

文章编号:1001-9014(2011)01-0038-04

3mm 波电磁特性测量雷达

张永鸿, 林 权, 樊 勇, 邹 林, 李良超, 杨建宇
(电子科技大学 电子工程学院, 四川 成都 611731)

摘要: 为了对非静止的烟幕进行插损、反射、辐射等电磁特性的测量, 采用锁相技术研制了 3mm 波雷达反射截面积 (RCS) 测量雷达和 3mm 波辐射特性测量雷达 (辐射计)。前者采用收发分置的连续波双天线体制, 可根据目标尺寸和反射的大小更换天线; 采用毫米波固定衰减器和远近程切换, 以及 FFT 积累的数字接收, 提高灵敏度和动态范围。后者是超外差中频迪克式体制, 用硬件和软件积分相结合的方式保证灵敏度。系统每 2ms 可给出一个测试结果, 实现了动态测量。

关键词: 毫米波; 雷达; 锁相; 烟幕; 雷达反射截面积; 辐射计
中图分类号: TN85 **文献标识码:** A

3mm wave electromagnetic characteristic measurement radar

ZHANG Yong-Hong, LIN Quan, FAN Yong, ZOU Lin, LI Liang-Chao, Yang Jian-Yu
(School of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology, Chengdu 611731, China)

Abstract: For measuring insertion loss, reflection and radiation of smoke screen, a 3mm wave electromagnetic characteristic measurement radar has been fabricated, which comprises a 3mm wave radar cross section (RCS) measurement radar and a 3mm wave radiometer. The transmitter and receiver of the former are separated, and each antenna of them can be chosen among three kinds of antennas with different beam width or gain, according to the sizes of object and the power of reflection signal. In order to fit the tremendous changes of power between transmission and reflection, the sensitivity and the dynamic range of the system is improved by millimeter wave fixed attenuator, switching between long range and short range, and digital intermediate frequency (IF) receiver with signal accumulating by Fast Fourier Transform Algorithm (FFT). In the 3mm wave super-heterodyne IF Dicke-radiometer, hardware integral and soft integral are both used to achieve high sensitivity. All the millimeter wave oscillators in the system are phase-locked. The interval between two adjacent data is 2ms, which is suitable for suspending and movable smoke screen.

Key words: millimeter wave; radar; phase-lock; smoke screen; radar cross section (RCS); radiometer
PACS: 84.40.Xb

引言

毫米波具有波长短、频段宽等特点, 使它在遥感、雷达与制导等领域取得了广泛的应用。现代战争中, 对抗各种主动、被动以及主被动复合式毫米波制导武器, 释放烟幕是一种方便而经济的有效方法。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; 另一方面, 烟幕本身的反射也可能淹没目标本身的反射, 而烟幕覆盖的区域较大, 从而掩护了目标。对被动式毫米波探测

设备 (辐射计), 烟幕本身的辐射特性掩盖了真实目标的辐射特性。烟幕的这 3 个方面作用都能达到隐蔽、保护目标的目的。常用的烟幕有箔条云、石墨等柔性目标, 通过炮弹发射爆炸或静爆产生, 也可通过鼓风机实现。这些柔性目标悬浮在空气中, 会随着重力和空气流动不断运动, 因而其特性也在不断变化。

为了测试烟幕的毫米波电磁特性, 已有一些设备研制成功。1995 年赵洁等^[1]报道用 HP8363A 扫频源等通用测试设备搭建了一个 8mm 波段的 RCS 调频连续波测试系统, 用于对箔条云的测试, 其灵敏度为 -97dBm, 动态范围优于 79dB。2004 年关华

收稿日期: 2010-02-21, 修回日期: 2010-06-18

基金项目: 国家自然科学基金资助重点项目 (60632020)

作者简介: 张永鸿 (1970-), 男, 四川夹江人, 教授, 博士, 主要研究方向为微波毫米波技术及应用, E-mail: zdhzyhcm@163.com.

Received date: 2010-02-21, revised date: 2010-06-18

等^[2]报道采用 8mm 波和 3mm 波的噪声发生器对可膨胀石墨的衰减特性进行了测量。2006 年彭树生等^[3]报道了测试烟幕在 3mm 波段电磁特性的一体化雷达,包含辐射计和衰减率测试系统。该系统的收发装置只是对接收的中频进行锁相,而没有对发射和本振进行锁相,因而频率稳定度差,达 $5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 。发射采用雪崩振荡器,输出功率 16mW。该系统没有谈及用于 RCS 测试。系统中的辐射计采用超外差式,本振未锁相,射频带宽仅 2.2GHz。辐射特性和衰减测试时的积分时间长达 1s,不太适合运动目标的测试。

1988 年,国外 Zoeller RG. 等人报道了^[4]用水银灯照射气室中的石墨等悬浮物来分析悬浮物的毫米波传输特性,实现方式是基于光学理论。未见其它更相关的报道。

本文研制的 RCS 测量雷达采用 FFT 积累,有效提高了灵敏度,适合进行 RCS 测量;采用毫米波的固定衰减器和远近程切换,提高了动态范围,能够兼顾 RCS 和衰减的测量。辐射计采用超外差中频迪克式。整个电磁特性测量雷达采用了毫米波锁相技术,每 2ms 测试一个值,更适合对悬浮的非静止目标进行测试。

1 系统体制

根据测试要求和现有技术条件,系统体制考虑如下:

1) RCS 发射机与接收机分置,这样同一套系统既可以进行后向散射测量,又可以进行前向穿透衰减测量。

2) 由于目前在 3mm 波产生大功率比较困难,且成本较高,而国外又禁运,所以采用连续波体制,减小发射功率,用国内的 Gunn 器件就可以满足要求。另外系统采用的是双天线结构,可以解决收发的隔离问题。

3) RCS 测试中的反射信号非常弱,需要采用信号积累。由于收发分置,不便进行相参积累;所以采用 FFT 准相参积累的数字化接收机,改善灵敏度,提高动态范围。另外,反射信号功率与距离的四次方成反比,所以采用了远近程切换来改变接收机的增益,进一步提高动态范围,适应在不同距离上的回波信号功率。

4) 传输测试时,信号功率与距离的平方成反比,因而在相同距离上比 RCS 测试时的信号大得多。此时在接收机的输入口加入一个毫米波的固定

衰减器,提高动态范围,避免接收机饱和。

5) RCS 测试时,烟幕等目标必须在天线主波束 3dB 波束宽度的覆盖范围内,而这个范围与目标和测试设备的距离有关。为了适应不同距离上的测试,系统考虑用不同波束宽度的天线,根据目标的尺寸和与设备的距离来选择天线。

6) 为了便于对准和操作,系统提供可进行水平和俯仰调节的三脚架。另外还提供光学望远镜,其瞄准准线与天线电轴平行。

7) 辐射计采用超外差中频迪克式体制。3mm 波的低噪声放大器难以获得,因而该辐射计只能采用超外差式。这时前端的噪声较大,如果在毫米波加迪克式单刀双掷开关,将使系统噪声增加较多,因而在中频用迪克式开关。与 RCS 测试不同,辐射特性测试中目标应该比天线的 3dB 波束覆盖范围大,也需要根据实际情况更换天线。

2 系统方案

3mm 波锁相源是系统中的关键,它基于双环数字锁相实现。其中的毫米波组件是关键中的关键,由毫米波的谐波混频器和毫米波压控振荡器(VCO)组成(见图 1)。毫米波 VCO 是双端口二次谐波振荡器,它是基于“基波振荡、谐波提取”技术实现。其谐波端口输出 3mm 波的信号,功率大于 10mW,能够作为发射源或毫米波混频器的本振;而它的基波端口同时输出几毫瓦的 6mm 波信号,可以作为毫米波谐波混频器的射频输入。该信号在谐波混频器中与微波锁相源的谐波混频,得到中频信号;这个中频信号经过放大后在毫米波锁相电路中,与晶振信号鉴相得到误差信号,最后控制毫米波 VCO 的工作频率。关于该锁相的相关分析和典型的实验结果,可以参考文献[5]。

RCS 接收机的框图见图 2,采用直接混频方式,通过两次混频得到 30MHz 的中频。在一中频,远近程切换由外部的 TTL 电平控制,在固定衰减和直通两条通路之间切换,从而改变接收机的增益。在二次混频前加带通滤波器是为了抑制镜频噪声,而二本振由毫米波锁相源中的微波锁相源分频得到,以便减小成本。

数据采集模块先对中频进行 A/D 采样,再进行数字下变频和二次抽样,减小数据的存储容量,然后通过 USB 接口写入工控机(计算机)硬盘中。工控机完成数据存储、处理和显示等主要任务,以及参数设置、启动触发和工作方式切换等操控任务。数据处理

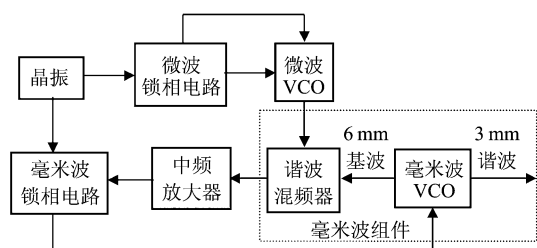


图1 3mm 波锁相源框图
Fig.1 Block diagram of 3mm wave phase-locked oscillator

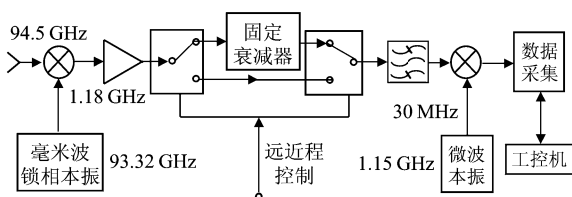


图2 3mm 波 RCS 接收机框图
Fig.2 Block diagram of 3mm wave RCS receiver

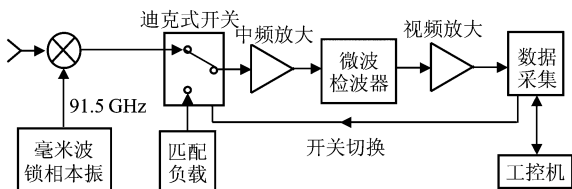


图3 3mm 波辐射计框图
Fig.3 Block diagram of 3mm wave radiometer

时进行准相参积累,每 2ms 给出一个处理结果.准相参积累用 FFT 完成,将测量时域信号幅度变化转变为频率分量幅度的变化,提高在低信噪比情况下的 RCS 测试精度.

3mm 波辐射计框图见图 3.从天线接收到的外界物体辐射的信号先经过混频变换到微波,通过迪克式开关,再放大后检波成近直流的视频信号进入数据采集模块.数据采集模块产生开关切换信号控制迪克式开关在信号和负载之间切换,有用信号是它们的差值,这样可以消除中频放大器之后通路的低频干扰,尤其是增益的波动;这对辐射计中高增益的中频通道尤其重要.

数据采集模块对信号进行电压校正(偏置补偿电路)、硬件积分和 A/D 变换.其中的 FPGA 电路完成数据格式的转换,以及向 USB 控制器之间的数据通信;另外还通过 USB 接口与工控机互传控制指令,完成相应的控制.工控机完成去噪、校正、软件积分等数据处理,以及显示等功能.

为了能测量目标的绝对辐射温度,系统提供 3mm 波的标准定标源,可以在手动或计算机控制下输出多点的标准辐射温度,便于定标和检测系统的

线性度.

3 实验结果

研制的 3mm 波 RCS 测量雷达见图 4,系统中选用的温补晶振在 $-10 \sim 70^{\circ}\text{C}$ 范围内频率稳定度为 $\pm 1.5 \times 10^{-6}$.发射机的输出功率为 14.8mW.接收机前端的输出 1dB 压缩点为 10dBm,在近程状态下的增益为 53.5dB(含毫米波混频器的变频损耗),而远程状态下增益为 82dB.系统提供 $4^{\circ} \times 4^{\circ}/7^{\circ} \times 7^{\circ}/10^{\circ} \times 10^{\circ}$ 三种天线,其增益分别为 30dB/27dB/25dB.

在衰减率测试时,近程极限情况下收发间距为 4m.用 Friis 公式可以求得这时接收到的最大信号(收发都采用 4° 天线)为 -12.3dBm ,远大于近程时接收机的 1dB 压缩点 -43.5dBm ,考虑在接收机的天线输出口加 3mm 波的固定衰减器解决.固定衰减器为自制,用标网测得其反射损耗大于 17dB,插损为 33.8dB,能够解决接收机的饱和问题.

为了测试接收机的灵敏度,把接收机和发射机天线卸下,用三个衰减器级联连接.在工控机上用软件检测 FFT 后的谱线,调节衰减器至接收机刚好能够从噪声中分辨出信号为止.根据发射机发射功率、衰减器的衰减,可计算得到接收机的灵敏度为 -119.3dBm .结合自制 3mm 波固定衰减器的衰减量,可以求得接收机的动态范围已达到 109dB.

RCS 测试时,接收机和发射机相距很近,收发之间的泄漏可能大于反射,对测试结果产生较大影响.为了减小收发泄漏,设计了收发共置平台.把接收机和发射机固定在平台上后,在未开发射机时,测得的接收机输出噪声功率折算到天线输出口是 -115.5dBm (此功率高于接收机灵敏度,是因为系统有积累增益);打开发射机后,调节三角架俯仰,使系统指向冷空,测到的功率与未开发射机时相当,说明收发泄漏已可以



图4 3mm 波 RCS 测量雷达照片
Fig.4 The photo of 3mm wave RCS radar

忽略。

该系统经受了从冬至夏天、室内到野外、衰减测试和 RCS 测试等各方面的考验,达到了设计目的。野外测试的目标烟幕与文献[6]类似。

研制的 3mm 波辐射特性测量雷达见图 5 左边,系统中迪克式开关切换周期是 2ms;射频带宽为 4.4GHz;为了减小 RCS 发射机的干扰,在中频加有带阻滤波器。图 5 右边是 3mm 波定标源,它可以手动设置 6 个温度点:273K、303K、333K、363K、393K、423K;如果用计算机控制,可以设置任意的温度点。图 6 是定标过程中定标源输出亮温先从 303K 变到 363K,再变到 423K 的定标曲线。因为图中给出曲线时尚未完成定标,所以纵坐标不是实际的亮温,只与实际亮温有一个比例关系。在上述三个温度点分别测出 5 个“亮温”值,结合定标曲线,求得系统的温度灵敏度为 1.88K。

用定标后的系统测量了部分物体的亮温,包括衣服、水、砖头、书、人体等等,还对手枪、窗户进行了成像实验,达到了设计目的。

4 结论

采用毫米波锁相源研制的 3mm 波 RCS 测量雷达,通过更换天线来适应不同距离上不同大小的目标。用 FFT 积累的数字接收机,以及远近程切换和毫米波的固定衰减器、收发共置平台,改善了系统的灵敏度,提高了动态范围,使系统能同时适用于反射和传输测试。配定标源的辐射计能够测量物体的绝对亮温,也能用于成像。由这两套设备组成的电磁测量雷达能够在 2ms 内输出一个测试结果,适用于对非静止的悬浮目标进行测试。实验结果表明,研制的

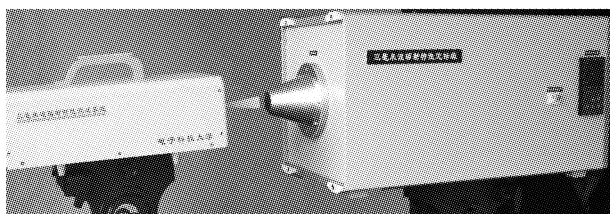


图 5 3mm 波辐射特性测量雷达和定标源
Fig. 5 3mm wave radiometer and calibration source

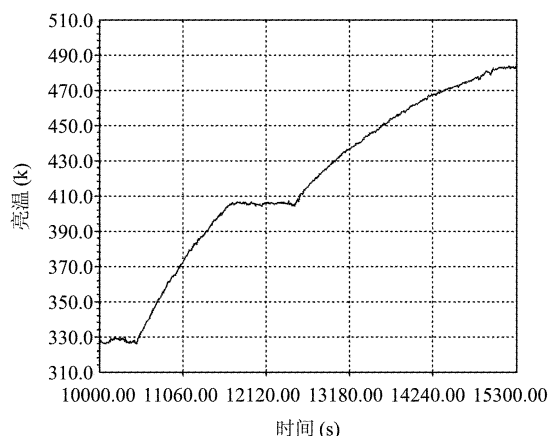


图 6 3mm 波辐射特性测量雷达定标曲线
Fig. 6 Calibration curve of 3mm wave radiometer

设备达到了设计要求,在频率稳定度、灵敏度、实时性等方面超过已查到的相关设备。

REFERENCES

- [1] ZHAO Jie, MIN Jiang. Study on measurement technique of millimeter wave RCS[J]. *Electro-Optics & Passive countermeasures*. (赵洁, 闵江. 毫米波段 RCS 测试技术研究. 光电对抗与无源干扰), 1995, 10(1): 14—23.
- [2] GUAN Hua, PAN Gong-Pei, JIANG Li. Study on attenuation performance of expanded graphite at the bands of 3mm and 8mm[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (关华, 潘功配, 姜力. 膨胀石墨对 3mm、8mm 波衰减性能研究. 红外与毫米波学报), 2004, 23(1): 72—76.
- [3] PENG Shu-Sheng, ZHAO Gang-Feng, GUO Jian-Guang, et al. Insertion loss measurement of smoke screen at 3mm band[J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology* (彭树生, 赵刚锋, 郭建广, 等. 3mm 波段烟幕插入损耗测量. 南京理工大学学报), 2006, 30(5): 626—629, 652.
- [4] ZOELLER R G, UGRAS N G, MOLLER K D. Fourier transform spectrometer for the 1 to 10 mm region[J]. *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 1988, 9(5): 497—504.
- [5] ZHANG Yong-Hong, FAN Yong, WU Zheng-De. Millimeter wave phase-locked loop with mixer[J]. *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2007, 28(4): 299—304.
- [6] WU Yu, YIN Xi-Feng, CUI Jian-Lin, et al. Application of expandable graphite in explosive dispersion pyrotechnic composition[J]. *Initiators & Pyrotechnics* (吴昱, 尹喜凤, 崔建林等. 可膨胀石墨在爆炸分散型发烟剂中的应用. 火工品), 2004, 15(2): 27—29, 35.