

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2017.04.11

雷达射频测试系统现场整体计量校准技术研究

楼红英, 杨忠, 沈保龙

(中国电子科技集团公司第十四研究所, 江苏 南京 210039)

摘 要: 传统的集成系统校准是采用单台仪器计量和系统功能检查来完成, 原有的系统性能和技术指标是无法保证的, 雷达射频测试系统的整体校准是目前急需解决的问题。本文通过设计组配标准化、通用化的现场传递标准件, 即通过组配单件传递标准件、组合传递标准件, 建立了与雷达射频测试系统相对应的功率、幅度、相位、噪声和反射系数等电参数的工作标准, 通过对以上各参数的不确定度分析评定和重复性、稳定性的考核, 解决了雷达射频测试系统的量值传递问题, 实现了雷达射频测试系统的现场整体校准。

关键词: 射频测试系统; 现场整体计量; 传递标准件; 工作标准

中图分类号: TB9

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2017)04-0045-04

Research on Local Integral Measurement Calibration Technology for Radar RF Test System

LOU Hongying, YANG Zhong, SHEN Baolong

(The 14TH Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Nanjing 210039, China)

Abstract: Traditional integrated system calibration is performed with single instrument measurement and system function checks, and the performance and technical specification of the system are not guaranteed. The overall calibration of radar RF test system is an urgent problem at present. Standardized and generalized standard parts for in-situ transfer are designed and assembled, that is, with assemble of sheet transfer standard parts and portfolio transfer standard parts, this paper establishes a working standard for radio parameters as power, amplitude, phase, noise and reflection coefficient and etc. corresponding to the Radar RF test system. By analyzing and evaluating the uncertainty and checking repetition and stability of the above parameters, it resolves value transfer problem for radar RF test system and realizes local integral calibration.

Key words: RF test system; local integral measurement; transfer standard part; working standard

0 引言

雷达射频测试系统是根据特殊需求而研制的专用测试设备, 是基于 GPIB 总线及网卡将多台仪器进行集成, 通过软件控制来实现全部功能的。对于集成系统的校准, 传统的方法是采用对单台仪器分别进行单独计量校准和系统的功能检查来完成的。这种方法存在的弊端有: ①工作量大, 费时、费力; ②投入的标准设备多, 无法解决现场计量; ③单台仪器正常并不代表系统指标符合要求, 尤其是系统配套设备对系统的影响无法判断; ④对整个系统只能进行功能性的检查, 在计量中没有对系统集成的开关、连接电缆、接口驻波等因素进行校准, 因此, 不能保证测试系统的性能指标及系统技术指标的准确性。

1 标准建立

雷达射频测试系统^[1-2]包括关键器件测试系统、组件测试系统以及单元子阵测试系统等, 涉及测量的电参数^[3]包括功率、衰减、相位、反射系数和噪声等, 需利用传递标准件对以上参数进行量值传递, 确保各雷达射频测试系统准确可靠。建立自动传递标准件, 对雷达射频测试系统进行系统现场整机自动校准^[4], 自动校准软件具有数据自动修正功能, 可保证雷达射频测试系统测量准确度与测试的一致性。传递标准件适用于雷达射频系统的功率放大器、移相器等关键器件测试系统、组件级自动测试系统、单元级自动测试系统、子阵级自动测试系统的现场原位自动校准。传递标准件需在线使用, 适用于新组建雷达射频测试系统的校准、雷达射频测试系统的定期校准以及测试系统的核查, 核查内容包括系统重复性诊断、系统稳定性诊断、系统故障诊断与定位。自动传递标准件, 由选配的小型标准件和研制的失配小、重复性好、稳定

收稿日期: 2017-04-26; 修回日期: 2017-05-30

作者简介: 楼红英(1972-), 女, 高级工程师, 主要研究方向为计量及计量测试技术研究。

可靠检验件等组成。

1.1 单件传递件

建立适用于不同雷达射频测试系统的功率、衰减、相位、反射系数和噪声传递标准,采用大功率衰减器加配双通道脉冲小功率计、电控移相器、电控衰减器、失配器、标准噪声源等作为传递工作标准,经传递标准各个参数的测量不确定度分析、考核、验证,组建雷达射频测试传递标准件。

在传递标准件设计过程中,不仅考虑传递标准件的重复性和稳定性,还要考虑到与被测系统的兼容性、匹配性、电磁兼容性以及器件在脉冲中功率状态下温漂的问题。电磁兼容主要从信号通路及结构设计等方面进行全面考虑。因此,微波电缆、连接器、微波部件在满足功率要求的情况下尽可能使用驻波比小、屏蔽性能好、插入损耗小的电缆、接头和部件,以降低信号泄露和损耗。尽量减小微波信号传输通路的长度,减少中间的转接以实现传递标准件的准确定标。

对于功率、相位参数在脉冲中功率状态下如何准确定标问题。由于衰减器、移相器、失配负载等元器件在施加高功率后,会产生热量,温度升高可能会导致元器件的性能发生变化。通过试验方法,将各项标准在脉冲、功率下的量值变化中进行精确测定,特别是在高温状态下对重复性和稳定性进行测定,在测量过程中进行修正,提高准确度。在传递标准件的研究过程中,不仅要考虑到标准在电性能指标是否符合要求,还要从体积、重量上作考虑,研究出一些小型化、便携式传递标准,便于现场校准使用。

对于组件级测试系统,要建立衰减、相位、噪声、反射系数等参数的传递标准。采用电控移相器、电控衰减器、失配器、噪声源作为传递工作标准,经各参数的测量不确定度进行分析、评定、考核、验证,组建雷达射频测量系统传递标准件。上述传递标准经衰减标准、S参数标准装置、噪声标准进行定值,保证各项标准的量值均可溯源到上级计量机构,保证雷达射频测试系统的校准方法的可行性和校准结果的准确性。其量传体系图,见图1。

1.2 组合传递件

雷达射频测试系统中的放大器等关键器件测试系统、组件及单元子阵测试系统,涉及多项复合参数的量传,采用上述单个标准传递件,是无法满足量值传递要求的。需采用具有一定可靠性和稳定性的样件作为系统的传递标准件。对于功率及放大器测试系统,研制组合功率标准件(即包括定向耦合器、功率衰减

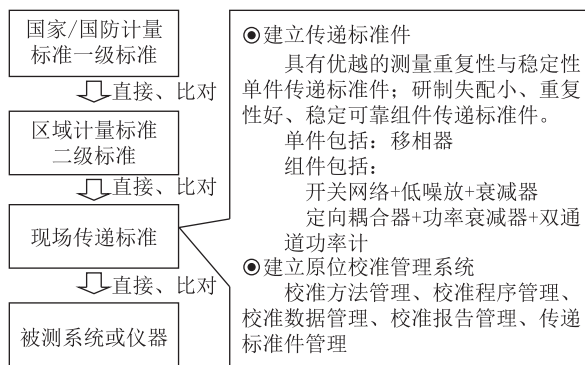


图1 雷达射频测量系统量传体系图

器、功率传感器、双通道功率计来满足测试系统量传要求。对于组件级测试系统研制组合传递标准件(即包括低噪声放大器组、衰减器组、开关网络的组合样件)作为测试系统的功率、衰减、相位、噪声参数的传递标准件。该组合传递标准件同样可以适用于单元级子阵级测量系统,以提高校准效率。利用步进衰减器固定电长度的相移特性,组合传递标准件中步进衰减器取代了不同频率范围的移相器,不仅降低了成本,还减少、简化了组合传递标准件的级联数,提高了测量准确度。通过应用矢量网络分析仪 SmartCal 校准技术和步进衰减器固定电长度的相移,可提高系统整体的量传准确度。

1) SmartCal 校准技术的应用,可以尽可能减少因为不同接头形式的被测件在测量时,适配器引入的测量误差,需解决不同测试端面的校准问题,提高测量准确度。即网络分析仪根据被测件不同转接头形式(或全阴全阳的被测件)选用相应的机械校准件或电子校准件进行单端口校准,两端口间需利用适配器完成直通校准,并完成网络分析仪不同接头形式的全二端口校准,如图2,网络分析仪自动计算插入适配器的延迟参数,尽可能减少因为不同接头形式被测件在测量时,适配器引入的测量误差,解决端到端的校准问题等。

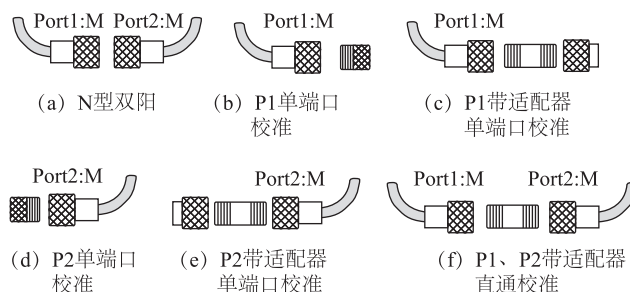


图2 SmartCal 校准模式步骤图

2)利用同轴步进衰减器在衰减量步进状态下相位值发生相应固定变化,在固定衰减量设置值状态下其相位值应保持恒定不变的特点,选取步进衰减器为相位参数标准(不同频率相位随衰减量的变化的相位值如表 1)。通过对 8494H 相位变化的重复性和稳定性考核以及不确定度的分析和验证,得出 8494H 相移的不确定度为 $0.6^{\circ} \sim 1.0^{\circ}$,频率范围可扩展至 18 GHz。相比移相器的相移,其测量不确定度为 $0.8^{\circ} \sim 1.8^{\circ}$,指标提高了 25% 以上。

表 1 随衰减量变化的相位值		
衰减量设置值/dB	相位实测值/($^{\circ}$)	
	8 GHz	12 GHz
0 (Ref)	0 (Ref)	0 (Ref)
1	23. 76	37. 12
2	37. 66	58. 04
3	61. 55	94. 58
4	48. 62	74. 55
5	72. 73	111. 02
6	86. 19	131. 87
7	110. 13	168. 53
8	96. 96	148. 27
9	120. 82	184. 88
10	134. 33	205. 69
11	157. 67	242. 90

1.3 不确定度分析(以传递标准件相位为例)

作为工作标准的传递标准件,它的重复性、稳定性是传递标准件能否满足量传要求的基本条件,必须对其进行严格的重复性考核和稳定性考核。因此,传递标准件的不确定度分析评定和考核是本项目中一项关键工作,自动传递标准件不确定度^[5]主要是由标准引入的不确定度、失配引入的不确定度及测量重复性引入的不确定度组成。以传递标准件的相位为例进行分析:

- 1)网络分析仪测量传输相位时的不确定度 u_1
查 N5224A 网络分析仪说明书,频率 6 ~ 20 GHz 时,传输系数为 -20 ~ 0 dB 时,相位测量最大误差为 $a_1 = 0.8^{\circ}$,取 $k = 2$,则
$$u_1 = \frac{a_1}{k} = \frac{0.8}{2} = 0.4(^{\circ}) \tag{1}$$
- 2)系统失配引入的测量不确定度 u_2
网络分析仪经全二端口校准,标准装置的源端和

负载端的电压驻波比均小于 1.015,则 $\Gamma_G = \Gamma_L = 0.0075$,在衰减刻度变化时,标准件的输出电压驻波比不变,即 $S'_{22} = S''_{22}$ 。

- 系统失配误差计算如下:
$$a_2 = [|S'_{11}| + |\Gamma_L|] \times |\Gamma_G| + |S'_{22}| \times |\Gamma_L| + [|S''_{11}| + |\Gamma_L|] \times |\Gamma_G| + |S''_{22}| \times |\Gamma_L| \tag{2}$$
- 在频率为 12 GHz, S'_{11} , S'_{22} 衰减器设置为 0dB, S''_{11} , S''_{22} 衰减器设置为 10dB,网络分析仪测量的数据如表 2 所示:

表 2 用网络分析仪测量的 S 参数	
参数	反射系数测量值
S'_{11}	0. 194
S''_{11}	0. 112
S'_{22}	0. 190
S''_{22}	0. 190

将网络分析仪测量的数据代入公式(2),计算得出 $a_2 = 0.0053 \text{ rad}$ 。转换成角度为 $a_2 = 0.0053 \times \frac{360^{\circ}}{2\pi} = 0.31^{\circ}$ 。

设为反正弦分布,置信因子 k 为 $\sqrt{2}$,因此,频率在 12 GHz 时,由于失配引入的标准不确定度 u_2 为

失配误差为反正弦分布, $k = \sqrt{2}$, 则
$$u_2 = \frac{a_2}{k} = \frac{0.31}{\sqrt{2}} = 0.22(^{\circ}) \tag{3}$$

- 3)测量重复性引入的测量不确定度 u_A
用矢量网络分析仪在 12 GHz 上对传递标准件的相位进行重复测量,采用 A 类方法评定,用公式 $u_A =$

$$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}}$$
计算,测量重复性为 0.019° 。

- 4)传递标准件的相位的合成不确定度 u_c
12 GHz 时,
$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_A^2} = \sqrt{0.4^2 + 0.22^2 + 0.019^2} \approx 0.5(^{\circ}) \tag{4}$$
- 5)相位标准的扩展不确定度 U
12 GHz 时,(取 $k = 2$)
$$U = ku_c = 2 \times 0.5^{\circ} = 1.0^{\circ} \tag{5}$$

- 1.4 测量标准重复性(以传递标准件相位为例)
传递标准件在频率 12 GHz(衰减器设置值 0 dB)相位重复性如表 3 所示。

表 3 传递标准件相位重复性计算表

实测值/(°)							$S_n(x)/$
1	2	3	4	5	6	平均值	(°)
153.01	153.08	153.19	153.17	153.20	153.19	153.14	0.077

测量标准重复性通常用观测值的实验标准偏差 $S_n(x)$ 表征。选一稳定的被测量或被检测量器具，在短时间内用测量标准重复观测 n 次，得到 n 个观测值 x_i ，观测次数取 $n \geq 6$ ，按下式计算 $S_n(x)$ 为

$$S_n(x)=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n(x_i-\bar{x})^2}{n-1}}$$

(6)

式中： x_i 为第 i 次观测值； $\bar{x}$ 为 n 次观测值的平均值； n 为观测次数。

得到的测量标准的重复性小于合成标准不确定度的三分之二。

1.5 测量标准稳定性(以传递标准件相位为例)

传递标准件在频率 12 GHz(衰减量设置值 10 dB 时)相位标准的稳定性如表 4 所示。

表 4 传递标准件相位稳定性计算表

观测次数	实测值/(°)						$S_n(x)/$ (°)
	1	2	3	4	5	6	
1	153.01	153.08	153.19	153.17	153.20	153.19	0.06
2	153.01	153.09	153.13	153.12	153.11	153.16	
3	153.09	153.27	153.17	153.27	153.29	153.10	
4	153.22	153.26	153.21	153.13	153.32	153.19	

测量标准的稳定性用实验标准偏差 S_m 定量表征。稳定性的评定，可选一稳定的被测量或被检测量器具，每隔一个月观测一次，取 n 个观测值的算术平均值

$\bar{x}_{n_i}$ 作为一次观测结果，共观测 m 次， S_m 按下式计算

$$S_m=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m(\bar{x}_{n_i}-\bar{x}_m)^2}{m-1}}$$

(7)

式中： $\bar{x}_n$ 为一次观测时 n 个测量值的算术平均值； $\bar{x}_m$ 为 m 次观测结果的算术平均值。

一般取 $n \geq 6$ ， $m \geq 4$ 。测量标准的稳定性小于测量标准的合成标准不确定度。

2 被测射频测试系统的校准

在建立现场传递标准的基础上，编制雷达射频测

试系统现场校准的自动校准软件和自动测试软件，采用直接测量和比对测试相结合的方法对雷达射频测试系统进行校准。雷达射频测试系统的功率放大器测试系统采用组合功率标准件(由定向耦合器、功率计、功率敏感器和功率衰减器组成)，利用单定向耦合交替比较法来对被测系统的峰值功率准确度进行测量；移相器等关键器件测试系统采用移相器或组合传递标准件，采用直接测量和比对测试相结合的方法对已标定相位值测量，测量移相器或组合传递标准件相位值；组件级自动测试系统、单元级自动测试系统和子阵级自动测试系统是利用单定向耦合交替比较法对被测系统进行峰值功率校准，采用直接测量和比对测试相结合的方法对被测系统进行幅度、相位、反射系数和噪声系数等关键参数测量，所用的标准为组合功率标准件和组合传递标准件。

2.1 峰值功率测量

信号源输出脉冲信号经功率放大器放大后，输入到定向耦合器，调节信号源输出的激励信号幅度，使得功率放大器输出期望幅度的功率信号，用双通道功率计加功率衰减器(定向耦合器的耦合端的功率探头用于信号监视)和被测系统交替测试耦合器主臂输出端口的功率信号。测试系统功率测量原理如图 3 所示。功率衰减器衰减量及其修正值均置于功率计的偏置中，调节信号源输出功率，使定向耦合器的耦合端输出功率在用标准功率计测量和被测系统测量两种状态时显示一致。

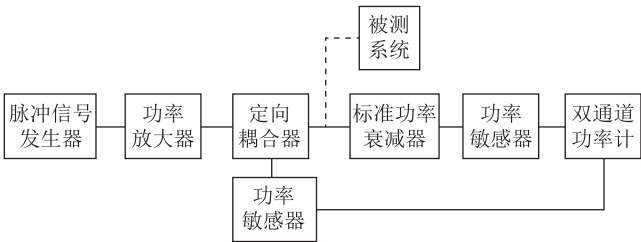


图 3 峰值功率测量原理图

2.2 幅度、相位、噪声和反射系数的测量

根据被测系统的频段和通道数选择运行雷达射频测试系统自动测试软件，在软件中选择了被测通道和测试项目，完成各通道幅度、相位、反射系数和噪声系数的测量。测量连接如图 4 所示。测量系统测量结果最终表示按图表显示如图 5 所示。

3 结论

雷达射频测试系统通过研制，建立了自动传递标
(下转第 56 页)

从测量结果可以看出，最大绝对误差为 0.000183 Ω；最大测量误差为 ±0.0013% Rx + 0.000183 Ω。

表 1 针对标准电阻的测量数据

标准电阻标称值/Ω	测量值/Ω	相对误差/%
1.500	1.500030	0.0
1.000	1.000183	0.02
0.100	0.100039	0.04
0.010	0.010009	0.09
0.001	0.001003	0.30

4 结论

运用四线测量法对微小电阻进行测量，使测量馈线带来的影响降低到较小。

本设计的突出特点：①使用小电流作为激励，避免了由于激励电流过大或测量时间过长带来的温升问题；②测量回路中没有添加过多的辅助元件，使得测量准确度得到提高；③再者测量电路中配合标准电阻

的使用，进一步提升了测量试验的准确性；④电路简单、操作方便、制作成本低。

参 考 文 献

[1] 吴文全，叶晓慧. μΩ 级小电阻测量方法研究[J]. 电测与仪表, 2003, 40(11): 26-28.

[2] 朱恒余，吴文全. 小电阻测量技术[J]. 电子测量技术, 2004(4): 52-53.

[3] 刘志存. 微小电阻测量方法及关键技术[J]. 物理测试, 2005, 23(1): 34-36.

[4] 徐加勤，曾天海. 双电桥测低电阻研究[J]. 北京理工大学学报, 1997, 17(4): 511-513.

[5] 何希才，张明莉. 新型稳压电源及应用实例[M]. 北京：电子工业出版社, 2004.

[6] Ghausi M S. Principles and design of linear Active circuits. New York McGraw-Hill, 1995, Chap. 4

[7] Horenstein M N. Microelectronic Circuits and Devices [M] McGraw-Hill. 1996.

[8] 钱巨玺，张荣华. 电工测量[M]. 天津：天津大学出版社, 1991.

[9] Brown B. Corporation Product Data book[Z]. 2000.

(上接第 48 页)

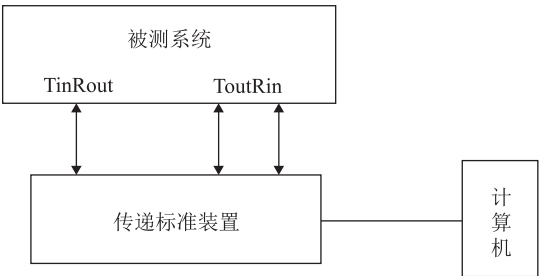


图 4 测量系统测试框图

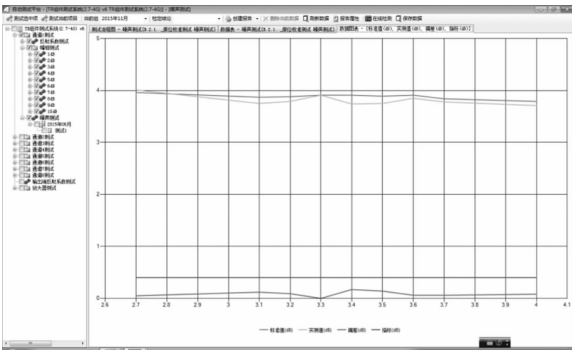


图 5 测试系统测量结果的图表界面

准件，实现了原位不停机整机校准，减少了测试系统

停产时间，提高了生产效率；提供了测试系统的快速故障诊断手段，提高了计量效率和仪表利用率；保证了测试系统的性能可靠。整套系统工作稳定可靠，操作简便，而且节约了开支，提高了工作效率，避免了集成测试系统搬运和拆卸过程中可能出现的问题，同时节省了人力、物力，解决了雷达射频自动测试系统的现场整体计量保证的问题。对推进射频与微波测量生产线开展工程调试、测试的自动化工作具有深远的意义，对射频与微波测量生产线其他集成系统^[6]的校准技术研究具有普遍的指导意义。为国防事业和雷达制造业提供了技术保障，填补了国内在该领域的空白。

参 考 文 献

[1] 秦红磊，路辉，郎荣玲. 自动测试系统硬件及软件技术[M]. 北京：高等教育出版社, 2007: 1-3.

[2] 李为玉. TR 组件 S 参数自动测试软件的设计和应用[J]. 现代电子技术, 2012, 35(13): 123-125.

[3] Dunsmore J P. 微波器件测量手册[M]. 陈新，译. 北京：电子工业出版社, 2014.

[4] 卢晨. T/R 组件自动测试技术研究[J]. 电子工程师, 2003, 29(9): 35-36.

[5] 李宗扬. 计量基础知识[M]. 北京：原子能出版社, 2002: 6.

[6] 梁志国，吕华溢，张大治. 专用测试系统计量校准问题讨论[J]. 计测技术, 2017, 37(2): 1-5.