

文章编号: 2095-4980(2019)04-0676-05

紧缩场静区幅相性能现场校准系统

马永光, 吴翔, 何鑫, 任涛, 杨金涛, 黄承祖, 黄建领

(北京无线电计量测试研究所, 北京 100854)

摘要: 针对国内军用及民用各类型天线及目标特性测量常用的紧缩场静区平面波幅相性能现场校准需求, 开展了 0.3~110 GHz 紧缩场现场校准系统的优化设计。研制了微波幅相收发系统、一体化接收探头天线和八自由度、高精度可移动大型极坐标扫描设备(半径 3 m, 平面度均方根值 0.04 mm), 完成了大型紧缩场静区性能校准系统的研制。利用某航天单位的紧缩场对系统性能进行了现场试验验证, 结果表明, 研制的校准系统功能强, 指标高, 可以满足各类型紧缩场校准需求。

关键词: 紧缩场; 幅相性能; 校准系统

中图分类号: TN820.81

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201904.0676

Calibration system for amplitude and phase performance of quiet zone of Compact Antenna Test Range

MA Yongguang, WU Xiang, HE Xin, REN Tao, YANG Jintao, HUANG Chengzu, HUANG Jianling
(Beijing Institute of Radio Metrology and Measurement, Beijing 100854, China)

Abstract: The optimization design of 0.3–110 GHz Compact Antenna Test Range (CATR) calibration system is put forward aiming for the field calibration requirements on the plane wave amplitude–phase performance in the domestic military and civilian antenna and target characteristic measurement. A microwave amplitude–phase transceiver system is developed, as well as an integrated receiver probe antenna and high precision movable large polar coordinate scanning equipment (radius 3 m, flatness Root Mean Square (RMS) value 0.048 mm) with eight degrees of freedom. The large-scale calibration system is completed. The performance of the calibration system is validated in compact antenna test range of aerospace company. The results show that the calibration system has strong function, and can meet the calibration requirements of various types of compact fields.

Keywords: Compact Antenna Test Range; amplitude–phase performance; calibration system

紧缩场是通过精密的反射面, 在近距离内将馈源发出的球面波校正为平面波的设备, 能够满足各类型天线及目标特性测量所需的远场条件^[1-3]。目前国内军用、民用紧缩场测试系统含进口与国产 2 种形式, 其安装后的性能校准多数仅由紧缩场承研方自研自检, 国内缺乏具备紧缩场静区性能现场校准能力的第三方专业计量校准机构。在此需求背景下, 本单位作为专业计量机构, 开展了相关校准方法及校准系统的研究, 研制了高精度现场校准系统, 已多次用于现场校准, 满足了国内各类型军用、民用紧缩场静区性能的现场校准需求。

1 校准原理

某单反射面毫米波紧缩场布局示意图如图 1 所示。

校准系统现场测量静区内任一垂直来波方向的电磁波阵面是否符合平面波特性, 一般抽测静区前截面、中心截面及后截面 3 处位置的电磁分布。

目前国际上公认的校准方法是静区内探头扫描法, 根据待校紧缩场几何布局选配校准系统, 高频校准系统典型配置

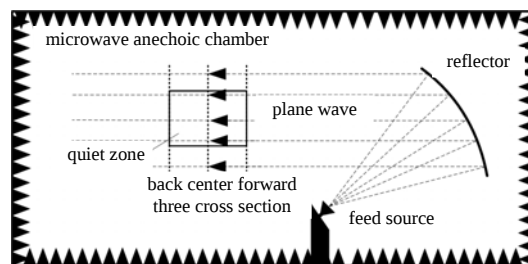


Fig.1 Schematic diagram of CATR layout
图 1 某单反射面紧缩场布局示意图

框图如图2所示。低频校准时可舍弃倍频器、混频器等。信号源提供发射信号；参考接收探头固定不动，获取相位参考信号；接收探头随扫描架移动，获取待测位置的幅相分布；激光跟踪仪用于现场检测扫描架的精确度及确定扫描架与反射面的相对几何位置。

2 校准系统分项研制

现场校准系统研制主要分3部分：微波幅相收发系统配置^[4-8]、扫描架系统^[9-11]及接收天线设计^[12]。

2.1 微波幅相收发系统配置

对静区尺寸较小(≤ 3 m)的紧缩场开展现场校准时，若工作频率较低(≤ 40 GHz)，微波幅相收发系统主要配置矢量网络分析仪实现信号收发。为合理控制系统动态范围，需要配置低噪声放大器，典型增益大于等于25 dB，确保矢量网络分析仪输入功率大于等于-50 dBm。中频带宽为100 Hz时，点频测量矢量网络分析仪幅度稳定性小于等于0.2 dB/30 min，相位稳定性小于等于2°/30 min。电缆需使用高性能低损耗稳幅稳相电缆，电缆缓慢摆动时，控制在电缆传输信号频率内引起幅度变化小于等于0.1 dB，相位变化小于等于2°。当待校紧缩场工作频率大于等于40 GHz时，通过倍频器加混频器的模式搭建系统，现场配置示意图如图3所示。

图3中扫描架工作行程较短，参考天线用于获取参考信号；矢量网络分析仪既是接收机，也是混频器的本振信号源；接收端配置低噪声放大器，提高测量灵敏度；扩频装置内部有功率分配与放大电路，实现本振信号2路输出并放大混频器输出的中频信号；通过矢量网络分析仪接收测试信号和参考信号。

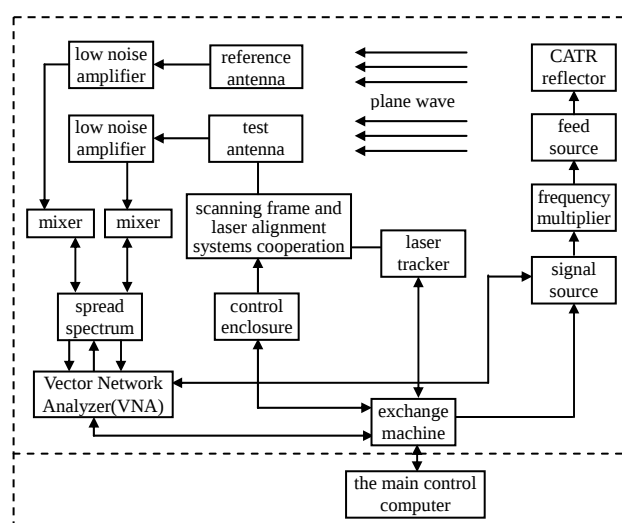


Fig.2 Diagram of CATR on-site calibration system

图2 紧缩场现场校准系统图

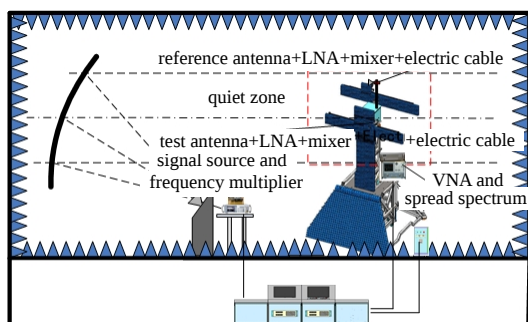


Fig.3 Layout of minitype CATR calibration system

图3 小型紧缩场校准系统布局示意图

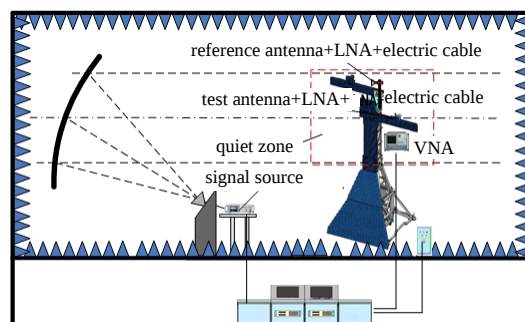


Fig.4 Layout of large-scale CATR calibration system

图4 大型紧缩场校准系统布局示意图

对静区尺寸较大(≥ 3 m)的紧缩场开展现场校准时，需要在静区安装大型扫描装置，扫描行程覆盖静区范围，校准系统布局如图4所示。

大型紧缩场工作频率较低(≤ 40 GHz)，不需要配置外混频模式，但由于传输距离较远，需在发射端单独配置信号源，矢量网络分析仪仅用于接收。由于系统要求的灵敏度较高，接收天线到矢量网络分析仪之间连接电缆较长，需要增加低噪声放大器以提高系统动态范围。微波幅相收发系统配置的难点在于提前通过对待校紧缩场的几何布局分析，合理选用校准系统配置，使动态范围满足待校紧缩场主极化与交叉极化测量指标需求。还需慎选高性能稳幅稳相电缆，合理控制微波器件对幅相校准带来的影响。

2.2 高精度扫描架系统研制

扫描架是校准系统关键设备，现场组装且不固定，需要控制探头移动精确度优于待测工作波长的1%，如对于测量频率为100 GHz的紧缩场，扫描架直线度需优于 ± 0.03 mm，这对大型扫描架来说，研制难度极大。通过利用激光平面准直仪与扫描架联动技术，使研制的扫描架最优方向直线度达 ± 0.024 mm，较差方向直线度达 ± 0.029 mm。

准直仪工作原理为：通过连续旋转发射出一个激光束，产生一个激光平面(如图 5 所示)，平面度精确度为 0.002 5 mm/m。通过调整激光平面的角度和位置，使其与平面波来波方向垂直(如图 6 所示)。接收为激光靶标(安装固定在天线极化转台伺服补偿机构上，与天线同步运动)，激光平面能够时刻照射到激光靶标的感应区，激光靶标以无线传输方式，将感应区零位与激光平面的位置差通过串口实时发送至扫描架工控机；工控机接收到误差数据后，通过运算实时生成控制指令，控制伺服补偿机构对该平面度误差进行补偿，带动激光靶标和探头天线反向运动直至其零位与激光平面重合，形成闭环控制，完成误差补偿。

精心设计了八自由度、高精度扫描架系统，含扫描臂旋转、探头直线运动、探头极化切换、进给补偿、扫描面方位及俯仰调整等运动机构。设计了 2 种安装模式：半径式(见图 4)与直径式(见图 3)，半径式安装模式调试实物图如图 7 所示，扫描架实现的技术指标见表 1。



Fig.7 Radius installation mode
图 7 半径式安装模式图

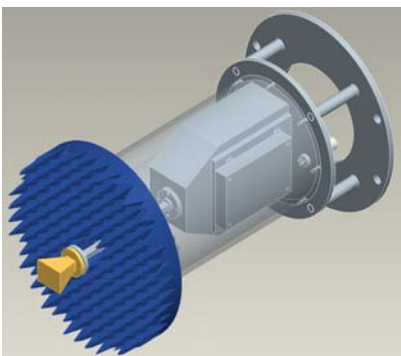


Fig.8 Integrated receiving antenna
图 8 设计的高频一体化接收探头天线效果图

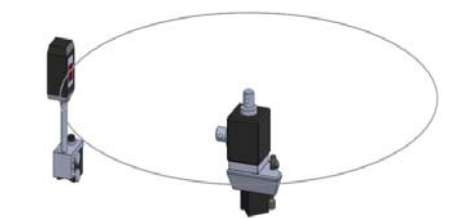


Fig.5 High-accuracy laser plane principle
图 5 高精度激光平面产生原理

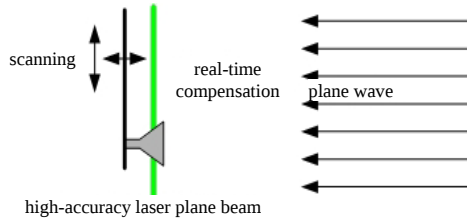


Fig.6 Real-time compensation principle
图 6 实时补偿原理示意图

表 1 扫描架技术指标
Table1 Technical index of scanning frame

Num.	parameter	index
1	scanning stroke radius/mm	3 009
2	straightness component/mm	±0.029
3	flatness RMS/mm	0.048
4	rotation scanning range/(°)	0~360
5	rotation scanning accuracy/(°)	±0.08
6	azimuth motion range/(°)	±100
7	azimuth motion accuracy/(°)	±0.06
8	pitch motion range/(°)	±2
9	pitch motion accuracy/(°)	±0.07
10	antenna spin motion range	360° continuous
11	antenna spin motion accuracy/(°)	±0.04

2.3 一体化接收探头天线设计

研制了一体化接收探头天线，分段覆盖 0.3~110 GHz，设计的高频接收天线(≥ 40 GHz)如图 8 所示，集成了天线、低噪声放大器、供电模块、混频器、吸波材料、安装法兰等，主要技术指标见表 2。

表 2 高频一体化接收探头主要技术指标
Table2 Technical index of integrated antenna

	antenna gain/dB	LNA gain/dB	LNA flatness/dB	LNA noise/dB	LNA power/V	mixer loss/dB	mixer harmonic
40—60 GHz	20	30	±2.5	6	8	23	3
50—75 GHz	20	30	±3	7	12	25	3
75—110 GHz	20	40	±4	5	5	27	3

3 系统验证

利用航天某单位的紧缩场对系统性能进行了试验验证^[13-15]，由于静区尺寸较小，现场使用了直径式安装模式。采用 2 种测量方法：第 1 种参考天线校准模式如图 9 所示，单独信号源通过馈源发射，矢量网络分析仪接收测试天线与参考天线的 2 路信号，获取静区平面波场幅度与相位信息；第 2 种单独利用矢量网络分析仪实现信号收发现场校准模式，不使用参考天线，只有一路接收信号，通过测量矢量网络分析仪 S 参数获取场幅度与相位信息，2 种测量全部使用稳幅稳相电缆，减小电缆摆动影响。试验频率为 40 GHz，2 种不同扫描校准模式的相位测量结果吻合较好(见图 10)，相位变化均在 $\pm 10^\circ$ 以内，符合紧缩场静区平面波的相位变化设计指标要求。由于该试验紧缩场没有 ≥ 40 GHz 的馈源，临时在馈源处安装了一个角锥喇叭模拟馈源，现场试验了 75~110 GHz 典型频点系统的幅相稳定性，探头天线不动，试验频率 90 GHz 时，测试结果表明幅度变化小于 0.1 dB，相位变化小于 2° 。

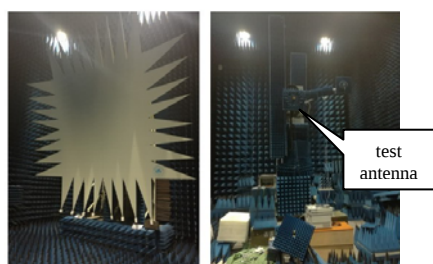


Fig.9 Calibration mode of reference antenna
图9 参考天线模式校准

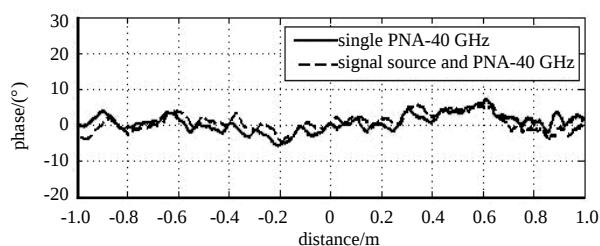


Fig.10 Results contrast of two calibration modes
图10 两种不同校准模式的相位结果对比

4 结论

经过近几年对多家单位的紧缩场现场校准,积累了丰富的现场校准经验,通过初检及复检帮助用户掌握了紧缩场测试系统的实际性能,为系统测量不确定度评估提供了有效数据,有利于保证各待测目标测试结果的准确可靠性。

参考文献:

- [1] 何国瑜,卢才成,洪家才,等. 电磁散射的计算和测量[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2006. (HE Guoyu, LU Caicheng, HONG Jiakai, et al. Calculation and measurement of electromagnetic scattering[M]. Beijing:Beihang University Press, 2006.)
- [2] 全绍辉. 紧缩场设计、检测与应用研究[D]. 北京:北京航空航天大学, 2003. (QUAN Shaohui. Studies on compact range design, evaluation and applications[D]. Beijing:Beihang University, 2003.)
- [3] 马永光,杨金涛,韩玉峰. 紧缩场静区高低频性能校准分析[J]. 微波学报, 2014(S1):584-587. (MA Yongguang, YANG Jintao, HAN Yufeng. Calibration analysis on the high-low frequency of quiet zone performance on compact antenna test range[J]. Journal of Microwave, 2014(S1):584-587.)
- [4] 寇雨馨. 太赫兹频段紧缩场系统检测技术研究[D]. 北京:北京理工大学, 2016. (KOU Yuxin. The research of compact antenna test range detection technology on terahertz band[D]. Beijing:Beijing Institute of Technology, 2016.)
- [5] 全绍辉,何国瑜,徐永斌,等. 大型紧缩场电气性能检测[J]. 微波学报, 2003,19(2):77-80. (QUAN Shaohui, HE Guoyu, XU Yongbin, et al. Electrical performance testing for large compact range[J]. Journal of Microwave, 2003,19(2):77-80.)
- [6] 马永光,何国瑜. 一种寻找紧缩场内干扰源的简单方法[J]. 电波科学学报, 2008,23(4):674-677. (MA Yongguang, HE Guoyu. A simple method for seeking extraneous source of compact antenna test range[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2008,23(4):674-677.)
- [7] 马永光,刘钊,杨金涛,等. 紧缩场电性能校准系统 5 mm 频段幅相稳定性研究[J]. 宇航计测技术, 2016,36(5):1-4. (MA Yongguang, LIU Zhao, YANG Jintao, et al. Research on amplitude and phase stability for compact antenna test range electrical performance calibration system at 5 mm band[J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2016,36(5):1-4.)
- [8] 欧乃铭,白明,梁彬,等. 单反射面紧缩场接收机灵敏度要求评估方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2012,38(9):1200-1204. (OU Naiming, BAI Ming, LIANG Bin, et al. Evaluation method for the receiver sensitivity requirement of CATR with single reflector[J]. Journal of Beihang University, 2012,38(9):1200-1204.)
- [9] 曹铁泽,孙安斌,王继虎. 基于圆柱筒支撑紧缩场极坐标测试扫描系统的研制[J]. 计测技术, 2014,34(4):10-13. (CAO Tieze, SUN Anbin, WANG Jihu. Development of a cylinder support polar scanning frame for compact antenna test range[J]. Metrology & Measurement Technology, 2014,34(4):10-13.)
- [10] 兰翔,李晓星,周国锋,等. 激光跟踪仪组网测量在大型紧缩场反射面装调中的应用[J]. 航天制造技术, 2015(2):18-22. (LAN Xiang, LI Xiaoxing, ZHOU Guofeng, et al. Application of laser tracker network measurement in alignment of large-scale compact range[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2015(2):18-22.)
- [11] 安刚,冯凯,焦婧,等. 紧缩场静区性能的检测及补偿方法[J]. 空间电子技术, 2015,12(2):16-19. (AN Gang, FENG Kai, JIAO Jing, et al. The measurement and correction method of compact range quiet zone performance[J]. Space Electronic Technology, 2015,12(2):16-19.)

- [12] 张领飞. 太赫兹高增益天线测量技术的可行性分析[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2013,11(2):184-188. (ZHANG Lingfei. Feasibility analysis of high-gain antenna measurement techniques at THz band[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2013,11(2):184-188.)
- [13] HARTMANN J,HABERSACK J,HARTMANN F,et al. Validation of the unique field performance of the large CCR 120/100[C]// Proceedings AMTA 2005. Munich,Germany:[s.n.], 2005:1-6.
- [14] HARTMANN J,HARTMANN F,HABERSACK J,et al. Technological improvements in high performance compact range test facilities[C]// Proceeding INICA 2003. Berlin,Germany:[s.n.], 2003.
- [15] TUOVINEN J,VASARA A,RAHSAINEN A. A new type of compact antenna test range[C]// Proceedings of the 22nd European Microwave Conference. Helsinki,Finland:IEEE, 1992:503-508.

作者简介:



马永光(1978-), 男, 山东省滨州市人, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为紧缩场设计及性能检测、微波暗室性能仿真及检测、雷达目标特性测量及天线测量系统集成等.email:myg1978@sina.com.

(上接第 670 页)

- [15] JIA H Y,GAOYJ S,FENG X G. Frequency Selective Surface with better polarization independency for arbitrary incident angle[J]. Chinese Physics B, 2009,18(3):1227-1229.

作者简介:



江 涛(1985-), 男, 山东省潍坊市人, 工程师, 主要研究领域为星载天线及馈电系统、星载相控阵天线等.email:jiangtao1840@163.com.

侯沁芳(1978-), 女, 江苏省苏州市人, 工程师, 主要研究领域为星载反射面天线及馈电系统设计等.

斯 扬(1978-), 男, 浙江省东阳市人, 高级工程师, 主要研究领域为星载天线设计及小型化.

俞笔奇(1984-), 男, 浙江省绍兴市人, 工程师, 主要研究领域为星载天线结构设计.

阎鲁滨(1946-), 男, 北京市人, 研究员, 主要研究领域为星载相控阵天线系统.