

8 mm 波段直接检波式接收机研究*

汪敏 李兴国 吴文

(南京理工大学毫米波、光波近感技术研究所, 江苏, 南京 210094)

摘要 以弹载被动毫米阵列探测系统为应用背景, 提出一种 8 mm 波段直接检波式接收机, 在论述其系统工作原理的基础上, 对相关系统参数进行了分析与设计. 方案性试验研究结果表明: 这种辐射计具有灵敏度高、探测精度高和体积小等优点.

关键词 毫米波辐射计, 直接检波, 接收机, 阵列探测.

8 MM-BAND DIRECT DETECTION RECEIVER*

WANG Min LI Xing-Guo WU Wen

(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 MMIC direct detection receiver was proposed on the background of bomb-borne MMW radiometer. On the basis of the working principle of this system, main parameters of the system were analyzed and designed. Principle experimental results show that the radiometer has favorable performances, such as high sensitivity and small volume.

Key words millimeter wave radiometer, direct detection, receiver, array detector.

引言

随着 MMIC 的迅速发展, 毫米波焦平面阵列 (MFPA) 成像取得了很大的进展. 而传统弹载探测系统由于采用单天线扫描, 一直受到波束停留时间短的困扰. 因此, 毫米波多波束阵列探测技术在弹载中的应用得到极大的关注. 无疑, 对毫米波接收机的性能尺寸会提出较高的要求.

目前, 毫米波辐射计有超外差和直接检波两种结构形式. 与超外差接收机相比较, 直接检波式接收机具有系统噪声温度低、不需要本振、直流功耗低和部件简单等优点. 由于器件及技术方面的原因, 目前国内毫米波接收机大都采用超外差式. 本文以弹载被动毫米阵列探测系统为应用背景, 论述了 8 mm 波段直接检波式接收机系统工作原理, 分析与设计了相关的系统参数, 并进行了方案性试验研究. 该接收机对实现弹载毫米波焦平面阵列探测系统具有十分重要的意义.

1 弹载毫米波阵列探测系统

弹载毫米波阵列探测系统采用一维线阵成像, 如图 1 所示. 将多元单片式探测器阵列线性地置于聚焦天线 (通常选用卡塞格伦天线) 的焦面, 利用馈源阵列的偏焦, 产生多个不同指向的高增益固定波束覆盖视场, 可以在同一时间内比较多个波束接收能量的差异. 图中, 阵列探测系统采用直线渐变缝隙天线 (LTSA) 馈源阵. 相对于波导馈源阵列, LTSA 波束窄、占用空间小, 易于集成, 非常适合于在多波

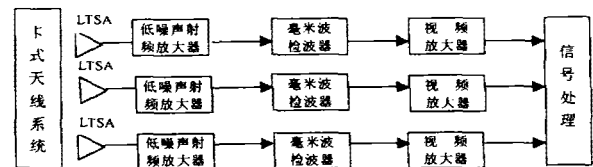


图 1 毫米波阵列探测系统原理图

Fig. 1 Principle figure of MMW array exploration system

* 国家科技预研基金 (批准号 99J5. 2. 3BQ0203) 资助项目
稿件收到日期 2001-10-30, 修改稿收到日期 2002-04-28

* The project supported by the Preliminary Research Foundation of National Defence (No. 99J5. 2. 3BQ0203)
Received 2001-10-30, revised 2002-04-28

束系统中做馈源阵列.通过合理设计馈源阵列间隔,兼顾天线空间分辨率和温度灵敏度,使馈源偏焦引起的扫描损失最小;合理设计 LTSA 的长度和厚度,保持馈源间的耦合在低电平来最小化交叉干扰.

以最简单的三元线阵为例.根据参考文献[1],当辐射计对地面金属目标扫描时,辐射计天线接收到的温度变化为 ΔT_a 为

$$\Delta T_a = \frac{G_0 H \Delta T_T}{4\pi} \int_{y_1}^{y_2} \int_{x_1}^{x_2} \frac{\exp\left\{-b \left[\arccos \frac{H \cos \theta_F + y \sin \theta_F}{(x^2 + y^2 + H^2)^{3/2}}\right]^2\right\}}{(x^2 + y^2 + H^2)^{3/2}} dx dy, \quad (1)$$

式(1)中 ΔT_T 为地面装甲目标与大地的温度对比度; y_1, y_2, x_1, x_2 为分别是装甲目标的坐标位置; θ_F 为辐射计天线波束与地面法线的夹角; H 为辐射计离地面高度; b 为天线的波束因子.

当三波束弹载探测系统扫过地面金属类目标,根据式(1)计算出各通道输出波形如图 2 所示,图中 t 表示扫描时间轴, v 表示波形幅值, D 为三波束扫描线在地面的参考位置.当目标中心在扫描线上方时,探测器输出波形如图 2(a)所示,当目标中心与扫描线中心重合时,探测器输出波形如图 2(b)所示.可见多波束阵列探测同一时间可获得多组接收能量信号,有

效地增加了波束在目标上的停留时间,从而能够有效地提高目标识别的概率及目标中心的定位精度.

2 直接检波式接收机

弹载体制对阵列探测系统接收机的性能及体积提出更高的要求.直接检波式接收机的出现主要依赖于近几年低噪声毫米波放大器单片集成电路的快速发展.其基本结构如图 3 所示.主要由毫米波 LNA(低噪声放大器)和毫米波检波器及视频放大器组成.由于直接检波式不需要本振,因此具有系统噪声低、直流功耗小、部件简单等优点.

本文对 8 mm 波段直接检波式接收机进行研究.毫米波低噪声放大器采用 InGaAs HEMTS 管 LNA 构成,其主要特性见表 1.数据显示了该 LNA 的噪声系数、增益等各项性能.采用 3 级或 4 级级联的方式即可构成满足要求的低噪声高增益射频放大器.

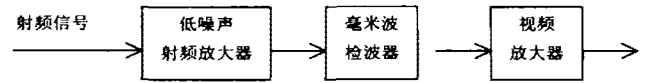


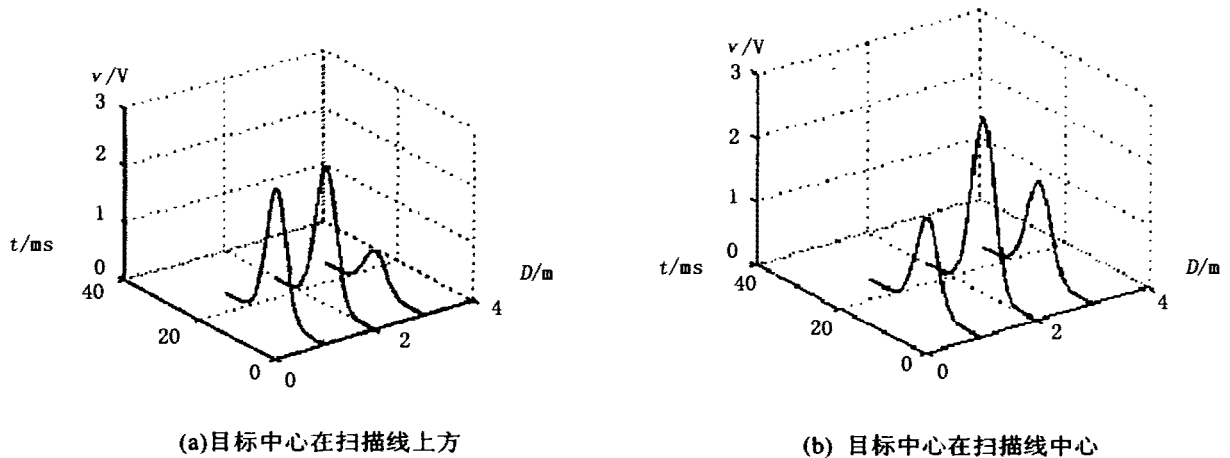
图 3 直接检波式接收结构

Fig.3 The configuration of direct detection receiver

表 1 InGaAs HEMTS 管 LNA 的主要特性

Table 1 Main characteristics of LNA

工作带宽	噪声系数	增益	增益平坦度	直流功耗	大小
30~40 GHz	3.0 dB	21 dB	±1.5 dB	60mA@3.5 V	1.72×1.08×0.10 mm



(a)目标中心在扫描线上方

(b) 目标中心在扫描线中心

图 2 多波束在目标不同位置的输出信号

Fig.2 Output signals of multi-beam detector at different position

(a) Scanning beam aiming at the center of target (b) Scanning beam above the center of target

毫米波检波器采用肖特基势垒二极管构成. 一般而言, 载频越高, 所需最小输入功率越大, 在 30 GHz 以上, 使用低电平检波器的毫米波接收机, 要求其最小输入功率达到 -45 dBm. 国内南京电子器件研究所于 1979 年研制成的 8 mm 低电平势垒二极管检波器的灵敏度可达 $T_{ss} = -54$ dBm, 可以满足通常的毫米波辐射计系统的要求. 检波器电路采用图 4 所示的单片式检波电路形式, 二极管与两个 Ta_2N 电阻及一个 Si_3N_4 覆盖式电容器集成在一块面积为 $500 \times 400 \mu m^2$ 的芯片上. 为使检波器电路和前级 HEMT 放大器工作协调一致, 检波二极管也可通过一个 HEMT 器件来构造, 即将 HEMT 器件的源极和漏极相连作为二极管的负极, 将栅极作为二极管的正极. 这样检波二极管就可直接和放大器相连以形成直接检波接收机.

3 系统参数分析设计

3.1 系统噪声系数和灵敏度

在无输入信号的情况下, 接收机输出端出现的噪声功率 W_m (检波前), 在对应的温度为有效噪声温度 T_m 时, 有

$$W_m = kT_m B, \quad (2)$$

式(2)中 B 为接收机带宽.

若 T_s 代表辐射计所测量辐射源信号的温度, 可认为 T_s 和 T_m 统计独立, 则系统总功率为

$$W_i = kB(T_s + T_m), \quad (3)$$

接收机的有效噪声温度 T_m 通常用接收机噪声系数 F_m 及其环境温度 T_0 来表示, 即

$$T_m = (F_m - 1)T_0, \quad (4)$$

式(4)表明, T_m 是接收机本身的附加噪声, 也是接收机输入和输出之间的信噪比降低的一个度量.

直接检波接收机采用毫米波 LNA 构成射频放大器, 则得到检波前的噪声系数为

$$F_{REC} \approx F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1} + \dots \quad (5)$$

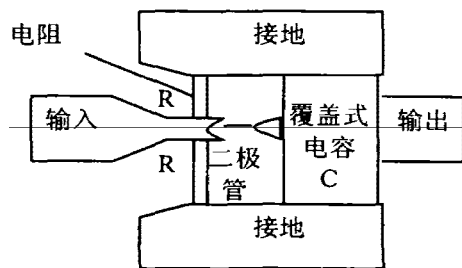


图 4 毫米波单片式检波器电路
Fig. 4 MMIC diode detector circuit

式(5)中毫米波放大噪声系数 $F_1 = F_2 = 3$ dB = 2, 放大增益 $G_1 = 21$ dB, 后面若还有第三片放大器, 其影响已可忽略. 带入式(5), 得到 $F_{REC} = 3.02$ dB. 设 $T_0 = 290$ K, 由式(4)得到接收机有效噪声温度为 291.3 K.

3.2 灵敏度

接收机内部噪声分量和增益起伏分量组成, 二者可认为是统计独立的, 因此辐射计灵敏度为

$$\Delta T_{min} = [(\Delta T_n)^2 + (\Delta T_G)^2]^{1/2} = (T_s + T_m) \left[\frac{1}{B\tau} + \left(\frac{\Delta G}{G} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (6)$$

式(6)中 T_s 为有效信号温度; T_m 为检波前噪声温度; B 为检波前系统总带宽; τ 为系统积分时间. 弹载条件下, 可以不考虑增益起伏带来的影响, 式(7)简化为

$$\Delta T_{min} = (T_s + T_m) / \sqrt{B\tau} = T_{sys} / \sqrt{B\tau}, \quad (7)$$

式中 $T_{sys} = T_s + T_m$.

由于 $T_s = T_a / L + (1 - \frac{1}{L}) T_0$, (8)

式(8)中 L 为天线及传输线的损耗, T_a 为天线温度, 因此有

$$T_{sys} = [T_a + (L - 1)T_0 + L(F_m - 1)T_0] / L. \quad (9)$$

设辐射计对地面金属目标探测时 T_a 动态范围约为 30 ~ 350 K; 积分时间 $\tau = 2$ ms; $L = 1.8$ dB; 环境温度 $T = 290$ K. 而直接检波式所用的带宽可达 6 GHz, 考虑到接收机整体部件的影响, 取系统带宽 B 为 2 GHz. 则由式(7)、式(8)和式(9)得到 T_{sys} 动态范围为 406 K ~ 620 K, 辐射计灵敏度小于 0.31 K.

3.3 射频放大器增益

接收机前端的增益设计对获得最佳系统特性具有至关重要的作用. 为了使辐射计的辐出电压精确地反映场景温度分布, 首先要求射频放大器具有良好的噪声系数, 第二检波器必须工作于平方律范围, 这就要求射频放大器将接收信号进行放大, 达到检波器输入信号要求, 则射频放大器的增益可由下式确定

$$G_{HF} = \frac{P_j}{KT_{sys}BF_m}, \quad (10)$$

式(10)中 P_j 为加至检波管上的功率; B 为系统带宽; F_m 检波前系统噪声系数 $F_m \approx F_{REC}$; T_{sys} 为系统噪声温度; K 为波尔兹曼常数. 根据前面的分析, 如果取检波器二极管输入功率为 -20 dBm, 将各项参数代入式(10)即可得到

$$G_{\text{HF}} = \frac{10^{-5}}{1.38 \times 10^{-23} \times 620 \times 2 \times 10^9 \times 2} = 52 \text{ dB}$$

考虑到其它附加损耗,取射频放大器增益为 60 dB. 因此采用 3~4 级毫米波低噪声 MMIC 构成射频放大器.

3.4 视频放大器带宽及增益

由辐射计积分时间 $\tau = \frac{1}{2B_n}$, 可得到视频放大器带宽为

$$B_n = \frac{1}{2\tau}, \quad (11)$$

将 $\tau = 2 \text{ ms}$ 代入式(11), 得到 $B_n = 250 \text{ Hz}$.

辐射计对地面金属目标探测时, 视频输入端电压 V_{in} 为

$$V_{\text{in}} = C_d K T_{\text{sys}} B F_m G_{\text{HF}}, \quad (12)$$

由前面可知 T_{sys} 范围为 406~602 K. 设 $C_d = 500 \text{ V/W}$ 代入式(12)得到视频放大器输入端的电压范围为: 4.1~6.3 mV. 若要求视频输出电压斜率为 10 mV/K, 则视频增益为

$$G_v = \frac{\text{要求的输出斜率}}{\text{输入斜率}} = \frac{10 \text{ mV/K}}{\left(\frac{6.3-4.1}{350-30}\right) \text{ mV/K}} =$$

31.6 dB,

视频输出电压范围为 $V_{0\text{min}} = V_{\text{min}} \times G_v = 6.0 \text{ V}$,
 $V_{0\text{max}} = V_{\text{max}} \times G_v = 9.2 \text{ V}$.

因为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, 为使视频噪声不阻塞视频放大器必须加以抑制, 这里的视频输入端引入一个补偿

电压为 -6.0 V, 则输出端电压从零升至为 3.2 V.

4 方案性试验及结论

根据上述原理电路及参数设计, 采用 3 级毫米波 LNA 构成毫米波射频放大器, 并应用卡塞格伦天线探测. 对 8 mm 直接检波式接收机进行方案性试验, 每级 LNA 可获得 13~15 dB 的增益, 样机检波前总增益为 51 dB, 噪声系数为 3.1 dB, 系统灵敏度 $\leq 1 \text{ K}$.

接收机高频前端基本决定了整个毫米波辐射计系统的性能指标. 得益于毫米波放大器单片集成芯片的发展, 本文设计的 8 mm 直接检波式接收机在噪声系数、温度灵敏度方面具有超外差式接收机无可比拟的优势. 其在结构上有小型化的特点, 进一步促进了毫米波阵列探测的实用化.

REFERENCES

- [1] LI Xin-Guo. *Millimeter Wave Near-sensing Tech. & Appli.* Beijing: National Defence Industry publishing House (李兴国. 毫米波近感技术及应用. 北京: 国防工业出版社), 1991.
- [2] ZHANG Yong. The research of passive millimeter wave imaging techniques. Ph. D. Dissertation of NUST (章勇. 被动毫米波成像技术的研究. 南京理工大学博士学位论文), 1999.
- [3] Dow G S, Ton T N, Wang H, *et al.* W-band MMIC direct detection receiver for passive imaging system. *IEEE MTT-S*, 1993, 41(1): 163-166.