

多功能微波功率检测模块设计

孙 颀¹ 周 康¹ 刘张伟²

(1.南京电子技术研究所 南京 210039; 2.南京94994部队 南京 210017)

摘要: 对于大多数射频微波系统,微波功率都是一个必不可少的评价指标。对于中小型的微波功率源系统,为满足系统的可测试性,往往需要增加对输出功率的量化检测,但使用仪表功率计则价格昂贵。详细介绍了一种简单、实用、经济性好的微波功率检测模块设计方法。该方法使用线性检波、采样保持、数据采集及软件校准等方法,实现了较高精度的峰值功率、调制脉冲功率信号脉冲重频及脉宽的检测,并通过试验将测试数据与功率计及示波器实际测量对比,验证了使用该方法研制模块测试精度。

关键词: 微波功率检测;采样保持;脉冲检波包络;数据采集; π 型衰减

中图分类号: TN98 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8040

Design of multifunctional power microwave power detection module

Sun Ting¹ Zhou Kang¹ Liu Zhangwei²

(1. Nanjing Research Institute of Electronics Technology Nanjing 210039, China; 2. PLA Unit 94994 Nanjing 210017, China)

Abstract: For most RF microwave systems, microwave power is an essential evaluation index. For small and medium microwave power source systems, in order to meet the testability of the system, it is necessary to increase the quantitative detection of the output power. In this paper, a simple, practical and economical design method of microwave power detection module is introduced in detail. The method realized the detection of the high precision peak power, pulse repetition frequency and pulses width by linear detection, sample hold, data sampling and software calibration methods. The test data are compared with the actual measurement of power meter and oscilloscope, and the measurement precision of the module developed by this method is verified.

Keywords: microwave power detection; sample and hold; pulse envelope; data sampling; PI attenuation

1 引言

微波功率放大器在雷达科技、广播电视、通信、高能物理等等领域具有广泛的应用^[1],对于大多数微波功率放大器系统微波功率的测量,一般使用仪表功率计完成功率值的量化评估,但对于中小型系统,仪表功率计的价格会大大增加系统成本;且一般仪表功率计在温度、电磁兼容性条件恶劣的应用场合,性能显著下降,甚至无法工作;此外,一般的功率测试仪表并不能完成射频调制脉冲频率、脉宽等波形参数的测量。这就要求能够设计一种价格低廉,精度满足评价要求,环境适应性好,不但能够检测功率,还能观测微波调制脉冲检波包络信号,完成微波调制脉冲信号的频率、脉宽检测的多功能微波功率检测模块^[2]。

2 常用的微波功率检测方法

目前常用的微波功率检测方法有辐射热测量、热电偶

法以及晶体管检波的方法。辐射热测量法利用对温度极为敏感的电阻器件,当吸收微波功率后,温度便会升高,阻值便会发生变化,通过测量阻值的变化确定所吸收的功率;热电偶法利用库贝克效应:当两种不同金属的节点温度被加热到高于其余两个自由端的温度时,在两个自由端之间便会出现直流电势,其大小与冷热端的温差成正比,微波功率流过产生热效应,引起直流电势的线性变化,通过检测电流的变化,确定所流过功率大小;晶体管检波法即是通过微波功率检波峰值取样来获取微波功率的大小。

3 多功能微波功率检测方案

在雷达系统上,一般微波功率多为高频微波脉冲方式,对于发射机输出的功率信号一般需要测量微波峰值或平均功率、脉冲波形参数,包括检波包络的频率、脉宽、前后沿和脉间抖动等参数。因此辐射热测量,热电偶法均是利用微波功率流过负载产生的热效应来完成功率测试,因此并不

能同时完成高频微波脉冲的检波包络波形测量,因此在设计多功能微波功率检测模块时采用晶体管检波的方法来实现,只要能够选择一款带宽大、检波精度高、线性度好的检波器,再辅以软件校准,即可满足相对较高的精度需求,达到功能强大、廉价、精度满足使用要求的需求。

多功能微波功率检测模块由两个部分组成,一个部分是高频微波信号的检波及处理电路;一个部分是信号采样处理部分。原理框图如图 1 所示。

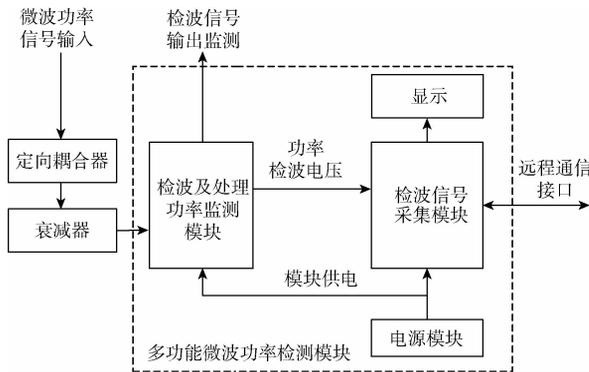


图 1 多功能微波功率检测模块原理

微波功率信号首先进入检波及处理模块,由检波及处理模块完成射频信号的衰减、检波及幅度保持。由于高速 A/D 采样电路设计复杂,价格较高,因此在检波及处理模块中完成了采样保持电路,如果微波功率信号为脉冲调制信号,则采样保持电路会将检波信号的检波幅度峰值保持,使得无论输入端信号是连续波信号还是脉冲调制信号,经过检波及处理模块后均变为与输入信号峰值成线性关系的直流电压信号,该直流电压信号经过检波信号采集模块数字化即可用于显示和远程监控。

4 多功能微波功率检测模块设计

4.1 检波及处理模块设计

检波及处理模块是核心电路,负责完成输入微波功率信号的衰减、信号线性检波、检波信号线性放大和检波信号的采样保持 4 个功能。

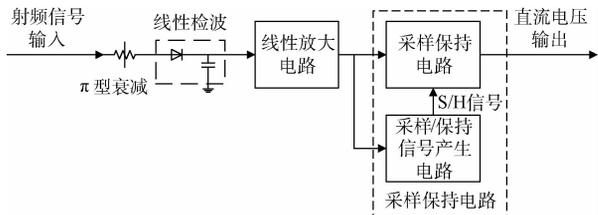


图 2 检波及处理模块原理框图

1) 微波功率信号的衰减

大功率微波信号经过定向耦合器后进入微波检测模块,由于线性检波器的线性度在线性区间内比较好,因此在

为一个系统设计微波功率检测电路时,就必须计算衰减量以使得进入线性检波器的微波信号功率落在检波器的线性区间之内,即 $P_{\text{检波入}}$ 落在线性检波器的线性区间之内即可^[3]。

$$P_{\text{检波入}} = P_{\text{out}} - A_{\text{耦合}} - A_{\text{衰减}} \quad (1)$$

$P_{\text{检波入}}$: 线性检波器输入功率值

P_{out} : 功率源输出功率值

$A_{\text{耦合}}$: 定向耦合器耦合衰减功率值

$A_{\text{衰减}}$: 检波及处理模块内部衰减功率值

常用的微波衰减电路有 π 型和 T 型衰减电路两种^[4-5], 在本文的设计中采用了 π 型衰减电路,如图 2 所示。

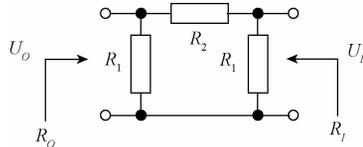


图 2 π 型衰减电路

π 型衰减电路的电阻计算公式如式(2)所示:

$$R_1 = R_0 \frac{\frac{U_o}{U_i} - 1}{\frac{U_o}{U_i} + 1} \quad R_2 = R_0 \frac{2 \frac{U_o}{U_i}}{\left(\frac{U_o}{U_i}\right)^2 - 1} \quad (2)$$

一般 R_0 和 R_i 选择 50Ω , 利用式(2)或使用查表的办法即可计算出 R_1 和 R_2 的电阻取值,从而设计出合适的衰减器。

2) 信号线性检波

射频信号检波器其特性主要有频率响应、灵敏度、线性和易用性 4 个方面。射频信号频率是选择检波器时最先考虑的参数。一般对于雷达、广播电视等方面应用的频率源都有一定的带宽要求,尤其是随着合成孔径雷达(SAR)的发展,对雷达射频信号带宽的需求不断增加,最大甚至可达 8 GHz 或更高,因此对于射频信号的检波管带宽的要求也不断增加;为了尽量减小后续软件校准的压力,在微波信号检波的线性度方面也有较高的要求,一般检波管在信号的一定范围内具有较好的线性度,超出线性区间,则线性度变差,因此在明确信号输入的大概范围后,需要依据检波管的线性区间调整输入信号的衰减量;灵敏度主要是指在非常低的输入信号加到输入时,检波器返回有用信息的能力,通常与后端信号调理及采集统一设计,一般大功率微波功率源功率取样多通过定向耦合器耦合,且功率信号功率一般较高,因此灵敏度的指标相对要求较低;微波功率检测模块作为一个功率检测的传感器,要求尺寸尽可能小,因此一般要求检波器的体积尽可能小,因此多选用单片集成检波器,这样既可以减小体积也可以保证满足大功率微波功率源功率信号检测的需求。由于检波的输出需要作为指标测试的检测端口输出,因此对于微波脉冲工作的检波输出电路,要求输出阻抗尽可能小以满足脉冲前后沿的要求,但同时也

要兼顾信号的幅度,因为如果幅度较低,后端调理电路的放大倍数过高则会导致信号的非线性失真,影响微波功率信号的检测精度。

3) 检波信号线性放大

检波信号为了保证信号前后沿特性,一般输出阻抗较小,使得信号幅度较低,为了保证后端采样电路和采样保持电路能够更好的进行采样,需要对检波信号进行放大,但放大电路的设计必须保证信号的完整性,即信号的幅度,脉冲信号的上升下降时间必须与输入信号保持一致,不能失真。

4) 检波信号的采样保持

脉冲信号必须进行采样保持,否则后端采样电路的成本及复杂性将大大增加。采样保持电路必须有两个部分组成。一是采样保持电路;二是采样/保持信号产生电路。采样保持电路的设计首先必须保证足够小的建立时间以满足微波窄脉冲的采集要求^[6];其次需要具有很低的衰减率,即在保持过程中,随着时间的推移,幅度下降很小。采样/保持信号产生电路是采样保持电路的关键,主要是一个比较器电路和时序产生电路组成。但比较器参数的选择非常重要,参考电平过低则容易受到干扰,过高则使得微波功率检测灵敏度较差,因此必须遵循满足电磁兼容性要求的前提下,比较参考尽量小。时序产生电路必须满足如图 3 所示时序。

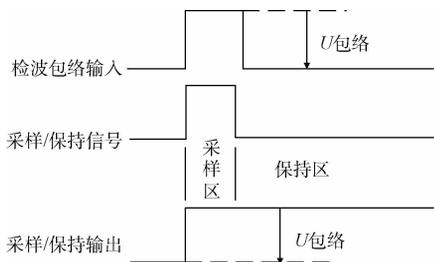


图 3 采样保持输入输出及触发信号时序

4.2 检波信号采集模块设计

检波信号采集模块的主要功能是完成对检波及处理模块输出的与微波信号功率成正比关系的直流电压进行 A/D 采样,如果检波信号是脉冲,还可以完成对脉冲频率、脉宽的检测、对检波信号数值校准以及显示,同时具备远程通信接口可以将采集的功率数据送出^[7-8]。

因此,检波信号采集模块由数据采集、校准参数存取、数值显示、远程通信 4 个部分组成。其中数据采集不但完成对功率电压的采集,还可以完成检波脉冲频率、脉宽的采集、对用于测试环境温度的热敏电阻温度的采集。由于环境温度对于测量的精度有一定影响,对于环境温度的检测并进行测量补偿有助于提高功率测量的精度。检波信号采集模块的功能框图如图 4 所示,从图中可见,微控制器是整个电路的核心,因此选择一款支持 A/D 变换、脉冲测量、显示与通讯的微控制器非常重要。在样机设计中选择 TI 公

司的 TMS320F2808 微控制器来实现,该微控制器不但具备多个通道的 A/D 转换器,其 CAP 端口可以实现脉冲上升下降沿之间时间和两个上升沿或两个下降沿之间的时间,功能完全可以完成覆盖脉冲频率和脉冲宽度的测量,此外该微控制器还具有丰富的通信接口,完全可以满足通信及显示需求^[9]。

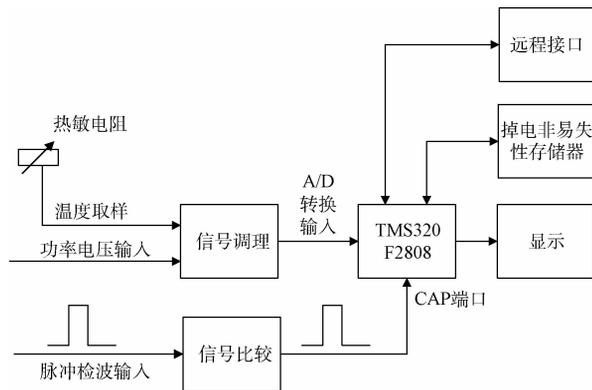


图 4 检波信号采集模块原理

司的 TMS320F2808 微控制器来实现,该微控制器不但具备多个通道的 A/D 转换器,其 CAP 端口可以实现脉冲上升下降沿之间时间和两个上升沿或两个下降沿之间的时间,功能完全可以完成覆盖脉冲频率和脉冲宽度的测量,此外该微控制器还具有丰富的通信接口,完全可以满足通信及显示需求^[9]。

检波及处理模块输出的电压经过 A/D 变换经过校准计算,得出具体的功率数值。脉冲检波包络经过放大后进入 TMS320F2808 的 CAP 单元,如果设置捕获两个脉冲上升沿或下降沿之间的时间,则得出信号的重复周期,可再反推出频率。如果设置捕获脉冲上升沿和下降沿之间的时间则得出脉冲宽度数值^[10]。为了提高频率、脉宽测量的抗干扰能力,中间可以设置信号比较电路,将参考电压提高,这样可以提高检测边沿的门限,从而避免前后沿振荡对脉冲频率、脉宽测量的影响。

检波信号采集模块采集的功率、射频脉冲重复频率、脉宽等数据通过远程接口可以传送到远程终端显示,以满足用户对于射频信号远程监控的需求。

4.3 提高测量精度的软件方法

测量精度一方面由硬件电路进行保证,另外软件同样可以作为提高测量精度的一种手段,软件可以完成的功能有信号数字滤波、误差补偿。

1) 数字滤波

常用的数字滤波有均值法、低通滤波法等。其中均值法的使用最为简单,但均值法如果只是单纯的将 n 次取样的数值进行算术平均,则效果并不是最好,因为在某些电磁环境恶劣的场合,存在尖峰扰动,尖峰的幅度可能较高,虽然进行均值计算,但偶然的尖峰依然能够导致较大的误差出现,因此必须在均值滤波算法的基础上增加条件。由于大功率微波功率源电磁环境较差,尤其是脉冲工作方式的微波功率源,会在信号上感应出尖峰信号,因此使用防脉冲干扰平均值滤波的算法更有针对性,效果更好,具体的算法是先对 n 个采样数值进行比较,去掉其中的最大值和最小值,然后计算余下 $n-2$ 个数的均值,如果采样周期和

每次计算数据序列的长度 n 选择合适,则能够得到很好的滤波效果,通常情况下,为了加快测量计算速度, n 不宜过大。

2) 误差补偿

微波信号的检波幅度与输入微波信号频率、环境温度均有一定关系。如果单纯的依靠硬件检测仍然会有一定偏差。在本文方案中加入了温度检测和校准参数的存储,即一方面获取环境温度,一方面利用存储的影响系数补偿测量的数值偏差,此外如果需要获取更高带宽下,功率取样的精度,则可以通过远程接口将微波信号频率送至微控制器,微控制器软件通过读取存储的贷款校准参数对测量的功率值进行校正,则可以获得更好的测量精度。

3) 非线性区间曲线拟合

在功率较大区域和功率较小区域,功率/电压曲线呈现非线性,此时如果仍然按照线性校准则会有较大误差,因此在此类非线性区域一般通过测量数据,按照二次曲线进行曲线拟合,获取功率/电压二次方程 $y = ax^2 + bx + c$ 的 a 、 b 、 c 系数,从而使用软件通过二次方程公式完成边界的校准计算,这样就可以获得更高的边界功率测量精度。

4.4 测试及试验

依据本文试验方法研制的微波功率检测模块采用了 RS485 远程能够通信接口,在测试功率检测模块性能时,可以采用如下框图架构进行标定和测试。高频信号源用于产生微波信号(可以是连续波,也可以是脉冲信号),功率计用于作为功率标定的参考和测试的基准,示波器用于射频检波脉冲重复频率及脉宽的测试和标定。功率检测模块通过 RS485 远程通信接口将检测到的功率、微波信号重复频率、脉宽(针对微波脉冲功率信号)送至远程监控计算机,通过接收软件显示测试数据,与功率计和信号源设置比对,完成功率检测模块性能测试。

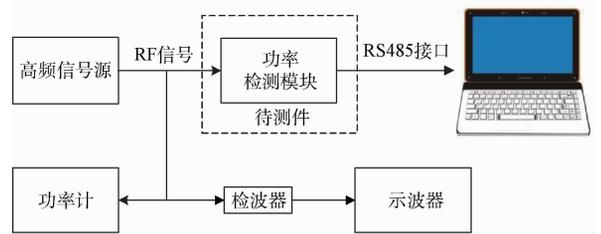


图 5 功率检测模块测试原理

表 1 测试数据表 1

频点	10 mW			20 mW			40 mW			80 mW		
	理论	实测	误差/%	理论	实测	误差/%	理论	实测	误差/%	理论	实测	误差/%
f_1	9.977	10.17	1.93	20	20.3	1.5	40.55	41.79	2.98	83.94	84.55	0.82
f_2	10	10.2	2	20.04	20.09	0.25	40.46	40.61	0.37	83.75	84.59	0.19
f_3	9.977	10.12	1.43	20	19.36	3.19	40.55	39.92	1.55	83.946	82.36	1.89
f_4	9.977	10.19	2.13	20.04	19.77	1.37	40.18	40.5	0.8	82.035	82	0.04
f_5	9.977	10.13	1.53	19.95	20.08	0.64	39.9	40.28	0.95	81.28	82.4	1.37
f_6	9.977	9.98	0.03	19.95	20.28	1.64	39.9	40.66	1.9	81.28	81.95	0.82
f_7	10	9.82	1.8	20	19.55	2.24	40.09	39	2.71	81.66	79.91	2.14

表 2 测试数据表 2

序号	频率			20 μ s			96 μ s			300 μ s		
	理论	实测	误差/%	理论	实测	误差/%	理论	实测	误差/%	理论	实测	误差/%
1	300	300	0	20	19.7	1.5	100	99.8	0.2	300	299.7	0.1
2	500	500	0	20	19.7	1.5	100	99.8	0.2	300	299.7	0.1
3	1 000	1 000	0	20	19.7	1.5	100	99.8	0.2	300	299.7	0.1
4	2 000	2 000	0	20	19.7	1.5	100	99.8	0.2	300	299.7	0.1
5	4 000	4 000	0	20	19.7	1.5	100	99.8	0.2	300	299.7	0.1
6	6 000	6 000	0	20	19.7	1.5	100	99.8	0.2	300	299.7	0.1

从表 1、表 2 两组数据可以看出,使用线性检波、采样保持、AD 采样结合软件校准算法测量功率的精度均在 5% 以下,完全可以满足监控大功率功率源的需求;且对于调制脉冲微波功率信号对脉冲重复频率检测精度很高,脉宽的检测精度在小脉宽时略低,但同样可以满足对调制脉冲

特征的监测需求。

5 结 论

这种基于信号检波采样保持的微波信号功率及信号特征测量方法,简单实用、价格低廉,精度完全可以满足实

际需求。因此对于带宽较小或变换速度不高的大功率微波功率源功率的检测,不但可以满足较高精度的功率检测需求,还可以完成信号重复频率、脉宽等脉冲特征参数的测量,而且环境适应性更强,具备较好的实用性。

参考文献

- [1] 王建平. 一种射频功率检测控制系统设计方法[J]. 电子测量技术, 2016, 39(8): 191-195.
- [2] 凌祥, 姜永华, 高伟亮, 等. 一种宽带微波功率监测系统的设计[J]. 国外电子测量技术, 2011, 30(3): 57-59.
- [3] 姚达雯, 周国平, 封维忠, 等. 宽量程智能射频功率检测系统研究[J]. 计算机测量与控制, 2014, 40(6): 133-136.
- [4] 张青, 罗彦军, 朱雪婷, 等. DC~6GHz 厚膜温度补偿衰减器的设计与制备[J]. 电子元件与材料, 2016, 35(8): 69-71.
- [5] 徐君, 王雪梅. 基于 AVR 的机载应答机射频功率探测模块设计[J]. 测控技术, 2011, 30(12): 1-3, 11.
- [6] 吕福勇, 周瑞卿, 阮世阳, 等. 高频磁场检测中采样保持器的设计及其性能分析[J]. 电子测量技术, 2015, 38(8): 13-16.
- [7] 王丹, 陈泽宗, 陈曦. 基于 C8051F020 的微波雷达远程监控系统设计与实现[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(15): 50-54.
- [8] 茅俊君. 基于 ARM 的数字电视射频信号功率检测器设计[J]. 电子技术, 2014(9): 89-92.
- [9] 樊长虹, 杨华升, 管文辉. 基于的多通道信号到达时延测量方法[J]. 电子世界, 2014(17): 105-105.
- [10] 张妙琳. 基于 TMS320F28335 的雷达发射机实时脉冲占空比的检测[J]. 工业控制计算机, 2014(9): 50-50.

作者简介

孙颢, 硕士研究生, 高级工程师, 主要研究方向为雷达发射技术、监控系统设计等。

E-mail: sunting1979@163.com

周康, 硕士研究生, 工程师, 主要研究方向为雷达发射技术、监控系统设计等。

E-mail: zhkchristian@163.com

刘张伟, 大学本科, 高级工程师, 主要研究方向为雷达系统使用与保障等。

E-mail: 565657314@qq.com

(上接第 200 页)

- [13] 钱志鸿, 王义君. 物联网技术与应用技术[J]. 电子学报, 2012, 40(5): 1023-1028.
- [14] 杜一腾, 迟宗涛. 基于 Arduino 与 yeelink 平台的实时环境监测系统[J]. 技术纵横, 2014(10): 26-29.

作者简介

孟祥忠, 1964 年出生, 博士, 教授, 研究方向为智能控

制理论与应用、电力系统监测与保护技术。

冯红彪, 1990 年出生, 硕士研究生, 研究方向为故障诊断与智能电网。

E-mail: fenghongb@163.com