

文章编号: 2095-4980(2018)03-0464-06

## 紧缩场静区测试方法及相关测试技术

张晓平<sup>1</sup>, 罗钦成<sup>2</sup>, 冯旭<sup>1</sup>, 樊勇<sup>1</sup>, 陈雷<sup>1</sup>, 李博<sup>1</sup>

(1.北京空间飞行器总体设计部 北京市电磁兼容与天线测试工程技术研究中心, 北京 100094;

2.北京邮电大学 国际学院, 北京 100876)

**摘要:** 介绍大型紧缩场静区测试方法及实测结果, 并根据静区实测结果进行波谱分析, 给出平面波谱分析结果。利用波谱分析结果, 对 Ku 反射面天线紧缩场测试结果进行了测试精确度再提升的数据处理, 展示了紧缩场新的测试技术。本项目研究工作是与国家计量院联合进行的天线计量技术研究工作的一部分—紧缩场测试部分, 也对天线及天线测试场性能的计量测试进行了成功的探索, 为天线计量技术的发展奠定了基础。

**关键词:** 紧缩场; 天线测试; 静区测试

**中图分类号:** TN98

**文献标志码:** A

**doi:** 10.11805/TKYDA201803.0464

## Quiet zone test method for compact test range and relative test technology

ZHANG Xiaoping<sup>1</sup>, LUO Qincheng<sup>2</sup>, FENG Xu<sup>1</sup>, FAN Yong<sup>1</sup>, CHEN Lei<sup>1</sup>, LI Bo<sup>1</sup>

(1.Beijing Engineering Research Center of EMC and Antenna Test Technology, Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China; 2.International College, Beijing University of Post and Telecommunication, Beijing 100876, China)

**Abstract:** The quiet zone test method for compact range is described and the test results are obtained. According to the quiet zone test results, the planar wave spectrum analysis is conducted and the analysis results are given, based on which, the Ku band reflector compact range test result is improved. The update progresses in compact range test technology are presented. This research project is part of antenna metrology technology—in compact range test field—cooperated with National Institute of Metrology. This work explores the metrology test of antenna performance and antenna test range performance.

**Keywords:** compact test range; antenna test; quiet zone test

天线计量技术过去在我国长期处于空白状态, 2015 年国家计量院建成国内第一个天线外推法校准实验室<sup>[1-3]</sup>后, 填补了天线计量技术的空白; 而对于天线测试场的计量尚停留在天线远场空间驻波法的状态, 对紧缩场及近场的性能评估及计量还很少涉及, 为此, 北京空间飞行器总体设计部与国家计量院联合开展了相关研究, 本文为紧缩场测试技术涉及的计量技术研究, 介绍大型紧缩场静区测试方法、测试结果及相关测试技术。

### 1 紧缩场静区测试方法及评价分析处理方法

#### 1.1 静区测试方法

北京空间飞行器总体设计部大型紧缩场建成于 2005 年<sup>[4-6]</sup>, 当时作为新建紧缩场性能的验收测试, 承建方德国 ASTRUM 公司对紧缩场进行了静区的扫描测试。由于国内大型紧缩场静区测试能力欠缺, 未能再次测试静区性能, 为此, 北京空间飞行器总体设计部与国家计量院联合开展课题研究, 进行大型紧缩场的静区测试。

大型紧缩场静区尺寸大, 对扫描架的扫描机械精确度要求高, 需对直径 8 m 静区的大型紧缩场进行测试。为获得 8 m 静区的测试数据, 选用 4.5 m 长的扫描架, 扫描架一端与大扭矩的极化转台相连, 再通过连接工装与紧缩场 DUT 转台连接, 分 2 个径向的 2 次扫描测试, 将数据拼接后形成 8 m 范围的扫描测试数据, 再逐点使用光学瞄准测试数据进行校准, 补偿每个采样点的相位测试数据, 从而消除由于扫描架机械精确度带入的测试误差, 获得静区测试的幅度相位基础数据, 再使用自研软件, 对测试数据进行幅度锥削、幅度起伏、相位锥

收稿日期: 2017-02-16; 修回日期: 2017-03-20

基金项目: 科技部国家科技支撑计划课题资助项目(2014BAK02B01)

削、相位起伏的分析处理，得到一条扫描行程线的静区评测结果。为反映整个平面位置的静区性能，还需进行水平 0° 和垂直 90°, 45°, 135° 的 4 个探头扫描行程线的测试，以得到一个平面位置的静区性能，如图 1 所示。为了反映静区纵深方向的性能，还需取纵深不同位置多个平面进行测试，以得到整个静区范围内的性能。通常紧缩场纵深方向上静区的性能相对比较稳定，本次测试只选择一个平面位置，进行 7 个频点、4 条行程线、4 个极化状态(HH, VV, HV, VH)的测试。其中，HH 表示照明天线水平(H)极化，探头天线也是水平(H)极化；VV 表示照明天线垂直(V)极化，探头天线也是垂直(V)极化；HV 表示照明天线水平(H)极化，探头天线是垂直(V)极化；VH 表示照明天线垂直(V)极化，探头天线是垂直(H)极化。

测试系统连接框图如图 2 所示。采用扫描架专用测试软件，由计算机控制进行扫描数据采集测试，首先控制软件控制大扭矩极化转台转至所需的水平 0° 和垂直 90°, 45°, 135° 扫描行程线所在位置，调整照明馈源天线及扫描架上的场探头天线至所需的 H 或 V 极化状态，软件控制场探头天线沿扫描架运动，数据采集软件配置信号源发射信号频率，控制接收机进行数据采集工作，采样点间隔至少 10 个波长。更换极化状态，进行不同极化状态的测试，更换探头天线进行不同频段的扫描行程线测试，更换扫描行程线位置，进行不同扫描行程线位置的测试。采用旋转探头天线，寻找交叉极化点零深位置的方法，确定交叉极化定位，再将探头旋转 90°，定位为主极化方向。

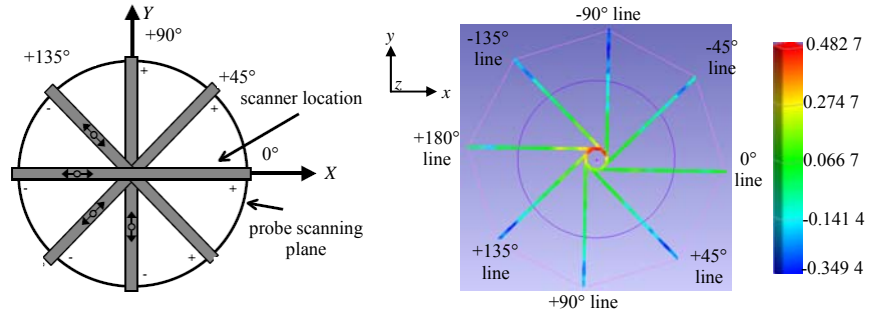


Fig.1 Scanning probe moving lines in quiet zone of compact range and alignment results  
图 1 紧缩场静区内探头扫描行程线及光学瞄准结果示意图

扫描测试前先做光学瞄准测试。紧缩场静区评测扫描架架设、扫描测试状态示意图见图 3。测试数据采用自研软件进行数据拼接，参考光学瞄准数据进行测试数据相位的校正，并采用自研“静区评价分析处理软件”进行静区幅度锥削、幅度起伏、相位锥削、相位起伏及最小平方和的平均值计算，得到静区性能评价结果。

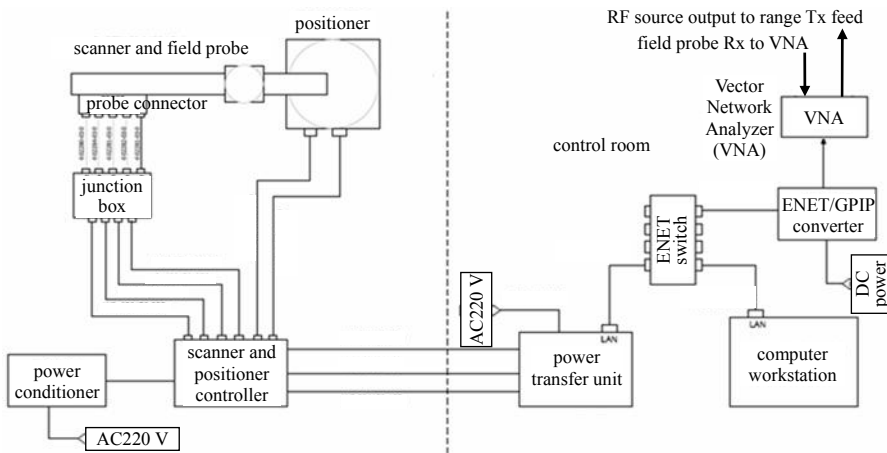


Fig.2 Diagram of measurement system for compact range quiet zone evaluation  
图 2 紧缩场静区评测测试系统框图

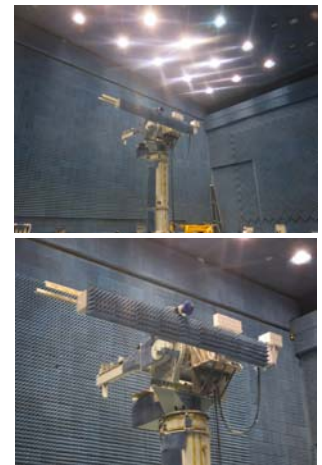


Fig.3 Scanner mounting state and scanning test state (far view and near view)  
图 3 紧缩场静区评测扫描架架设、扫描测试状态示意图(远、近景图)

### 1.2 静区性能评价分析处理方法

大型紧缩场中心静区性能指标见表 1。

表 1 大型紧缩场中心静区性能指标

Table1 Performance specification of large compact range central quiet zone

parameter	specification							
frequency/GHz	1-1.5	1.5-2	2-3	3-4	4-6	6-18	18-40	40-100
amplitude taper/dB	≤1.0	≤1.0	≤1.0	≤1.0	≤1.0	≤1.0	≤1.0	≤1.0
phase taper/(°)	≤5.0	≤5.0	≤5.0	≤5.0	≤5.0	≤5.0	≤5.0	≤5.0
amplitude ripple/dB	±1.0	±0.8	±0.7	±0.5	±0.5	±0.5	±0.5	±0.3
phase ripple/(°)	±10	±8	±6	±6	±6	±6	±10	±10
cross polarization/dB	≤-35	≤-36	≤-38	≤-40	≤-40	≤-40	≤-40	≤-40

扫描架在紧缩场静区 1 个扫描面内进行 8 个径向行程线的测试，组合形成米字形的 4 条扫描行程线，分别

测试同极化幅度(HH, VV)、相位(HH, VV)及交叉极化(HV, VH)，将同极化幅度和相位测试结果处理为幅度、相位锥度及起伏值，与紧缩场静区性能指标比较，以评估静区性能。表示以同极化幅度测试为例<sup>[7]</sup>，幅度、相位的处理方法相同。

$$A_m^n(r) = A_r^n(r) + A_f^n(r) \tag{1}$$

式中： $A_m^n(r)$ 为幅度测试结果； $A_r^n(r)$ 为幅度锥度值； $A_f^n(r)$ 为叠加在幅度锥度值上的幅度起伏值。

$$A_r^n(r) = a + br + cr^2 \tag{2}$$

可根据测试数据进行数据拟合得到幅度锥度拟合曲线，得到幅度锥度拟合值，

$$A_f^n(r) = A_m^n(r) - A_r^n(r) \tag{3}$$

将同极化幅度测试值减去幅度锥度拟合值，得到幅度起伏值。这里需要说明的是，幅度、相位的锥度是应该相对口径中心对称的分布，测试过程中各种因素所造成的锥度的非对称，如果超出了馈源的锥度分布，将直接予以忽略。本文未做任何的忽略处理，以避免对实测结果的过度裁剪。

$$LSS = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [A_m^n(r) - A_r^n(r)]^2 \tag{4}$$

进一步计算得到最小平方和的平均值，可用于不同紧缩场性能的比较与评估。该部分形成自研软件，用于静区锥削和起伏变化的静区性能评定。

## 2 紧缩场静区测试结果

在此仅给出本次测试低、中、高 3 个频点的测试结果，以说明静区性能及测试结果。本文仅给出  $f=1.2$  GHz 的测试结果。 $f=1.2$  GHz 静区性能测试曲线见图 4~7， $f=1.2$  GHz 静区性能统计结果见表 2。

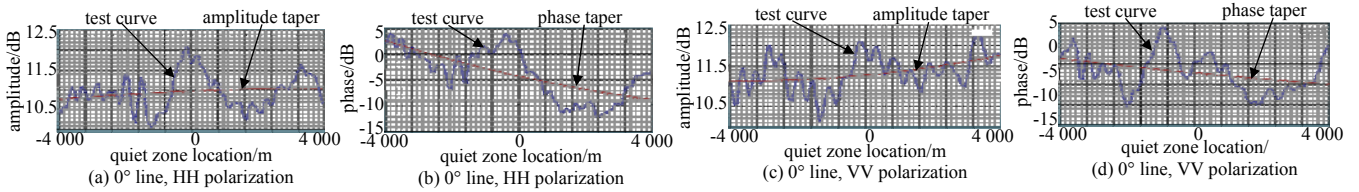


Fig.4  $f=1.2$  GHz,  $0^\circ$  moving line, Co-Pol. test curves

图 4  $f=1.2$  GHz,  $0^\circ$  行程线同极化测试曲线

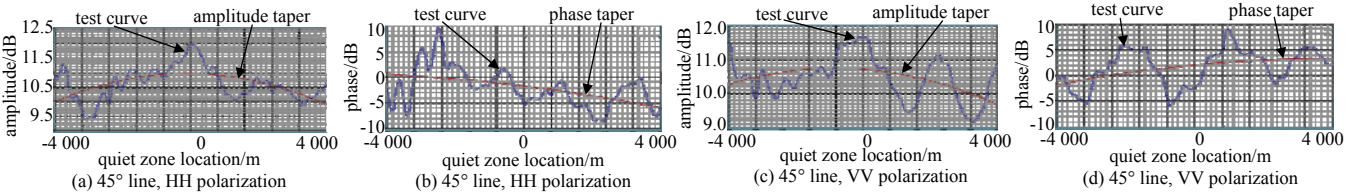


Fig.5  $f=1.2$  GHz,  $45^\circ$  moving line, Co-Pol. test curves

图 5  $f=1.2$  GHz,  $45^\circ$  行程线同极化测试曲线

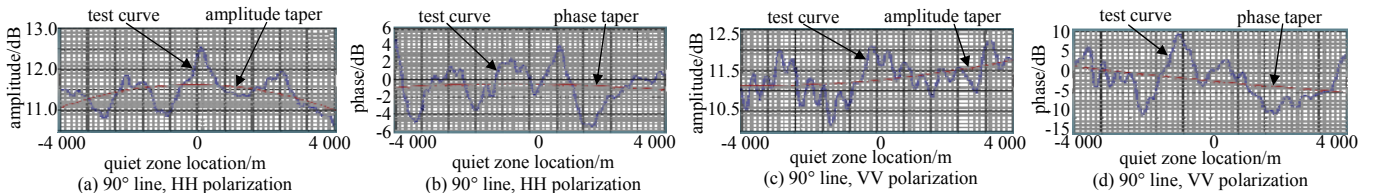


Fig.6  $f=1.2$  GHz,  $90^\circ$  moving line, Co-Pol. test curves

图 6  $f=1.2$  GHz,  $90^\circ$  行程线同极化测试曲线

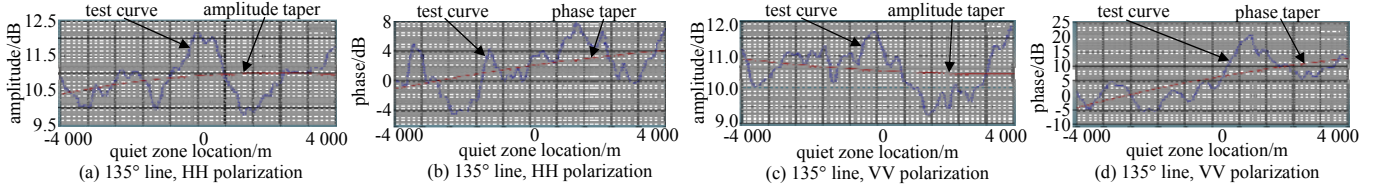


Fig.7  $f=1.2$  GHz,  $135^\circ$  moving line, Co-Pol. test curves

图 7  $f=1.2$  GHz,  $135^\circ$  行程线同极化测试曲线

表 2 中，\*表示可见 135° 超差现象为个别情况，说明测试连接电缆状况不佳，并非静区性能问题，可忽略不计；\*\*表示可见较多的超差点，但是超差量值都很低，可认为交叉极化测试结果基本满足指标要求。

表 2 频率 1.2 GHz 静区性能评价结果

Table2 1.2 GHz quiet zone performance evaluation results

parameter	1-1.5 GHz specification	quiet zone performance test results	out-of-tolerance	
amplitude taper	≤1.0 dB	1.2 GHz, 0° line, HH polarization	0.27 dB	0%
		1.2 GHz, 0° line, VV polarization	0.63 dB	0%
		1.2 GHz, 45° line, HH polarization	1.06 dB	2%
		1.2 GHz, 45° line, VV polarization	1.08 dB	2%
		1.2 GHz, 90° line, HH polarization	0.64 dB	0%
		1.2 GHz, 90°line, VV polarization	0.39 dB	0%
		1.2 GHz, 135° line, HH polarization	0.61 dB	0%
		1.2 GHz, 135° line, VV polarization	0.44 dB	0%
phase taper	≤5.0°	1.2 GHz, 0° line, HH polarization	11.38°	46%
		1.2 GHz, 0° line, VV polarization	6.32°	20%
		1.2 GHz, 45°line, HH polarization	6.55°	12%
		1.2 GHz, 45° line, VV polarization	5.03	7%
		1.2 GHz, 90° line, HH polarization	0.75°	0%
		1.2 GHz, 90° line, VV polarization	0.68°	0%
		1.2 GHz, 135° line, HH polarization	5.25°	1%
		1.2 GHz, 135° line, VV polarization	16.88°	70%*
amplitude ripple	±1 dB	1.2 GHz, 0° line, HH polarization	±0.98 dB	0%
		1.2 GHz, 0° line, VV polarization	±0.95 dB	0%
		1.2 GHz, 45° line, HH polarization	±1.1 dB	4%
		1.2 GHz, 45° line, VV polarization	±1.17 dB	5%
		1.2 GHz, 90° line, HH polarization	±0.82 dB	0%
		1.2 GHz, 90° line, VV polarization	±0.68 dB	0%
		1.2 GHz, 135° line, HH polarization	±1.23 dB	12%
		1.2 GHz, 135°line, VV polarization	±1.34 dB	10%
phase ripple	±10°	1.2 GHz, 0° line, HH polarization	±6.78°	0%
		1.2 GHz, 0° line, VV polarization	±10.28°	2%
		1.2 GHz, 45° line, HH polarization	±8.8°	0%
		1.2 GHz, 45° line, VV polarization	±7.01°	0%
		1.2 GHz, 90° line, HH polarization	±5.21°	0%
		1.2 GHz, 90° line, VV polarization	±4.55°	0%
		1.2 GHz, 135° line, HH polarization	±5.29°	0%
		1.2 GHz, 135° line, VV polarization	±10.07°	1%
cross polarization	≤-35 dB	1.2 GHz, 0° line, HV polarization	-28.8 dB	22%**
		1.2 GHz, 0° line, VH polarization	-28.8 dB	34%
		1.2 GHz, 45° line, HV polarization	-28.8 dB	16%
		1.2 GHz, 45° line, VH polarization	-31.2 dB	16%
		1.2 GHz, 90° line, HV polarization	-28.0 dB	26%
		1.2 GHz, 90° line, VH polarization	-32.4 dB	4%
		1.2 GHz, 135° line, HV polarization	-31.2 dB	10%
		1.2 GHz, 135° line, VH polarization	-31.2 dB	6%

### 3 紧缩场平面波波谱分析处理方法及平面波谱分析结果

通过对紧缩场静区测试结果的平面波波谱分析，可获得静区的平面波波谱分布，即紧缩场静区场分布可看作是空间各个方向的平面波来波合成形成的，如图 8 所示，紧缩场静区场表达式可写为式(5)<sup>[8-9]</sup>。

$$\mathbf{E}_{cr}(x, y, z) = \mathbf{E}_0 \left[ e^{jkz} + \sum_{m=-M}^{m=+M} \sum_{n=-N}^{n=+N} A_{mn}(k_x, k_y) e^{2\pi j f \left( \frac{mx}{a} + \frac{ny}{b} + pz \right)} \right] \quad (5)$$

$$m = \frac{a}{\lambda} \sin \alpha, n = \frac{b}{\lambda} \cos \alpha \sin \beta, p = \sqrt{\frac{1}{\lambda^2} - \left(\frac{m}{a}\right)^2 - \left(\frac{n}{b}\right)^2} \quad (6)$$

通过频域到角域的 Fourier 变换可得到各方向来波的幅度系数：

$$A_{mn}(k_x, k_y) = \frac{1}{ab} \int_{-a/2}^{a/2} \int_{-b/2}^{b/2} \left[ \frac{\mathbf{E}_{cr}(x, y, 0)}{\mathbf{E}_0} - 1 \right] e^{-2\pi j f \left( \frac{mx}{a} + \frac{ny}{b} \right)} dx dy \quad (7)$$

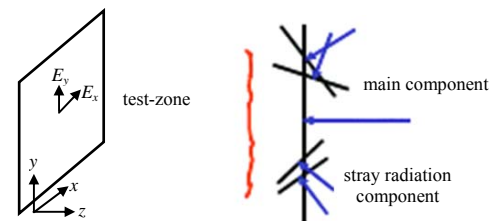


Fig.8 Stray planar wave fronts in compact range quiet zone

图 8 紧缩场静区场分布示意图

其中紧缩场静区场分布为已知，如前所述，通过静区扫描测试的方法得到，因此可计算得到各方向上平面波来波的幅度系数，即可得到各方向的波谱分布。利用自研波谱分析软件，对测试得到的静区曲线进行了波谱分析， $f=1.2$  GHz 平面波谱分布图见图 9。

从平面波谱分析结果可看出，该测试场的杂散波谱电平很低，说明测试场的静区质量是很高的。

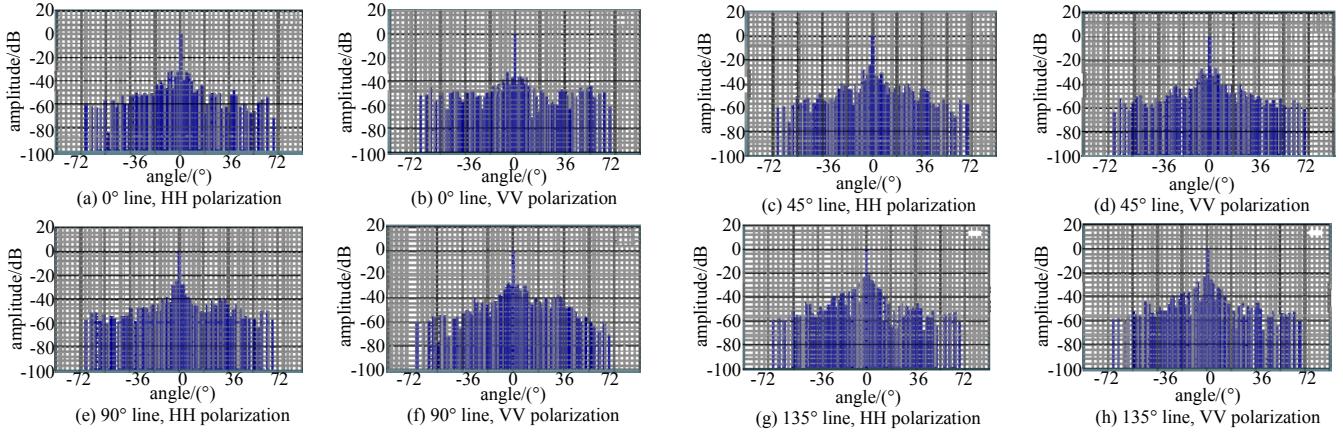


Fig.9  $f=1.2$  GHz planar wave spectrum  
图 9  $f=1.2$  GHz 平面波谱分布图

#### 4 紧缩场天线测试精确度再提升的方法及精确度提升处理结果

##### 4.1 紧缩场天线测试精确度再提升的方法

紧缩场测试中，位于静区中的待测天线接收的信号和理想平面波之间<sup>[8-9]</sup>的关系可以通过线性算子  $\Gamma$  表示。

$$\Gamma_{\alpha'\beta'}(e^{jkz}) = F(\alpha', \beta') \tag{8}$$

式中： $e^{jkz}$  是入射的理想平面波； $\alpha'$  和  $\beta'$  是方位角和俯仰角。 $F(\alpha', \beta')$  表示当用理想平面波照射时的天线测试方向图。用式(5)给出的测试区场  $E_{cr}$  代替理想平面波，应用线性算子  $\Gamma$  有

$$\Gamma_{\alpha'\beta'}(E_{cr}) = E_0 \left[ \Gamma_{\alpha'\beta'}(e^{jkz}) + \sum_{m=-M}^{m=M} \sum_{n=-N}^{n=N} A_{mn}(k) \Gamma_{\alpha'\beta'} \left( e^{2\pi j \left( \frac{x}{a} + \frac{y}{b} + pz \right)} \right) \right] \tag{9}$$

求解公式(9)得到

$$F_{cr}(\alpha', \beta') = E_0 \left[ F(\alpha', \beta') + \sum_{m=-M}^{m=M} \sum_{n=-N}^{n=N} A_{mn} F(\rho_{mn}, \mu_{mn}) \right] \tag{10}$$

其中，紧缩场测试的天线方向图定义为  $F_{cr}(\alpha', \beta')$ ，对式(10)做进一步推导得到理想方向图函数表示为

$$F(\alpha', \beta') = \frac{F_{cr}(\alpha', \beta')}{E_0} - \sum_{m=-M}^{m=M} \sum_{n=-N}^{n=N} A_{mn} F(\rho_{mn}, \mu_{mn}) \tag{11}$$

理想方向图函数可以通过迭代方法来计算，迭代过程第 1 步的方向图表示为

$$F_1(\alpha', \beta') = \frac{F_{cr}(\alpha', \beta')}{E_0} - \sum_{m=-M}^{m=M} \sum_{n=-N}^{n=N} A_{mn} \frac{F_{cr}(\rho_{mn}, \mu_{mn})}{E_0} \tag{12}$$

迭代过程第  $n$  步的方向图表示为

$$F_n(\alpha', \beta') = \frac{F_{cr}(\alpha', \beta')}{E_0} - \sum_{m=-M}^{m=M} \sum_{n=-N}^{n=N} A_{mn} F_{n-1}(\rho_{mn}, \mu_{mn}) \tag{13}$$

由于系数  $A_{mn}$  的幅度远小于 1，因此该迭代过程很快能够收敛。即  $n$  步迭代后的结果达到了所需的处理精确度要求，可认为是所需获取的理想平面波照射环境下的天线方向图。

##### 4.2 Ku 反射面天线紧缩场测试精确度提升结果

根据 Ku 反射面天线紧缩场的实测结果，利用  $f=20$  GHz 和  $0^\circ$  线一维平面波谱分析结果，使用自研软件，进行测试精确度提升的数据处理，得到精确度提升后的处理结果，如图 10 所示。从处理前、后的结果比对，可看出精确度提升的实际效果不是非常明显，也说明紧缩场在该频段的静区性能优良，杂散影响程度很低。

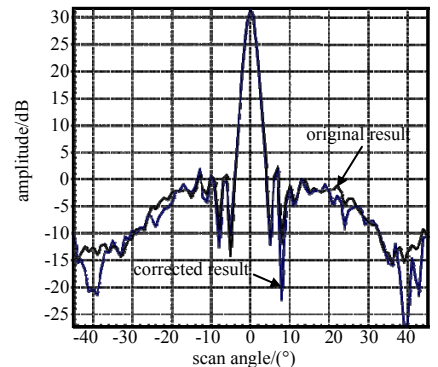


Fig.10 Compact range test curve of navigation Ku band reflector antenna and promote accuracy post-treatment curve  
图 10 导航 Ku 反射面天线紧缩场测试结果及精确度再提升后处理结果

## 5 结论

通过对紧缩场静区性能的测试及幅度、相位锥度与起伏程度的处理分析，与紧缩场性能指标相比较，可以对紧缩场场地性能进行评判；对实际静区测试结果进行平面波谱分析，可以进一步清晰地获得紧缩场场地杂散的来波方向及相对电平，对分析场地杂散的来源及去除杂散都提供了依据，同时平面波谱分析结果，可用于紧缩场测试精确度的提升，以观察场地杂散对最终测试结果的影响程度。通过实测，给出具体的波谱分析结果及精确度提升处理结果，提供一种有效的紧缩场性能评测方法，未来可用于对紧缩场测试场系统的计量评测。

### 参考文献：

- [ 1 ] 张晓平. 天线增益及极化特性的计量测试技术[G]// 第二届计量测试与航天发展论坛文集. 北京:北京航天计量测试技术研究所, 2015. (ZHANG Xiaoping. Antenna gain and polarization performance metrology technology[G]// The Second Metering Measurement and Space Development Forum. Beijing:Beijing Aerospace Institute for Metrology and Measurement Technology, 2015.)
- [ 2 ] NEWELL A,BAIRD R,WACKER P. Accurate measurement of antenna gain and polarization at reduces by an extrapolation technique[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1973,21(4):418-431.
- [ 3 ] KERNS David M. Plane-wave scattering-matrix theory of antennas and antenna-antenna interactions[R]. Washington,DC, USA:National Bureau of Standards(NBS), 1981:1-162.
- [ 4 ] 张晓平. 卫星整星状态下的紧缩场测试技术[J]. 航天器环境工程, 2006,23(4):194-200. (ZHANG Xiaoping. Satellite system level RF performance test technique in compact range[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2006,23(4):194-200.)
- [ 5 ] 张晓平. 天线紧缩场测试技术研究[J]. 航天器环境工程, 2006,23(6):321-328. (ZHANG Xiaoping. Antenna test technique research in compact range[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2006,23(6):321-328.)
- [ 6 ] ZHANG Xiaoping,ZHOU Huaian,NIU Xiaolong. Test of wide beam low-directional satellite antenna in compact range[C]// 29th Annual Symposium of the Antenna Measurement Techniques Association(AMTA). St. Louis,Missouri,USA:AMTA, 2007:141-145.
- [ 7 ] HARTTMAN J. CCR120/100 system handbook[G]// Atrium AAMS Handbook. 2005.
- [ 8 ] 张晓平. 测试理论在紧缩场天线测试中的新应用[J]. 航天器环境工程, 2012,29(3):340-344. (ZHANG Xiaoping. Measurement theory new application in compact range antenna test[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2012,29(3): 340-344.)
- [ 9 ] VAN de Coevering. ARCS analysis-processing reference manual[G]// March ARCS Handbook. 2010.

### 作者简介：



张晓平(1964-), 女, 河南省平顶山市人, 研究员, 主要研究方向为航天器天线及系统测试.email:xiaopzhang@vip.sina.com.

李 博(1983-), 男, 河北省保定市人, 硕士, 工程师, 主要研究方向为航天器天线及系统测试.

罗钦成(1995-), 男, 北京市人, 在读本科生, 主要研究方向为计算机软件编程设计.

冯 旭(1985-), 男, 辽宁省锦州市人, 硕士, 工程师, 主要研究方向为科研管理.

樊 勇(1983-), 男, 河北省阜城县人, 硕士, 工程师, 主要研究方向为航天器天线及系统测试.

陈 雷(1986-), 男, 吉林省榆树市人, 博士, 工程师, 主要研究方向为航天器天线及系统测试.