测试理论在紧缩场天线测试中的新应用

张晓平
（北京空间飞行器总体设计部，北京 100094）

摘要：文章以中国空间技术研究院紧缩场测试系统的组成和特点为例，分析介绍了紧缩场测试误差的来源、测试设备必要的升级改造和测试软件的更新应用。通过将测试理论知识应用于测试工程实际，可有效去除由于测试场非理想因素引入的各类测试误差，获得更接近天线实际性能的测试结果；同时有效分析处理测试数据，简化实际测试工作，提高测试效率。

关键词：紧缩场；天线测试；测试理论；数据处理；波谱分析
中图分类号：V416.6；TN82 **文献标识码**：A **文章编号**：1673-1379(2012)03-0340-05
DOI：10.3969/j.issn.1673-1379.2012.03.021

0 引言

长期以来，紧缩场天线测试工作多使用计算机软件控制测试仪器设备进行自动化测试，再经过测试数据后处理，得到所需的增益方向图等天线辐射电性能。这种方法对测试数据进行深入分析和再处理的能力非常有限，通常是通过对实际测试场地条件、测试仪器设备使用状况及测试过程实际情况进行分析，来确定误差来源、分析估计误差量级，进行综合的误差分析评估工作，确定紧缩场整体测试误差，且大多只是对测试误差的评估，而不包含更进一步的误差去除和误差校正工作。

中国空间技术研究院 CCR120/100 大型紧缩场始建于 2005 年，由德国 ASTRIUM 公司承建[1]。近年来，随着科学技术的不断进步和发展，以及国际技术交流的逐渐深入，中国空间技术研究院紧缩场测试技术能力及水平得到持续提升；且伴随着电磁场理论技术及理论知识与实际测试工作的紧密结合及广泛应用，紧缩场测试精度一直稳步提高。本文简要介绍了中国空间技术研究院在紧缩场测试技术领域通过将理论知识与工程实践相结合所取得的技术进步。

1 紧缩场测试误差的分析

对于紧缩场测试技术领域而言，难点之一是对测试误差源的抑制和测试误差的分析工作。如何建立比较理想的紧缩场场地测试环境，抑制暗室墙体、地面等的反射和多径杂波电平，以及如何设计大型反射面系统的构型，包括反射面边缘结构形式，以获得更优的测试静区质量，一直都是紧缩场建设的重点。

中国空间技术研究院紧缩场采用超大型的补偿型主、副反射面系统，形成大尺寸的近似理想平面波的测试环境；暗室墙体铺设高性能吸波材料以抑制反射电平；通过在馈源左前方和右前方设置挡波柱，抑制馈源到静区的直接泄漏影响及馈源对主反射面边缘直接照射引入的干扰射线影响；通过主、副反射面边缘的锯齿结构设计，抑制反射面边、角的绕射影响。尽管如此，实际紧缩场仍有许多误差源存在，对测试结果可造成不同程度的影响。而对紧缩场测试误差的分析也只能基于测试方法层面，进行简单的测试误差评估。表 1～表 3 是对 Ku 频段增益 25 dBi 以上反射面天线紧缩场测试误差的分析结果，其中包含测试过程可能存在的各项误差和误差量值，并综合给出总的方均根误差量值。需说明的是，以下分析是基于最劣情况的误差分析，即在进行误差分析时假定多径干扰来波方向与待测天线的最大辐射方向一致。

收稿日期：2011-09-11；**修回日期**：2012-05-18
作者简介：张晓平（1964—），女，研究员，主要从事天线测试工作。E-mail：xiaopzhang@vip.sina.com。

表 1　Ku 波段天线在紧缩场中的天线方向图测试主要误差[2]
Table 1　The error of Ku band antenna pattern measurement in compact range

误差项	误差干扰电平/dB
馈源交叉极化隔离度	-74.82
馈源失配	-82.77
测试转台系统	-82.77
测试转台的失配	-79.25
馈源到静区的直接泄漏	-52.22
静区内场的锥度影响	-65.33
接收机幅度非线性影响	-76.76
接收机动态范围影响	-71.91
多路径反射的影响	-73.24
暗室的散射影响	-70.75
RF 泄漏和交调	-74.82
其他误差	-74.82
方均根误差	-51.78

表 2　Ku 波段天线在紧缩场中的天线交叉极化测试主要误差
Table 2　The error of Ku band antenna XPD measurement in compact range

误差项	误差干扰电平/dB
馈源交叉极化隔离度	-74.82
馈源失配	-82.77
测试转台系统	-82.77
测试转台的失配	-79.25
馈源到静区的直接泄漏	-52.22
静区内场的锥度影响	-65.33
接收机幅度非线性影响	-76.76
接收机动态范围影响	-71.91
多路径反射的影响	-73.24
暗室的散射影响	-70.75
RF 泄漏和交调	-74.82
附加的交叉极化影响	-55.57
其他误差	-74.82
方均根误差	-50.27

表 3　Ku 波段天线在紧缩场中的天线增益测试主要误差[1]
Table 3　The error of Ku band antenna gain measurement in compact range

误差项	测试误差/dB
天线瞄准精度	0.01
馈源增益精度	0.10
馈源测试方法	0.02
待测天线测试方法	0.02
自由空间路径损耗	0.03
衰减器的校准	0.05
静区内场的锥度影响	0.02
待测天线 VSWR	0.03
馈源 VSWR	0.02
多路径反射的影响	0.08
暗室的散射影响	0.01
RF 泄漏和交调	0.01
发射端功率计读数误差	0.02
接收端功率计读数误差	0.10
其他误差	0.03
增益测试误差	0.23

国内紧缩场理论设计水平已达到了国际先进水平；只是为降低紧缩场的测试误差，在设计方面更保守一些，如采用更大尺寸的暗室、更大的反射面尺寸及更长的反射面边齿尺寸；为降低成本，选用了国产的吸波材料，同时为补偿国产吸波材料性能的不足，选用更大尺寸的吸波材料等。而在误差分析方面，国内往往难以给出具体详尽的逐项误差分析量级，只能给出粗略的误差评估结果。

2　紧缩场天线测试系统的必要升级

原有的中国空间技术研究院紧缩场采用 Agilent 85301B 天线测试系统，尽管测试稳定性高，但测试速度非常慢，多频点测试能力非常有限，因此对其进行了必要的升级。采用 RS-ZVA 矢网作为接收机，将 ZVA 内部的双源用做天线测试系统的发射信号源和本振信号源，使得频率切换无须任何触发连接和触发等待时间，可以实现天线测试过程的宽带海量频点测试，测试速度可提高 20～100 倍。而利用宽带海量频点测试所获得的大量数据，又可以在后期数据处理过程中进行时域分析和应用软件门技术。需说明的是，上述的测试设备升级虽然不会改善原有紧缩场的测试误差量级，但为后续进一步去除数据处理和测试误差提供了可能，因此设备升级后的紧缩场测试误差将会明显减小。如暗室散射杂波及多径效应、馈源到静区的直接泄漏、静区内场的锥度影响等均有降低，可对照表 1～表 3 的记录数据获得测试精度提升的定量评估。具体的分析评估量级需根据具体测试情况确定，如测试频段、选取的测试频点数、待测天线及星体载体状态等，可获得的精度提高程度有所不同。

3　紧缩场天线测试软件的更新

将紧缩场测试软件更换为具有很强后处理能力的 ARCS 紧缩场专用测试软件，其突出特点是将测试理论知识有效地应用于测试工程实际，使得紧缩场实际测试数据经过进一步的分析处理后，能得到更为精确的测试结果，同时简化实际测试工作，有效提高测试效率。

3.1　紧缩场测试数据的时域分析处理方法

为获得有效的宽带测试数据，首先测试待测天线的幅频特性，以确定待测天线可支持的最大工作

频带宽度；然后在待测天线可工作的频带内进行至少 201 个频点，甚至更多频点（如 2 001 频点、4 001 频点或 8 001 频点）的天线方向图测试；再将获得的海量频点测试结果，通过 Fourier 变换得到时域范围内不同时间、不同方向上到达待测天线的各类杂散信号情况。频域测量的带宽越大，则时域分辨率越高；频域测量的频点数越多，则进行时域分析的可见范围越大。

升级天线测试接收机系统，采用 RS-ZVA 矢网实现高速海量频点测试，这样测试所获得的大量数据可以进行充分的时域分析和处理。通过时域分析，加滤波窗（也称时域软件门）去除明显的杂波干扰信号后，再变换到频域，可以获得更精确的测试结果。

采用时域软件门的分析处理方法，可以去除紧缩场测试中绝大部分的杂散多径干扰信号影响，是一种非常有效的去除干扰的方法，其实现的条件是硬件须升级、测试速度须保证、测试频点数须足够多、时域分析须充分有效。图 1 所示为应用软件门处理数据的过程及处理结果。

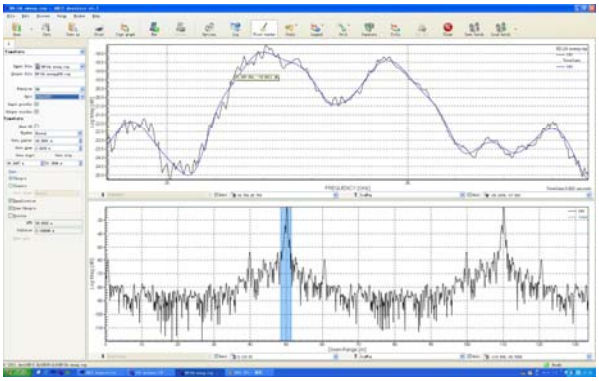

图 1 应用软件门处理数据的过程及处理结果
Fig. 1 The time domain processing sequences and results

3.2 紧缩场平面波波谱分析处理方法

首先需要对紧缩场静区内不同深处各横截面上照射场随径向位置变化的幅相分布进行充分的测试，作为已知的场地平面波特性保留下来。紧缩场静区内场分布可采用扫描架扫描测试的方式获得，但测试工作量非常大，不易获得非常全面的静区特性测试结果；采用 RCS 板或条棒进行紧缩场静区特性测试将更容易实现，且测试过程更简化。通过对 RCS 板或条棒的测试获得其 RCS 散射特性，再通过远场至近场的 Fourier 变换，即可获得紧缩场大型反射面口径场分布，即紧缩场静区内场分布特性。如果没有全面的紧缩场静区内场分布特性，可以根据实际测试使用的局部静区情况，对局部静区内场分布特性进行简单的 RCS 板或条棒的 RCS 特性测试，获取所需频率所使用的局部静区场分布特性，即可为本次测试数据的紧缩场平面波波谱分析处理提供条件。

接下来通过紧缩场平面波波谱分析（也称角谱分析）可获得待测天线所在区域的平面波波谱分布，即将紧缩场静区内照射场分布看做是由空间各个方向的平面波来波叠加形成的，如图 2 所示。

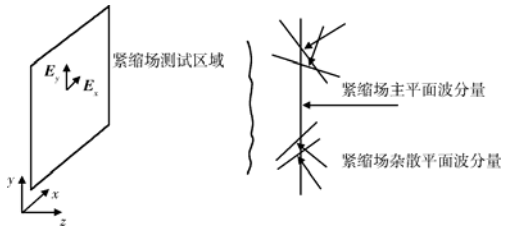

图 2 紧缩场静区场分布示意图
Fig. 2 The test zone field

紧缩场静区场表达式[3]可写为

$$\boldsymbol{E}_{\mathrm{cr}}(x,y,z)=\boldsymbol{E}_0\left[\mathrm{e}^{\mathrm{j}kz}+\sum_{m=-M}^{m=+M}\sum_{n=-N}^{n=+N}\boldsymbol{A}_{mn}(k_x,k_y)\mathrm{e}^{2\pi f(\frac{mx}{a}+\frac{ny}{b}+pz)}\right], \tag{1}$$

其中：

$$m=\frac{a}{\lambda}\sin\alpha\ ;\ n=\frac{b}{\lambda}\cos\alpha\sin\beta\ ;$$

$$p=\sqrt{\frac{1}{\lambda^2}-(\frac{m}{a})^2-(\frac{n}{b})^2}\ 。 \tag{2}$$

通过频域到角域的 Fourier 变换可得到各方向来波的幅度系数为

$$\boldsymbol{A}_{mn}(k_x,k_y)=\frac{1}{ab}\int_{-\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}}\int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}}\left[\frac{\boldsymbol{E}_{\mathrm{cr}}(x,y,0)}{\boldsymbol{E}_0}-1\right]\cdot \mathrm{e}^{-2\pi f(\frac{m}{a}x+\frac{n}{b}y)}\mathrm{d}x\mathrm{d}y\ , \tag{3}$$

其中紧缩场静区场分布为已知，如前所述，可通过静区扫描测试或 RCS 板或条棒测试的方法得到。

因此，可计算得到各方向上平面波来波的幅度系数，进而得到各方向的波谱分布，如图3所示。

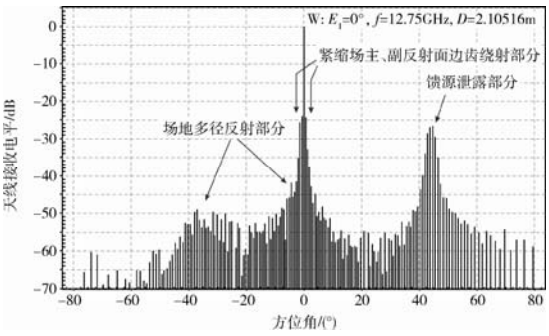

图3　紧缩场各方向平面波波谱分布示意图
Fig. 3　The planar wave spectral components

紧缩场待测天线方向图实际测试结果可看做是待测天线对测试区域内各方向上平面波（各个谱线）的响应，而紧缩场理想平面波只是位于中心位置的一根谱线。最靠近中心位置的谱线是大型反射面边齿产生的平面波谱线照射，是采用时域分析方法也难以去除的绕射干扰信号。而采用待测天线所在区域的平面波波谱分析方法，将多余的波谱信号去除后，再作反卷处理变换回频域，即可获得紧缩场理想平面波照射条件下真实天线性能的精确测试结果。

3.3　利用测试理论知识简化实际工程测试

3.3.1　天线相位中心位置的计算

天线相位中心偏离旋转中心，会使得测试的天线相位方向图出现不对称及相位随旋转角度而发生剧烈变化。当天线相位中心与旋转中心重合时，将得到主辐射区域对称且平坦的相位方向图，因此可以调整天线在转台上的架设位置，并通过测试方式最终找到天线相位中心的位置。为此往往需花费大量的测试时间，且须配置三维滑台进行精细的重复步进测试方可实现天线相位中心位置的测试，测试工作量大，测试精度低；此外还增加了带星体的天线相位中心测试的架设难度，而实际偏心架设状态下的结构变形等因素，又会恶化天线相位方向图的测试结果。

利用测试理论知识，根据天线相位方向图实测结果，采用软件进行 x, y, z 方向偏置位置值的调整，即可获得天线位于相位中心位置条件下的相位方向图。x, y, z 方向偏置位置值就是天线相位中心与测试转台实际旋转中心的位置偏差，可先粗测 x, y, z 方向偏置位置值，再使用软件逐渐调整偏置量，直至得到对称性最好、曲线最为平坦的相位方向图。采用这种理论计算与实际测试相结合的方式，将大为减少天线相位中心位置测试的工作量，降低测试工程的难度，而且分析结果更加精确可靠。

3.3.2　圆口径天线的立体方向图计算

根据理论知识，对于对称圆口径天线，已知任意两个正交切面的辐射方向图即可计算得到其立体方向图，因此只作两个正交切面的方向图测试，就可通过软件计算得到对称圆口径天线的立体方向图，而无须进行大量切面的步进立体方向图测试。这将大为简化工程测试，对整星大功率发射状态的对称圆口径天线尤其具有现实意义，可缩短大功率加注的时间，减少整星测试的工作量，避免在实验室环境下大功率加注对星上设备可能造成的损坏。

3.3.3　Nyquist 采样定律在测试工程中的应用

根据 Nyquist 采样定律，完整地再现待测天线性能的最小取样步进值为 $\lambda/2$，可据此计算出对应的最小采样角度间隔，一般工程实际采用2倍的过采样就足以获得满意的测试结果了。因此在测试之前，根据已知的天线口径尺寸、最高使用频率、最低旁瓣电平，可利用软件首先确定合理的测试采样间隔，然后再采用2倍过采样进行实际测试工作，即可大幅减少实际测试的工作量，缩短不必要的加密测试所耗费的时间。如对于一个4 m口径、工作最高频率为30 GHz、旁瓣电平为-30 dB的天线，应用 Nyquist 采样定律计算得到的2倍过采样的角度间隔为0.8º。而目前用户在实际测试中往往不论天线口径大小都要求0.1º的采样间隔，使得实际的测试工作量和测试时间大幅度增加，浪费在没有意义的步进重复测试上面。

3.3.4　Ludwig 测试坐标系的变换与计算

Ludwig 的3个测试坐标系分别定义如下：

Ludwig-Ⅰ为 O-xyz 直角坐标系；

Ludwig-Ⅱ为俯仰轴步进、方位轴扫描测试，方位轴步进、俯仰轴扫描测试，滚动轴步进、方位轴扫描测试（EL over AZ; AZ over EL; Roll over AZ）分别构成的立体坐标系；

Ludwig-Ⅲ为同极化旋转和交叉极化旋转测试

（Co-pol., Cross-pol.）组成的极化坐标系。即实际测试中，发射天线及接收天线极化轴须同旋或反旋同步转动，分别得到同极化和交叉极化测试结果。

由于这 3 个坐标系之间是可以相互转换的，即已知一个坐标系下的测试结果，可以通过坐标变换得到另一个坐标系下的结果，无须再进行任何附加的测试工作。因此，在实际测试工程中可选取最为方便的架设方式进行测试，再利用软件计算来获得天线在其他测试坐标系下的辐射性能，而无须重复架设和重复测试。这将大为减少测试工作量，简化实际测试工作。

4 结束语

根据紧缩场测试的原理，在紧缩场测试工程中有效地应用测试理论知识分析处理测试数据，采用理论计算与实测相结合的方式获得更加精确的测试结果，使得中国空间技术研究院紧缩场测试技术水平得到大幅度的提升和发展。尤其是测试数据的时域分析处理能力及平面波波谱分析处理能力的提升，使得紧缩场测试精度大大提高；而测试理论知识在软件中的更多应用，使得测试过程得到合理的简化、测试效率大幅提高，最终更好地服务于型号天线测试工作。

参考文献（References）

[1] 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)
Zhang Xiaoping. Measurement technology of satellite antenna and payload in compact range[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2006, 23(4)

[2] Hartmann J. CCR120/100 system handbook[G]//Astrium AAMS Handbook, 2005

[3] Van de Coevering. ARCS analysis-processing reference manual[G]//March ARCS Handbook, 2010

New applications of test theory in measuring antenna performances in compact test range

Zhang Xiaoping
(Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China)

Abstract: This paper describes the components and features of the antenna measurement system for the compact test range built in China Academy of Space Technology by analyzing the source of measurement errors, the necessity for upgrading the measuring apparatus, and the new application of software for measurement. It has been proved in practice that through theoretically analyzing the test data in the real compact range, errors resulted from nonideal factors can be eliminated, and accurate results can be obtained while ignoring some unimportant factors to simplify the test practices.

Key words: compact test range; antenna test; test theory; data processing; wave spectrum analysis

发射快讯

“中星 2A”卫星成功发射

5 月 26 日 23 时 56 分，我国在西昌卫星发射中心用“长征三号乙”运载火箭成功发射“中星 2A”卫星，卫星顺利进入预定转移轨道。

“中星 2A”卫星是中国卫星通信集团有限公司所属的一颗通信广播卫星，由中国航天科技集团公司所属中国空间技术研究院研制。该卫星可为全国广播电台、电视台、无线发射台和有线电视网等机构提供广播电视及宽带多媒体等传输业务，将为我国通信广播事业提供更好的服务。

“长征三号乙”运载火箭由中国航天科技集团公司所属中国运载火箭技术研究院研制。这是长征系列运载火箭的第 163 次飞行。

（摘自 2012-05-27 新华网）