

文章编号: 2095-4980(2019)02-0269-05

W 波段宽带辐射计

林富平, 潘 鸣

(中国电子科技集团公司 第五十研究所 太赫兹技术中心, 上海 200331)

摘 要: 以被动式毫米波成像为应用背景, 介绍了辐射计的工作原理, 成功研制了一种带宽 35 GHz 集成直接检波式辐射计原理样机, 以满足成像系统对辐射计的需求。信号由两级低噪声放大器进行放大, 再由检波器直接检波, 最后进行视频放大, 以提供足够高的信号供后端进行数据采集。放大器由两级低噪声放大器组成, 放大增益 40 dB。单独对检波器进行设计、测试, 在 75~100 GHz 范围内, 该检波器电压灵敏度大于 1 000 mV/mW, 在 100~110 GHz 范围内, 电压灵敏度大于 500 mV/mW。最后集成了一个整体辐射计模块, 该辐射计在 35 GHz 带宽内积分时间为 0.6 ms, 温度灵敏度为 0.45 K。

关键词: W 波段; 检波器; 宽带; 辐射计

中图分类号: TN914.42

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201902.0269

Design of W band broadband radiometer

LIN Fuping, PAN Ming

(Center of Terahertz Technology, The 50th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Shanghai 200331, China)

Abstract: The working principle of radiometer is introduced, and a principle prototype of 35 GHz bandwidth integrated direct detection radiometer is developed, in order to meet the demand for radiometer imaging system. The signal is amplified by a two-stage low noise amplifier which gains 40 dB, then directly detected by the detector, and finally amplified by video amplifier. The design and testing are performed separately to the detector, with detector voltage sensitivity at 75–100 GHz greater than 1 000 mV/mW, at 100–110 GHz greater than 500 mV/mW. A radiometer is completed. Response over 35 GHz band, integration time of 0.6 ms and temperature sensitivity of 0.45 K are achieved.

Keywords: W-band; detector; broadband; radiometer

毫米波的频率范围在 30~300 GHz 之间, 它的波长介于 1~10 mm, 毫米波波长短, 大气特性优于红外和光波, 它的电路体积小, 频带宽, 在雷达、制导、遥感、成像探测和通信等方面得到了广泛应用。目前, 国外毫米波成像技术比较成熟, 已有产品装备应用; 国内最近几年在毫米波成像领域也展开了广泛研究^[1-4], 但是和国外的差距还比较大。毫米波辐射计是毫米波成像系统的核心部件, 辐射计的前端往往由具备低噪声放大和检波处理功能的模块组成^[5]。国内对毫米波辐射计开展了广泛研究, 中国科学院微系统与信息技术研究所开展了中心频率 25 GHz、工作带宽 4 GHz 的直接检波式毫米波接收机研究^[6]; 南京理工大学开展了 8 毫米波差分混频接收机研究^[7], 中心频率 35 GHz; 中国工程物理研究院采用超外差的方式开展了 140 GHz 和 340 GHz 接收机的研究^[8-9]; 电子科技大学在 3 mm 波段开展了大量研究^[10-14], 工作带宽在 8 GHz 以内。本文介绍了一种覆盖 W 波段全频带(75~110 GHz)的集成直接检波式辐射计原理样机的研制及测试结果。该辐射计工作带宽达 35 GHz, 工作带宽比之前辐射计带宽的 4 倍还大, 覆盖 W 波段全频带, 具有较高实用价值。

1 辐射计原理

所有物体都会反射电磁波, 并将所吸收能量的一部分以电磁能量的形式向外辐射。相同的环境温度下, 由于不同物体有不同的辐射率, 辐射的能量也不同, 辐射计就是利用这个差异来探测和识别不同的物体。

温度灵敏度是辐射计的重要指标,它反映辐射计能检测出的输入噪声温度(亮温)的最小变化,对于全功率辐射计,其表达式为:

$$\Delta T = \frac{(T_a + T_R)}{\sqrt{B\tau}} \quad (1)$$

式中: T_a 为天线输出端的噪声温度; T_R 为接收机输入端的等效噪声温度,两者之和就是系统噪声温度; B 为检波前带宽; τ 为低通滤波器的积分时间。在噪声温度和积分时间一定的情况下,增加系统中检波前的带宽,能提高温度分辨力。

2 电路设计及测试结果

2.1 总体设计

整体电路见图 1。射频信号经过标准喇叭天线再经过波导到微带过渡波导共面线,由两级低噪声放大器放大,直接检波后变为直流信号,再由视频放大器放大。波导到微带过渡选用波导到共面波导过渡,采用共面波导方便和后面的放大器连接。放大器选用集成的单片芯片。检波器利用二极管的非线性伏安特性把放大器放大后的射频信号转变为低频信号。二极管的型号是 HSCH-9161 零偏置的肖特基二极管,检波器的设计过程就是设计二极管的输入输出匹配网络,实现信号的高效转换。视频放大器选用 AD 公司的 AD620。射频部分基片选用罗杰斯 5880,基片厚度为 0.254 mm,便于切割。

2.2 波导到共面波导过渡

波导到共面波导过渡见图 2,为了便于应用,采用了一个波导圆角拐弯,波导到微带过渡采用共面波导的探针过渡。共面线阻抗为 50Ω ,缝宽为 0.12 mm,导带为 0.34 mm。波导到共面波导过渡仿真结果见图 3,在 75~110 GHz 带宽范围内,反射小于 -25 dB,实现了 W 波段全频段转换。

2.3 低噪声放大器

低噪声放大器使用 CGY2190UH/C2,该款低噪声放大器是 OMMIC 产品,芯片尺寸为 $2 \text{ mm} \times 3 \text{ mm} \times 0.1 \text{ mm}$,工作频率为 75~110 GHz,典型噪声系数为 2.8 dB,是目前噪声系数较低的一款噪声放大器,典型增益为 23 dB,工作电压为 1 V,工作电流为 33 mA。芯片 S 参数见图 4,在频率 75~110 GHz 范围内增益在 20 dB 以上,低噪声放大器噪声系数见图 5。放大器采用两级芯片级联而成,中间用微带线连接,芯片的直流供电通过电容滤波并通过导线引出和电源相连。

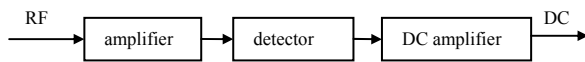


Fig.1 Direct detection broadband radiometer

图 1 直接检波宽带辐射计

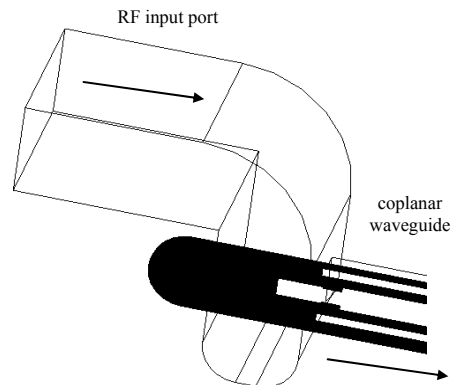


Fig.2 Transition structure from waveguide to coplanar waveguide

图 2 波导到共面波导过渡结构

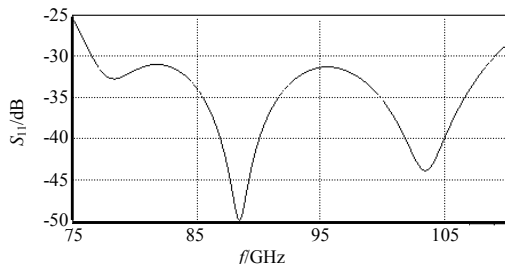


Fig.3 Simulation results of waveguide to coplanar waveguide transition

图 3 波导到共面波导过渡仿真结果

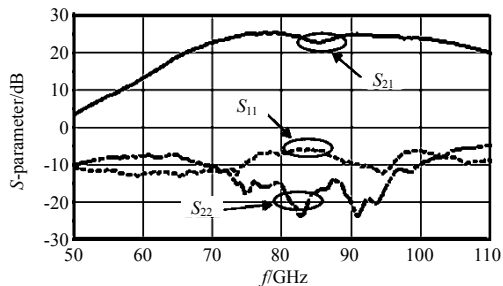


Fig.4 S parameters of low noise amplifier

图 4 低噪声放大器 S 参数

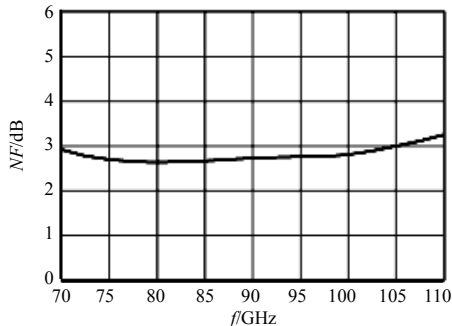


Fig.5 Noise figure of low noise amplifier

图 5 低噪声放大器噪声系数

2.4 检波器

W 波段检波器整体电路结构见图 6。波导为 R900 标准矩形波导。波导到微带过渡采用共面波导的探针过渡, 直流回路采用扇形支节回收 W 波段的射频信号, 通过调节高电感短路支节的长度及扇形支节的位置、大小和角度, 使反射系数最小。输入输出匹配采用微带阶梯阻抗匹配, 低通滤波器采用两级扇形支节。

本文所用检波二极管是 Agilent 的肖特基二极管, 型号为 HSCH-9161, 它可以用于 110 GHz 信号的检波, 其小信号模型见图 7。

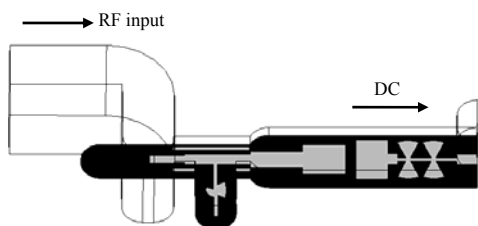


Fig.6 Model of W band detector
图 6 W 波段检波器的模型

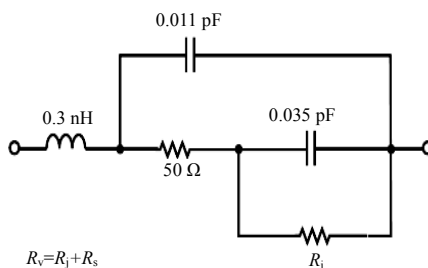


Fig.7 Small signal model of HSCH-9161
图 7 HSCH-9161 的小信号模型

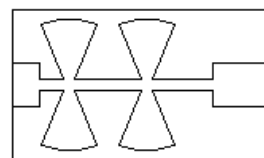


Fig.8 Low pass filter structure
图 8 低通滤波器结构

低通滤波器见图 8, 采用两级扇形支节, 并对高频能量进行回收利用。仿真结果见图 9。在 75~110 GHz 范围内, 仿真结果表明对高频信号的抑止达到 20 dB 以上。

二极管模型用集总参数代替, 调整输入匹配微带线长度、宽度, 及负载微带的长度、宽度, 检波器整体电路反射系数仿真结果见图 10, 在 75~110 GHz 范围内, 反射小于 -4.5 dB。

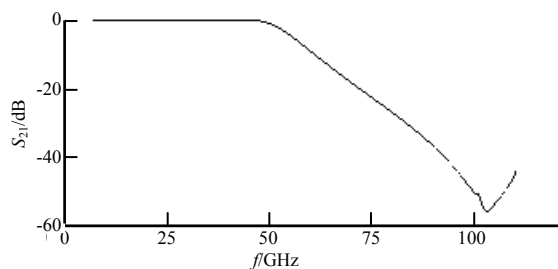


Fig.9 Simulation results of low pass filter
图 9 低通滤波器仿真结果

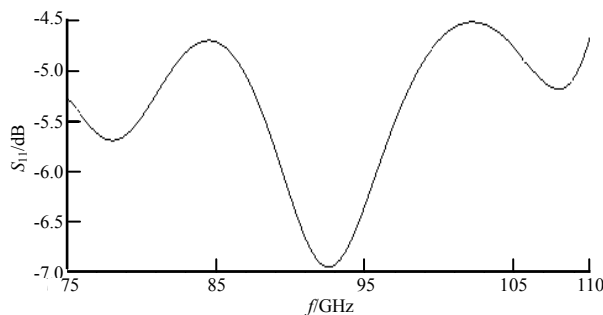


Fig.10 Simulation results of reflection coefficient of detector model
图 10 检波器模型反射系数仿真结果

检波器电路制作在介电常数为 2.2, 厚度为 0.127 mm 的 RT/Duriod 5880 基片上。输入端口采用标准的 R900, 输出端口为标准的 SMA, 接口检波器实物见图 11。检波器电压灵敏度测试曲线见图 12。

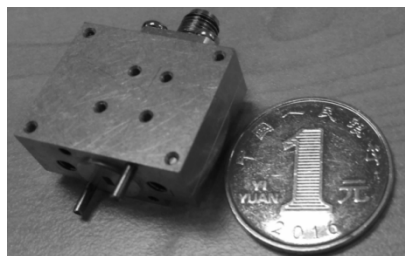


Fig.11 Detector object
图 11 检波器实物

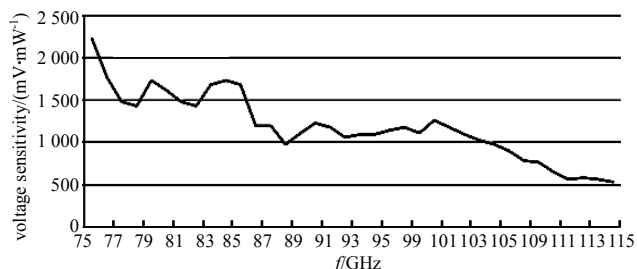


Fig.12 Testing curve of detector voltage sensitivity
图 12 检波器电压灵敏度测试曲线

2.5 视频放大电路

该电路先进行视频放大, 再单端转差分输出。视频放大器选用 AD 公司的 AD620, 该芯片输入电压噪声低 ($9 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$), 具有高精度(最大非线性度 40 ppm)、低失调电压(最大 $50 \mu\text{V}$)和低失调漂移(最大 $0.6 \mu\text{V}/0\text{C}$)特性, 功耗低(最大工作电流仅 1.3 mA)。单端转差分选用 AD 公司的 AD4922-1, 该芯片输入电压噪声 $12 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$, 输入阻抗高($11 \text{ M}\Omega$), 供电电流 10 mA。

3 测试结果

对直接检波宽带辐射计系统集成后组成原理样机^[15]进行测试。图 13 是辐射计实物图, 天线使用北京七宝的喇叭天线, 该天线增益有 20 dB, 驻波在 75~110 GHz 范围内小于 1.4, 接口为 WR-10 波导。图 14 为辐射计测试框图, 天线正对黑体辐射源, 辐射计差分输出端接到自制采集板。记录各组件输出直流量 U , T_a 和 T_b 分别为 a 和 b 测试点的温度, U_a 和 U_b 分别为 a 和 b 测试点的电压, U_{arms} 和 U_{brms} 分别为 a 和 b 测试点的均方根值, 利用式(2)计算辐射计温度灵敏度:

$$\Delta T = \frac{(U_{arms} + U_{brms})/2}{|U_a - U_b|/|T_a - T_b|} \quad (2)$$



Fig.13 Picture of radiometer
图 13 辐射计实物



Fig.14 Diagram of the radiometer test
图 14 辐射计测试框图

辐射计积分时间设置为 0.6 ms, 黑体辐射源温度从 200 °C 到 260 °C 每 20 °C 测一次, 辐射计电压灵敏度见图 15, 电压灵敏度大于 4.5 mV/K, 温度灵敏度见图 16, 小于 0.45 K。

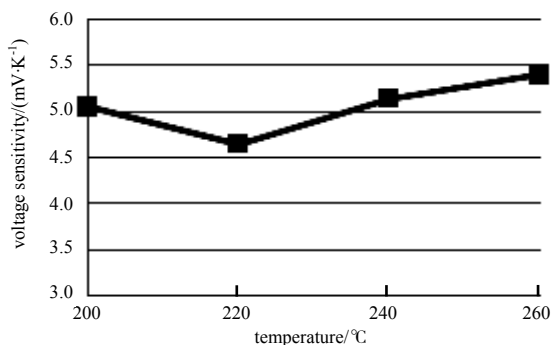


Fig.15 Voltage sensitivity
图 15 电压灵敏度

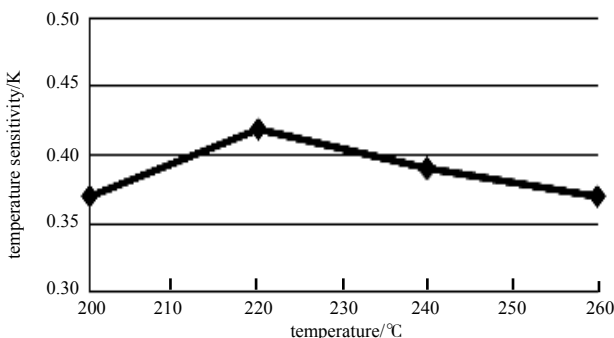


Fig.16 Temperature sensitivity
图 16 温度灵敏度

4 结论

本文研究了 W 波段全频段直接检波式辐射计的工作原理, 研制出 75~110 GHz 全频带辐射计原理样机, 做了温度测试试验, 具有一定的实用价值, 为实现被动阵列毫米波成像打下了基础。

参考文献:

- [1] 张光锋,张祖荫,郭伟. 3 mm 波段辐射成像研究[J]. 红外与毫米波学报, 2005,24(6):422-426. (ZHANG Guangfeng,ZHANG Zuyin,GUO Wei. Research on 3 mm band radiometric imaging[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2005,24(6): 422-426.)
- [2] 向博. 毫米波亚毫米波电路与成像技术研究[D]. 南京:东南大学, 2013. (XIANG Bo. Research on circuit and imaging system at millimeter and sub-millimeter wavebands[D]. Nanjing,Jiangsu,China:Southeast University, 2013.)
- [3] 成彬彬,李慧萍,安健飞,等. 太赫兹成像技术在站开式安检中的应用[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2015,13(6): 843-848. (CHENG Binbin,LI Huiping,AN Jianfei,et al. Application of terahertz imaging in standoff security inspection[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2015,13(6):843-848.)
- [4] 李良超,杨建宇,姜正茂,等. 3 mm 辐射成像研究[J]. 红外与毫米波学报, 2009,28(1):11-15. (LI Liangchao,YANG Jianyu,JIANG Zhengmao,et al. Research on 3 mm band radiometric imaging[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2009, 28(1):11-15.)
- [5] SCHULMAN J N,KOLONKO V,MORGAN M. W-Band direct detection circuit performance with Sb-heterostructure diodes[J]. IEEE Microwave and Wireless Component Lettters, 2004,14(7):316-318.

- [6] 关福宏,王闯,田为中,等. 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. (GUAN Fuhong, WANG Chuang,TIAN Weizhong,et al. Development of MMIC direct detection receivers[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2007,26(2):125-128.)
- [7] 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, 2013,17(4):141-144. (LOU Guowei, LI Xinguo,NING Jun. Research on high speed scanning full power millimeter wave radiometer[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2013,17(4):141-144.)
- [8] 王成,刘杰,吴尚昀,等. 140 GHz关键射频组件研究[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2011,9(5):564-568. (WANG Cheng, LIU Jie,WU Shangyun,et al. Research of 140 GHz critical RF components[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2011,9(5):564-568.)
- [9] 王成,陆彬,缪丽,等. 0.34 THz无线通信收发前端[J]. 强激光与粒子束, 2013,25(6):1530-1534. (WANG Cheng,LU Bin, MIAO Li,et al. 0.34 THz T/R front-end for wireless communication[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013,25(6): 1530-1534.)
- [10] 刘江,王玲. W波段超宽带高速脉冲检波器[C]// 第十六届全国青年通信学术会议. 杭州:[s.n.], 2011:203-205. (LIU Jiang,WANG Ling. A broad band high speed pluse detector at W-band[C]// The Sixteenth National Symposium on Youth Communications. Hangzhou,China:[s.n.], 2011:203-205.)
- [11] 宋俊霖. 3毫米放大检波电路研究[D]. 成都:电子科技大学, 2013. (SONG Junlin. Reserch for the 3 mm preamplied detection receiver circuit[D]. Chengdu,Sichuan,China:University of Electronic Science and Technology of China, 2013.)
- [12] 马晓星. 三毫米接收关键技术研究[D]. 成都:电子科技大学, 2009. (MA Xiaoxing. Reserch on 3 mm crictical receiver technology[D]. Chengdu,Sichuan,China:University of Electronic Science and Technology of China, 2009.)
- [13] 宋伟. 毫米波检波器的研究与设计[D]. 成都:电子科技大学, 2007. (SONG Wei. Reserch for millimeter wave detection[D]. Chengdu,Sichuan,China:University of Electronic Science and Technology of China, 2007.)
- [14] 白雪松. W波段微带集成检波器的研究[D]. 成都:电子科技大学, 2008. (BAI Xuesong. Reserch for W-band microstrip integration detection[D]. Chengdu,Sichuan,China:University of Electronic Science and Technology of China, 2008.)
- [15] 彭树生,吴礼,殷兴辉,等. 3 mm波段辐射计特性参数的测试[J]. 红外与毫米波学报, 2007,26(2):129-132. (PENG Shusheng, WU Li,YIN Xinghui,et al. Characterietic parammeters measurement of a 3 mm band radiometer[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2007,26(2):129-132.)

作者简介:



林富平(1972-),男,重庆市人,工程师,硕士,主要研究方向为微波毫米波亚毫米波辐射计.email:674115353@qq.com.

潘 鸣(1958-),男,河南省新乡市人,教授,博士生导师,主要研究方向为信号检测与处理、电磁探测定位系统、通信系统、光电遥感系统.