时间, 由式(14)计算出视频放大器带宽  $B_{LF}=250\text{Hz}$ ; 由式(18)计算出  $\Delta U_m=1.2\text{mV}$ ; 已知  $D=10\text{mV/K}$ ; 将各参数代入式(20), 计算得视频放大器增益  $G_v=34\text{dB}$ .

#### 4 结语

根据上述原理电路及设计指标,我们经多年努力,已研制出多种 8mm 波段高速扫描辐射计. 研制分三大阶段,第一阶段研制出两台原理样机,一台应用介质透镜天线,另一台应用抛物面天线,其灵敏度  $\Delta T_{\text{min}} \leq 2\text{K}$ ,积分时间  $\tau < 2\text{ms}$ . 第二阶段在原理样机的基础上,研制出近 10 台实用化样机,灵敏度  $\Delta T_{\text{min}} \leq 1.5\text{K}$ ,积分时间  $\tau < 1.5\text{ms}$ . 第三阶段研制出多台全平面毫米波辐射计. 全平面辐射计灵敏度  $\Delta T_{\text{min}} \leq 1\text{K}$ ,积分时间  $\tau < 1.3\text{ms}$ . 研究表明,这种辐射计结构简单,使用方便,适合于大批量生产,现已用于工程前期研究.

#### REFERENCES

- 1 LI Xin-Guo *Millimeter Wave Near-sensing Tech. & Appl.* Beijing: National Defence Industry Publishing House (李兴国. 毫米波近感技术及其应用,北京:国防工业出版社),1991,22~51
- 2 Bhartia P, Bahl I J. *Millimeter Wave Engineering and Applications*, New York: Wiley,1984,660~665
- 3 Richard M. *Manual of Remote Sensing*, American society of photogrammetry, 1975(汪一飞等译. 遥感手册,第三册,北京:国防工业出版社,1982,7)

### TOTAL POWER MMW RADIOMETER SYSTEM WITH HIGH-SPEED SCAN\*

LOU Guo-Wei LI Xing-Guo NING Jun

(Research Institute of Millimeter Wave and Light Wave Near-sensing Technology,  
Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China)

**Abstract** A 8mm band total power radiometer system with high-speed scan was proposed. On the basis of discussing the theory and signal feature of this system, main parameters of the system and its components were calculated, and the performance of experimental prototype was introduced. Research and experimental results show that not only the design of the radiometer is characteristic, but the circuits and the structures are also largely simplified.

**Key words** millimeter wave, high speed scan, total power radiometer, sensitivity

---

\* The project supported by the Preliminary Research Foundation in National Defence  
Received 1998-02-25, revised 1998-05-04