

文章编号: 2095-4980(2025)08-0849-06

紧缩场静区相位检测误差修正方法

郑 楷

(成都天锐星通科技股份有限公司, 四川 成都 610040)

摘 要: 在紧缩场静区相位性能检测过程中, 为获得场地真实的性能, 需消除检测系统对测量结果的影响。研究表明, 检测相位误差由扫描架安装偏移和检测平面偏移产生, 且呈现一定的规律。本文利用静区不同剖面的相位测量结果, 计算得到扫描架的安装偏移和检测平面的偏移, 并进行修正补偿, 消除了检测系统测量轨迹偏离理想路径带来的影响。该方法简单、可靠, 能够获取真实有效的检测结果, 已用于紧缩场静区性能检测。

关键词: 紧缩场; 静区测试; 相位测量; 误差修正; 扫描架

中图分类号: TN98

文献标志码: A

DOI: 10.11805/TKYDA2025108

Phase detection error correction method for the quiet zone of a compact range

ZHENG Kai

(Chengdu T-Ray Technology Co., Ltd, Chengdu Sichuan 610040, China)

Abstract: In the process of detecting the phase performance of the quiet zone in a compact range, it is necessary to eliminate the influence of the detection system on the measurement results in order to obtain the true performance of the site. Studies have shown that the detection phase error is caused by the installation offset of the scanning frame and the offset of the detection plane, and it exhibits certain regularities. In this paper, the installation offset of the scanning frame and the offset of the detection plane are calculated based on the phase measurement results of different sections of the quiet zone, and then compensation and correction are performed to eliminate the influence brought by the deviation of the detection system's measurement trajectory from the ideal path. This method is simple, reliable, and capable of obtaining real and effective detection results, which has been applied to the performance detection of the quiet zone in a compact range.

Keywords: compact range; quiet zone test; phase measurement; error correction; scanner

紧缩场作为国际标准组织推荐使用的微波毫米波测试场^[1], 已广泛用于 5G、卫星通信和雷达行业的产品测量。紧缩场是一种间接远场, 通过反射面或其他转换装置将馈源发出的球面波转换为平面波, 在近距离内形成一个性能优良的测试区域, 称之为静区。静区性能会影响被测件最终性能参数测量的准确性, 除对静区性能进行精心设计外^[2], 还需检测获取静区实际的幅相特性。检测时, 将一维扫描架安装在紧缩场的三维转台上, 配合三维转台的极化旋转轴实现对静区范围内通过中心点的 0°、45°、90°和 135°切面(或更多切面)的幅度和相位特性测量。此外, 还需测量整个静区不同纵深位置上多个截面(通常为静区前、中、后 3 个截面)的性能^[3-5]。

在进行静区性能检测时, 检测系统的位置误差会引起相位测量结果的偏差。随着检测频率的提高, 这种偏差会增大甚至超过紧缩场实际的性能指标, 使测试结果严重失真^[6]。因此, 为正确评估紧缩场的实际性能, 获取消除检测系统位置误差的方法, 是紧缩场性能评估急需开展的重要工作。为消除检测系统对紧缩场相位测量的不利影响, 可采用激光跟踪仪对扫描架的安装位置误差和检测平面轴向误差进行测量和补偿^[7-9]。但激光跟踪仪等额外的测量仪器, 增加了测量的复杂度和测量时间, 仪器本身的存在也会给检测系统引入新的误差, 较难用于静区性能的高精度检测。随着校准技术的发展, 通过电磁方法计算出相位变化对应的位置偏移, 可修正此

收稿日期: 2025-04-02; 修回日期: 2025-04-28

引用格式: 郑楷. 紧缩场静区相位检测误差修正方法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2025,23(8):849-854. DOI:10.11805/TKYDA2025108.

Citation format: ZHENG Kai. Phase detection error correction method for the quiet zone of a compact range[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2025,23(8):849-854. DOI:10.11805/TKYDA2025108.

偏差引起的相位偏移^[10]。

通过对静区检测流程的深入分析,发现扫描架的安装误差和检测平面的偏移是造成相位偏移的主要因素。本文基于电磁波传播理论,提出一种计算扫描架安装误差和检测平面偏移的方法,该方法能够补偿检测系统误差导致的相位偏移,实现静区相位特性的准确评估。

1 紧缩场静区性能检测

紧缩场静区质量的评价指标主要有:幅度锥削、幅度波纹、相位锥削、相位波纹和交叉极化。幅度(相位)锥削和幅度(相位)波纹综合表现为幅度(相位)波动,这些指标需通过静区检测系统进行测量。如图1所示,系统由扫描架、探头天线、转台和矢量网络分析仪(Vector Network Analyzer, VNA)组成。测试信号从VNA发出,经过馈源天线、反射面、探头天线后,回到矢量网络分析仪进行检测,整个检测闭环进行。

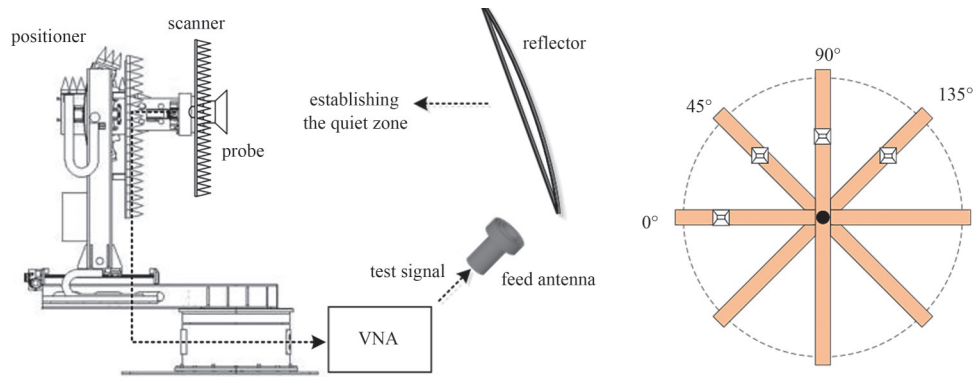


Fig.1 The quiet zone detection system and detection section

图1 静区检测系统和检测切面示意

检测过程为:

- 1) 扫描架安装在紧缩场的转台上,以理论上的等相位面为测试平面,扫描架的滑块带着探头天线沿扫描架在测试平面内完成平面移动;
- 2) 平面移动以极坐标形式完成,探头天线指向来波方向并与馈源天线极化相同;
- 3) 探头天线沿扫描架移动,移动步进小于等于 $1/8$ 最小干涉波周期,记录接收到的幅度(相位)信号 $A_m(r)$:

$$A_m(r) = A_i(r) + A_r(r) \quad (1)$$

$$A_{\text{range}} = \max[A_m(r)] - \min[A_m(r)] \quad (2)$$

式中: $A_r(r)$ 为幅度(相位)波纹; A_{range} 为幅度(相位)波动; $A_i(r)$ 为幅度(相位)锥削度,其最典型的数学模型为二次多项式:

$$A_i(r) = a + br + cr^2 \quad (3)$$

式中: r 为扫描探头的位置; a 为偏置值,对最大幅度(相位)锥削度和幅度(相位)波纹没有影响; b 为锥削度的对称位置; c 为锥削的量级;

- 4) 旋转扫描架,让探头天线完成图1所示的4个切面或更多切面的扫描;

5) 静区幅相测量完成后,在静区特定位置,探头天线极化旋转 360° ,记录接收信号的幅度 A_x ,即可获取静区的交叉极化。

$$A_{x,\text{pol}} = \max(A_x) - \min(A_x) \quad (4)$$

一般地,静区指标要求:幅度锥削 ≤ 1 dB;幅度波纹 $\leq \pm 0.5$ dB;相位波动 $\leq 10^\circ$ ^[11]。但检测系统位置偏差可能导致静区相位特性测量的失真,这是由于高频电磁波传输时,相位对位移相当敏感,如 30 GHz 的电磁波 1 mm 位移对应 36° 的相位差异,而幅度基本没有差异。因此需对检测系统中可能引起相位偏差的因素进行测量和补偿,以便获取高精度的静区相位特性。图2为非理想检测和理想检测情况下不同频率静区场水平线水平极化相位与幅度的分布情况,从图中可以看出非理想的检测会错判静区指标超差。

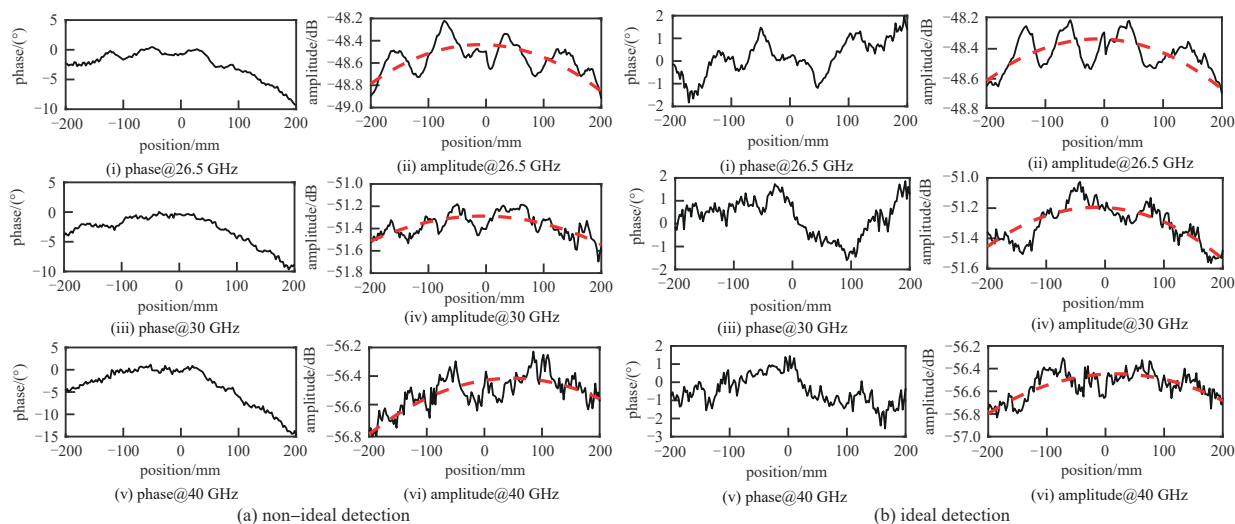


Fig.2 Quiet zone test results

图 2 静区实测图

2 误差修正方法

如图 3 所示，在静区检测系统中，扫描架被安装在转台的极化盘面上，由于夹具设计或其他因素，安装会存在误差。另外，扫描架的重量会引起转台轴面发生偏移，从而导致静区检测平面的偏移。

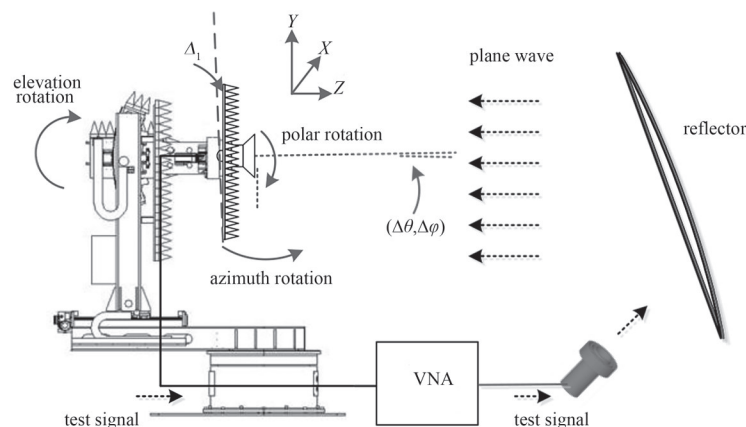


Fig.3 Error generation of quiet zone detection system

图 3 静区检测系统误差产生示意图

将扫描架的安装误差和检测平面的偏差(检测平面和平面波等相位面的偏差)产生的相位分别为： $P_1(r)$ 和 $P_2(r)$ ，静区理想相位分布为 $P_0(r)$ ，则静区实测相位分布 $P(r)$ 满足：

$$P(r) = P_0(r) + P_1(r) + P_2(r) \quad (5)$$

分析此两项误差产生的原因，可通过特定的测量和数据处理方法把 $P_1(r)$ 和 $P_2(r)$ 从测量的相位数据 $P(r)$ 中剥离出来。

1) 扫描架安装误差测量与补偿

对于扫描架安装误差，只在探头天线运动方向的偏差会导致静区测量相位的偏移。如图 4 所示，扫描架安装误差会导致探头天线运动的轨迹(图中 AB 段)偏离理想路径(图中虚线段)，导致探头测量的电磁波存在程差，即：

$$P_1(r) = -r \sin \Delta_1 \times 360 / \lambda \quad (6)$$

式中： λ 为测试频率 f 对应的波长； Δ_1 为待确定的扫描架安装误差； r 为扫描架 A 端和 B 端间的位置，假如中心位置取 0，扫描架行程为 $2a$ ，则 $r \in [-a, a]$ 。

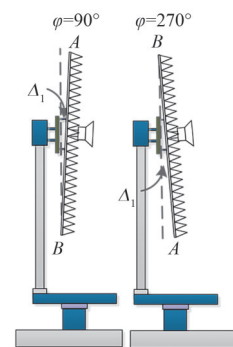


Fig.4 Installation error of scanner

图 4 扫描架安装误差示意图

由于测试的对称性,测量切面(图4中 φ 面) X 和 $X+180^\circ$ 为同一个静区切面,可通过这2个切面静区相位的比较计算 Δ_1 。不失一般性,取 $X=90^\circ$,分别测量 90° 切面和 270° 切面的相位:

$$P(r)_{90}=P_0(r)+P_1(r)+P_2(r) \quad (7)$$

$$P(r)_{270}=P_0(r)+P_1(-r)+P_2(r) \quad (8)$$

综合式(6)~(8)有:

$$\Delta_1=\arcsin\left(\left(P(r)_{270}-P(r)_{90}\right)\times\lambda/(2r\times360)\right) \quad (9)$$

为提高精确度,可选取多个频点 f 、多个位置点 r 和多个切面 X 回归得到 Δ_1 。调节安装夹具可修正此误差,但 Δ_1 值一般很小,操作难度大,通常获取 Δ_1 后利用式(6)对各个测试切面进行数值补偿。

2) 检测平面误差测量与补偿

如图5所示,当检测平面与待测量的等相位面有差异时,相位测量将出现偏差。以图5的坐标系为参考,假设离轴偏差为 $\Delta\theta$,滚动偏差为 $\Delta\varphi$,则平面波偏离产生的相位满足:

$$P_2(r)=\frac{-360}{\lambda}\left(x'\sin\Delta\theta\cos\Delta\varphi+y'\sin\Delta\theta\sin\Delta\varphi\right) \quad (10)$$

式中: x' 、 y' 为静区检测平面切面 X 上的采样点, $x'=r\cos X$, $y'=r\sin X$, $X\in[0^\circ,360^\circ]$ 。

改写式(5)有:

$$P(r)-P_1(r)=P_0(r)+P_2(r) \quad (11)$$

根据前文对静区相位波动的阐述,静区相位 $P_0(r)$ 具有锥削度或波动性,整个静区内不具有式(10)所呈现的规律。令静区采样点数为 N , r_i 为第 i 个采样点(对应位置 x'_i 和 y'_i),补偿完扫描架安装误差后的静区相位为 $P'(r_i)=P(r_i)-P_1(r_i)$,则:

$$\varepsilon=\sum_{i=1}^N\left[P'(r_i)+\frac{360}{\lambda}\left(x'_i\sin\Delta\theta\cos\Delta\varphi+y'_i\sin\Delta\theta\sin\Delta\varphi\right)-C\right]^2 \quad (12)$$

求出使 ε 最小的 $\Delta\theta$ 、 $\Delta\varphi$,即得到检测平面的偏差。调整转台滚动角/离轴角或在结果中进行数值补偿,可修正此偏移。

3 实测结果

在图6所示的单反紧缩场内进行方法验证。为使结果呈现更明显,验证频率选择E波段。紧缩场待测静区范围为 ϕ 800 mm,工作频率为6~90 GHz。扫描架行程为1 000 mm,直线移动定位精确度 $\leq\pm 0.01$ mm,极化旋转定位精确度 $\leq\pm 0.01^\circ$ 。频率为90 GHz时,0.01 mm位置误差对应 1.08° 的相位差异,可匹配静区 10° 量级相位波动的测量。

测试切面选择 $\varphi=0^\circ$ 、 45° 、 90° 、 135° 和 180° ,扫描架测试行程 ± 400 mm,测试频率90 GHz。为实现E波段的测试,测试系统在矢量网络分析仪(频率到40 GHz,双源四端口)收发端口前端增加上下变频器,将矢量网络分析仪测试频率拓展至60~90 GHz。另外,探头喇叭和馈源喇叭均可工作在60~90 GHz且通过标准波导与扩频组件相连接。

图7为测试频率为90 GHz时,误差修正前不同测试切面的静区场水平极化的相位分布。从图可知,相位波动超过了 40° ,远超静区相位波动 10° 的要求。观察各切面相位变化,与探头喇叭位置呈现一定的线性关系,且倾斜程度各异,相位变化具有规律性。

根据切面 $\varphi=0^\circ$ 和 180° 的相位测量值,利用式(9)可计算出扫描架的安装误差 $\Delta_1=0.05^\circ$;根据切面 $\varphi=0^\circ$ 、 45° 、

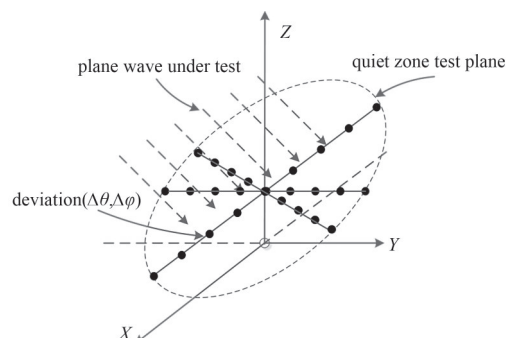


Fig.5 Schematic diagram of detecting plane deviation
图5 检测平面偏差示意



Fig.6 Schematic of compact range quiet zone test
图6 紧缩场静区性能测试示意

90°、135°的相位测量值，利用式(11)可计算出检测平面偏差 $\Delta\theta=0.12^\circ$ 、 $\Delta\varphi=90^\circ$ 。

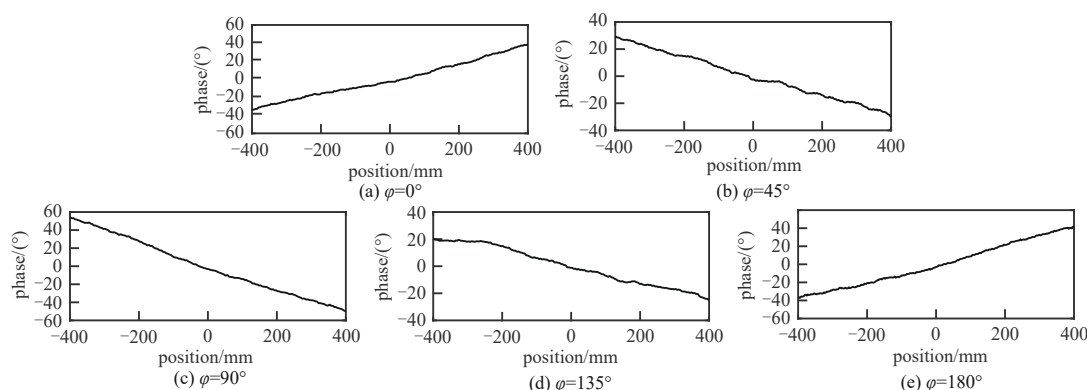


Fig.7 Phase distribution before error correction@90 GHz

图7 误差修正前静区相位分布@90 GHz

修正这两项误差后的静区性能如图8所示，相位变化不再与距离(探头喇叭位置)呈现线性关系，且相位波动在 $\pm 5^\circ$ 以内，与紧缩场静区预期设计相符。通过此修正方法的应用，消除了静区检测系统位置偏移产生的相位失真，可获取紧缩场静区真实的相位波动，在对位置极为敏感的高频静区性能测量时至关重要。

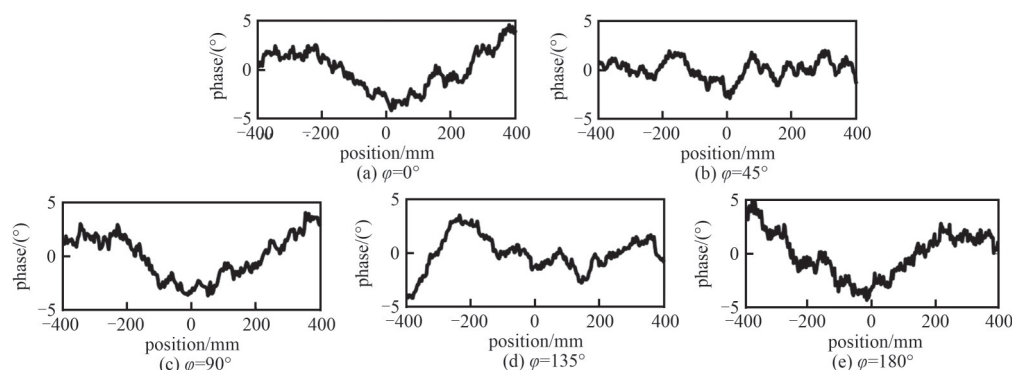


Fig.8 Phase distribution after error correction@90 GHz

图8 误差修正后静区相位分布@90 GHz

4 结论

本文研究了在紧缩场静区检测过程中，由于扫描架安装误差和检测平面偏移误差带来的静区相位分布失真，提出了利用误差产生的特定相位规律计算误差的方法。该方法可通过静区内多个相位测量点计算得到，敏感程度与测试频率正相关，准确性取决于相位测量精确度，且增加采样点数，可降低相位测量起伏的影响。同时，误差补偿的处理可在结果中进行数值修正，降低了设备调整的高精确度要求。实测结果显示，该方法可以获取静区检测系统的误差，确保紧缩场静区相位评估的准确、有效。

参考文献：

- [1] Cellular Telecommunications Industry Association. Test plan for millimeter-wave wireless device Over-The-Air performance[S]. 2018.
- [2] LIU R C, LEE T H, CHOU H T, et al. Influencing factor considerations for designing a high-performance Compact Antenna Test Range(CATR)[C]// 2021 IEEE International Conference on Consumer Electronics-Taiwan(ICCE-TW). Penghu, Taiwan, China: IEEE, 2021:1-2. DOI:10.1109/ICCE-TW52618.2021.9602939.
- [3] 国家市场监督管理总局. GB/T 40602.3-2023 天线及接收系统的无线电干扰 第3部分:场地测量 紧缩场场地性能确认方法[S]. 北京:中国标准出版社, 2023. (State Administration for Market Regulation. GB/T 40602.3-2023 Radio interference from antennas and receiving systems Part 3: site measurement and compaction site performance verification methods[S]. Beijing: Standards Press of China, 2023.)

- [4] 张晓平,罗钦成,冯旭,等. 紧缩场静区测试方法及相关测试技术[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2018,16(3):464-469. (ZHANG Xiaoping,LUO Qincheng,FENG Xu,et al. Quiet zone test method for compact test range and relative test technology[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2018,16(3):464-469.) DOI:10.11805/TKYDA201803.0464.
- [5] 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.) DOI:10.3969/j.issn.1674-7135.2015.02.005.
- [6] 马永光,杨金涛,王淞宇. 紧缩场静区性能测量现象分析[C]// 2013年全国微波毫米波会议. 重庆:中国电子学会, 2013:1496-1499. (MA Yongguang,YANG Jintao,WANG Songyu. Analysis on the testing phenomenon of quiet zone performance on compact antenna test range[C]// Proceedings of the National Microwave and Millimeter Wave Conference 2013. Chongqing, China: Chinese Institute of Electronics, 2013:1496-1499.)
- [7] 马永光,杨金涛,何鑫,等. 紧缩场静区平面波相位特性高精度测量[C]// 2015年全国天线年会. 南昌:中国电子学会, 2015:1067-1070. (MA Yongguang,YANG Jintao,HE Xin,et al. High-precision measurement of quiet zone plane wave phase characteristics[C]// Proceedings of the National Antenna Conference. Nanchang, China:Chinese Institute of Electronics, 2015:1067-1070.)
- [8] 马永光,吴翔,何鑫,等. 紧缩场静区幅相性能现场校准系统[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2019,17(4):676-680. (MA Yongguang,WU Xiang,HE Xin,et al. Calibration system for amplitude and phase performance of quiet zone of Compact Antenna Test Range[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2019, 17(4): 676-680.) DOI: 10.11805/TKYDA201904.0676.
- [9] 马永光,张雁钊. 大型紧缩场静区不同位置电磁幅相特性测试分析[J]. 宇航计测技术, 2021,41(5):22-26. (MA Yongguang,ZHANG Yanzhao. Analysis of electromagnetic amplitude and phase characteristics at different positions in the quiet zone of a large compact field[J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2021,41(5):22-26.) DOI:10.12060/j.issn.1000-7202.2021.05.05.
- [10] 钟超淳,陈宁,林锦波. 紧缩场校准现状与解决方法探讨[J]. 计量与测试技术, 2024,50(11):22-25,28. (ZHONG Chaochun, CHEN Ning,LIN Jinbo. Investigation of the current status and proposed solutions for compact range calibration[J]. Metrology & Measurement Technique, 2024,50(11):22-25,28.) DOI:10.15988/j.cnki.1004-6941.2024.11.007.
- [11] 张晓平. 天线紧缩场测试技术研究[J]. 航天器环境工程, 2006(6):321-328. (ZHANG Xiaoping. Antenna test technique research in compact range[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2006,23(6):321-328.) DOI:10.3969/j.issn.1673-1379.2006.06.003.

作者简介:

郑楷(1985-),男,硕士,高级工程师,研究方向为相控阵天线测试方法、测试系统集成.email:zhengkai@t-ray.net.