高精度紧缩场的机械精度检测与电性能验证

栾京东 李晓星 周国锋 王魁奎

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100191)

摘 要: 根据天线型面精度的确定依据,建立了以半光程差为最小量的型面精度计算模型,据此编写了天线面板测调程序,对高精度紧缩场的型面精度进行了检测,并采用自由拟合的方法对馈源进行了定位,通过机械精度检测,该紧缩场反射面型面静区精度达到 26 μm,机械精度达到理论和设计要求. 最终的电气测试结果表明该紧缩场在 26 ~ 110 GHz 时具有优良的电气性能,验证了天线机械精度检测结果的正确性. 该方法使机械装调效率显著提高,具有重要的工程应用价值.

关 键 词: 紧缩场; 半光程差; 坐标转换; 型面精度; 电气性能

中图分类号: TB 22; TN 82

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2014)01-0104-06

Mechanical accuracy measuring and electrical performance validation for high-precision compact antenna test range

Luan Jingdong Li Xiaoxing Zhou Guofeng Wang Kuikui

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: Based on the deterministic basis of the surface accuracy for the antenna, computational modeling with the semi-optical path difference as minimum value was established. As a result, a software program for surface measurement and adjustment of reflector antenna was developed. The surface accuracy of the high-precision reflector antenna was measured and antenna feed was positioned using free fixing. The surface accuracy of central zone for the large parabolic reflector antenna is 26 μm. Electrical performance test results show that the compact range has excellent electrical performance in the frequency of 26 ~ 110 GHz, and verify the correctness of the mechanical accuracy test results. This technique not only improves the efficiency of mechanical alignment significantly, but also possesses potential applicable value in engineering.

Key words: compact antenna test range; semi-optical path difference; coordinates transformation; surface accuracy; electrical performance

紧缩天线试验场(CATR, Compact Antenna Test Range)简称紧缩场或紧凑场,可以在近距离上提供一个性能优良的平面波测试区,利用这个测试区可以对被测天线的幅射和分散散射特性进行测量[1-3]. 因为紧缩场系统可以架设在微波暗室中,所以具有全天候测试、操作方便、保密性好等特点[4]. 紧缩场机械精度检测主要涉及天线的几何特性量的测量,通常包括天线反射面型面精度和馈源定位精度两部分,而天线的机械精度与电气性能密切相关. 机械精度的调整不仅要达到理论和设计要求,而且其最终精度检测结果需要由电气性能测试验证. 与一般天线测试不同,紧缩场静区场检测要求测试系统具有更高的机械定位精度和幅相测试精度[5],高精度反射面和精确的馈源定位是保证紧缩场质量的基础. 天线面板的安装调整水平成为影响天线反射面精度的主要因

收稿日期: 2013-03-29; **网络出版时间**: 2013-06-28 17:28

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20130628.1728.002.html

基金项目: 北京航空航天大学 D2020 紧缩场研制项目

作者简介: 栾京东(1984 -),男,山东烟台人,博士生,2008wzgl@sina.com.

素之一. 文献[6]针对面天线检测的离散点拟合计算,提出了 CAD 面型转换法, 并给出按焦距差为最小量的解算方法,但该方法须已知天线的 CAD 模型且算法稳定性较差. 文献[7]针对曲面自由拟合法,提出了分别以轴向偏差、径向偏差、法向偏差和焦距偏差为最小量的 4 种离散点抛物面拟合原则,通过算例发现按照轴向偏差最小算法对初值要求低,收敛速度快. 文献[8]采用多站经纬仪研究了天线反射面安装调整特点,把整个反射面靶标点的均方根差作为最小量,从整体上优化了调整量,但其分解到法向和切向两个方向给调整带来了误差.

在天线的检测和装配过程中,过往一般采用多站经纬仪的测量系统,精度和效率较低,本文采用激光跟踪测量系统,建立了以半光程差为最小量的计算模型,据此编写了天线面板测调程序,指导紧缩场天线的装调,通过电气性能测试对其机械精度进行了验证.

1　紧缩场布局

本文研究的是由北京航空航天大学为某单位设计的一种单反射面高精度紧缩场,对于高精度紧缩场反射面板,蒙皮蜂窝夹层面板在大曲率时精度难以保证,小块拼装易引入拼装误差,在大曲率、高精度要求下,设计采用整体机械加工制造,既保证精度又减少拼装误差[9-10]. 紧缩场面板的理论外形是旋转抛物面,静区尺寸为 2 m × 2 m,工作频率 26 ~ 110 GHz. 图 1 为某紧缩场布局的示意图. 紧缩场反射面为旋转抛物面的一部分,焦距为 F = 5 500 mm,反射面宽度 W = 4 600 mm,反射面高度 H = 4 800 mm.

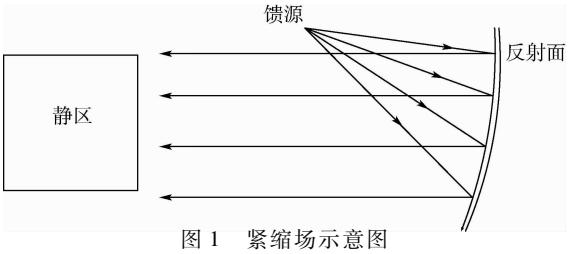


图 1　紧缩场示意图

2　型面精度的理论模型

2.1　型面精度确定依据

天线反射面的型面精度高低决定了紧缩场所能达到的最高工作频率. 文献[11]对于均匀照射的镜面提出用统计方法计算表面误差对天线方向图的影响,得出天线增益与反射面型面精度的关系式:

$$\frac{G}{G_0} = \mathrm{e}^{-\left(\frac{4\pi\sigma}{\lambda}\right)^2} \tag{1}$$

其中,G 为天线实际接收能量;G_0 为无误差时接收的能量;G/G_0 为天线效率;σ 为反射面型面精度;λ 为天线工作波长.

式(1)若用 dB 表示,则

$$\left(\frac{G}{G_0}\right)_{\mathrm{dB}} = -686\left(\frac{\sigma}{\lambda}\right)^2 \mathrm{dB} \tag{2}$$

例如当 $\sigma = \lambda/16$,增益损失为 2.68 dB;当 $\sigma = \lambda/100$,增益损失为 0.068 dB,型面精度越高,增益损失越少. 由此可见,紧缩场的电气性能主要取决于反射面的型面精度,工作频率越高,对型面精度的要求也越高.

如图 2 所示,实际型面相对理论型面有一凹下部分,对于理论型面点,从 A 点反射的射线光程比从其他点反射的射线光程长:

$$\Delta L = |AB| + |AC| = \Delta\rho + \Delta\rho\cos\varphi \tag{3}$$

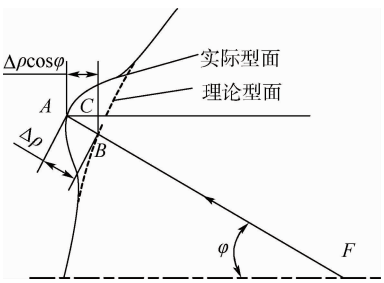


图 2　反射面偏离抛物面示意图

由此引起的最大相位偏差为

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda}\cdot\Delta\rho\cdot(1+\cos\varphi) \tag{4}$$

如果抛物面口面上允许的最大相位偏差为 $\pi/9$,则

$$\left|\frac{2\pi}{\lambda}\cdot\Delta\rho\cdot(1+\cos\varphi)\right| \leqslant \frac{\pi}{9} \tag{5}$$

即

$$|\Delta\rho| \leqslant \frac{\lambda}{18(1+\cos\varphi)} \tag{6}$$

由此可知,对抛物面上不同区域的精度要求是不同的,越接近抛物面顶点精度要求越高($\lambda/36$),口径边缘最低($\lambda/18$),因此抛物面型面精度要求分静区中心精度和整体型面精度.

2.2　型面精度计算模型

假设反射面的理论曲面方程为 $f(x,y,z)=0$,型面的测量点坐标为 (x_i,y_i,z_i), $i=1,2,\cdots,n$, n 为测量点个数. 则反射面型面精度检测问题转换成求多参数非线性最小二乘优化问题[12]:

$$\min f(\boldsymbol{X}) = \min\sum_{i=1}^{n}\delta_i^2 \tag{7}$$

其中,$\boldsymbol{X} = (x,y,z,\alpha,\beta,\gamma,\Delta x,\Delta y,\Delta z,f)$, $\Delta x,\Delta y,$

Δz, α, β, γ 为空间变换六参数, f 为反射面理论焦距; δ_i 为第 i 个测量点到理论型面的误差值. 在工程实际中,大多选取轴向偏差作为最小量,文献[13]分别选取轴向误差和半光程差为最小量进行试验. 计算结果验证选取半光程差作为最小量的拟合算法具有更高的数值计算精度及稳定性. 本文 δ_i 选取半光程差为最小量,以图 3 所示抛物面天线为例,从焦点 F 发出的波,经过反射在前方形成一个等相位面,即对理论面上任意点 A 和 P_1 有

$$|FA| + |AA'| = |FP_1| + |P_1P_1'| \tag{8}$$

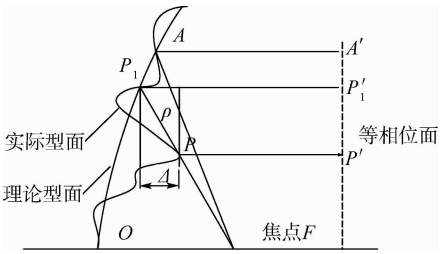


图 3 抛物面半光程差示意图

对实际反射面而言,由于表面存在误差引起天线口径面上各点电磁场产生相位差,使紧缩场的增益降低,旁瓣电平增高[14]. 在图 3 中,假设反射面在 P 点凸出,则从 F 点射向 P 点的电磁波就会少传播一段路程,即所谓的光程差,记为 2δ. 半光程差 δ 就是光程差的一半,即

$$\delta = \frac{\rho + \Delta}{2} \tag{9}$$

设绕 z 轴旋转,焦距为 f 的旋转抛物面理论方程为

$$\frac{x^2 + y^2}{4f} = z \tag{10}$$

其焦点理论坐标为 $(0,0,f)$,其准线绕 z 轴旋转成的平面为 $z = -f$,按照半光程差平方和最小原则拟合抛物面,根据半光程差列出误差方程为

$$\delta = \frac{(z_P + f) - \sqrt{x_P^2 + y_P^2 + (z_P - f)^2}}{2} \tag{11}$$

由于反射面上不同区域的精度要求不同,应该考虑表面点所处的位置,这样才能真实反应各个表面点对整个反射面效率的影响. 引入各个表面点的加权因子[15]:

$$\rho_i = \frac{n_0 q_i s_i}{\sum_{j=1}^{n_0} q_j s_j} \tag{12}$$

其中, s_i 为 i 点影响的反射面积服从均布; q_i 为照度系数; n_0 为型面采样点个数.

由于反射面个别点的半光程差对于整个天线的电气性能不能起到决定性影响,故决定天线性能的是整个反射面各点半光程差的均方根[16],所以衡量反射面天线精度的应该是天线表面点的半光程差的标准差,即

$$\sigma_{\mathrm{rms}} = \sqrt{\sum_{i=1}^{n_0} \frac{\rho_i \delta_i^2}{n_0 - 1}} \tag{13}$$

这就是直接影响紧缩场电气性能的反射面精度模型.

3 机械精度检测

3.1 坐标系转换

机械精度检测中的数据由激光跟踪仪采集,为了方便后续紧缩场的机械检测和调整,需将激光跟踪测量系统坐标系转换到紧缩场的装调坐标系. 装调坐标系主要与紧缩场的电气特性或结构有关,作为转换的过渡,需先将测量坐标系转换到以暗室水平标志点为平面的暗室坐标系.

利用电子经纬仪布置以大地水平为基准的水平面标志点,使得该标志点平面度达到 00 级,以此建立暗室坐标系. 设型面点在测量坐标系下坐标为 (x',y',z'),在暗室坐标系下坐标为 (x,y,z),则两个坐标系之间存在以下转换关系[17]:

$$(x,y,z)^{\mathrm{T}} = \boldsymbol{R}(x',y',z')^{\mathrm{T}} + (\Delta x,\Delta y,\Delta z)^{\mathrm{T}} \tag{14}$$

其中 $\boldsymbol{R}$ 称为旋转矩阵.

两个坐标系之间转换的旋转模式有多个,本文采用 Kardan 旋转阵,则 $\boldsymbol{R} = \boldsymbol{R}_x(\alpha)\boldsymbol{R}_y(\beta)\cdot\boldsymbol{R}_z(\gamma)$,其中 $\boldsymbol{R}_x(\alpha)$, $\boldsymbol{R}_y(\beta)$, $\boldsymbol{R}_z(\gamma)$ 分别为绕 x, y, z 轴的单次旋转矩阵[18]:

$$\left.\begin{aligned}
\boldsymbol{R}_x(\alpha) &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & \sin\alpha \\ 0 & -\sin\alpha & \cos\alpha \end{pmatrix} \\
\boldsymbol{R}_y(\beta) &= \begin{pmatrix} \cos\beta & 0 & \sin\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\beta & 0 & \cos\beta \end{pmatrix} \\
\boldsymbol{R}_z(\gamma) &= \begin{pmatrix} \cos\gamma & \sin\gamma & 0 \\ -\sin\gamma & \cos\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}
\end{aligned}\right\} \tag{15}$$

计算得到旋转矩阵 $\boldsymbol{R}$ 如下:

$$\boldsymbol{R} = \begin{bmatrix} \cos\gamma\cos\beta & \sin\gamma\cos\alpha - \cos\gamma\sin\beta\sin\alpha & \sin\gamma\sin\alpha + \cos\gamma\sin\beta\cos\alpha \\ -\sin\gamma\cos\beta & \cos\gamma\cos\alpha + \sin\gamma\sin\beta\sin\alpha & \cos\gamma\sin\alpha - \sin\gamma\sin\beta\cos\alpha \\ -\sin\beta & -\cos\beta\sin\alpha & \cos\beta\cos\alpha \end{bmatrix} \tag{16}$$

在测量坐标系下测量水平标志点的坐标,计算得到 6 个空间转换参数(Δx, Δy, Δz,α,β,γ),据此建立了暗室坐标系,而装调坐标系由暗室坐标系平移得到,其中平移量 ΔX, ΔY, ΔZ 满足:

$$\left.\begin{aligned}\Delta X &= \frac{1}{m}\left(\sum_{i=1}^{m} X_i - \sum_{i=1}^{m} x_i\right)\\ \Delta Y &= \frac{1}{m}\left(\sum_{i=1}^{m} Y_i - \sum_{i=1}^{m} y_i\right)\\ \Delta Z &= \frac{1}{m}\left(\sum_{i=1}^{m} Z_i - \sum_{i=1}^{m} z_i\right)\end{aligned}\right\} \tag{17}$$

其中,(X_i, Y_i, Z_i)是面板标志点在设计坐标系下的理论坐标;(x_i, y_i, z_i)是面板标志点在暗室坐标系中的测量值,$i = 1, 2, \cdots, m$,m 为标志点个数.

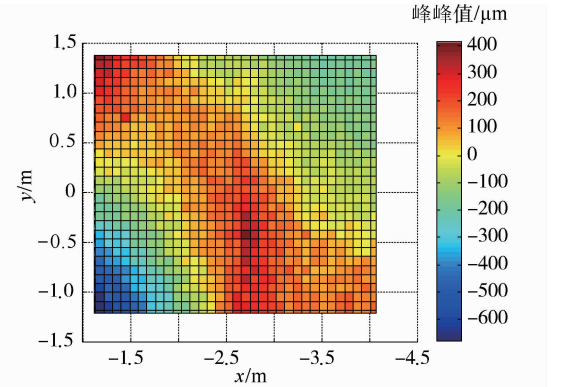
3.2　反射面型面精度检测

反射面型面精度检测的实质是实现实际型面与理论型面之间的最佳匹配.反射面与调整背架和底板之间用调整螺钉连接,分别调整面板的 6 个自由度,通过调节自由度将反射面调整到型面最佳位置.

首先在建立好的装调坐标系下,将面板上的标志点调节到理论位置,在反射面“到位”的前提下,采集型面测量点,通过优化将最佳拟合位置作为反射面的最佳位置.为了使每次调整后的天线反射面型面误差能直观反映出来,以上述天线面板精度计算模型为基础,编写了抛物面天线面板测调程序.

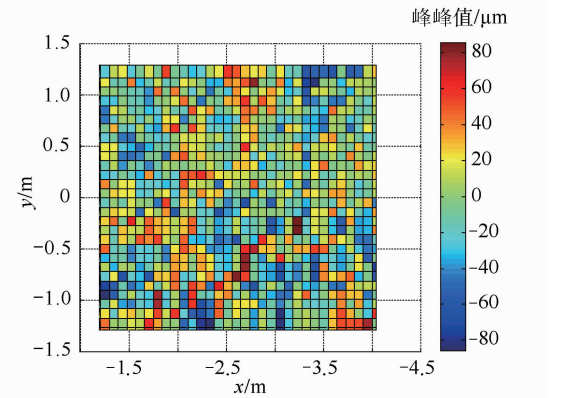
在反射面面板拼装到位后,利用激光跟踪仪的空间扫描来采集型面测量点的数据,通过程序处理,其结果如图 4a 所示.图中正偏差表示面板型面凸出部分,负偏差表示凹进部分.从图中可以看出,左上角到右下角的对角线方向整体凸出,另两个对角方向凹下,型面误差较大,还有很大调整余量.通过多次调整最终型面精度分布如图 4b 所示,从图中可以看出,型面整体误差分布均匀,可调余量很少.

型面精度的最终确定采用反射面的自由拟合值[19].对于紧缩场而言,北京航空航天大学现执行标准一般要求反射面整体型面精度达到紧缩场最小工作波长的 1/100.该紧缩场最高工作频率要达到 110 GHz,需整体型面精度达到 28 μm以内,自由拟合结果如表 1 所示,整体型面精度自由拟合值为 27 μm,静区型面精度达到 26 μm,满足理论要求,最终结果还需电气性能测试验证.



RMS:161.5 μm;误差最大值:415.5 μm;误差最小值:−677.5 μm

a　初始型面误差分布



RMS:29.3 μm;误差最大值:94.3 μm;误差最小值:−85.7 μm

b　最终型面误差分布

图 4　面板型面误差分布图

表 1　反射面型面精度自由拟合结果

反射面分区	面板参数/μm		
	最大误差值	最小误差值	RMS
中心区	80.8	−71.7	26
整体型面	94.3	85.7	27

3.3　馈源定位

反射面天线的性能与其馈源和反射面的相对位置密切相关.通常馈源的定位可依据拟合最佳吻合抛物面所确定的焦点,调整馈源的相位中心到拟合的焦点上[20].

反射面安装结束后,整体动态扫描型面,通过自由拟合测量点得到反射面的焦点坐标,将反射面的自由拟合焦点作为馈源的相位中心.最终定位数据见表 2.定位精度要求平行(y,z 方向)0.27 mm、垂直(x 方向)0.81 mm,最终定位精度 x:0.010 mm,y:0.031 mm,z:0.038 mm,完全满足设计要求,同样结果也需要电气性能测试验证.

表 2　馈源坐标定位结果　　mm

馈源定位坐标	x	y	z
相位中心理论坐标	0	0	5500
整体拟合焦点坐标	−1.504	0.410	5504.623
馈源调整最终坐标	−1.514	0.379	5504.585
定位误差	0.010	0.031	0.038

4 电性能测试验证

实际工程中机械精度结果的好坏是由电测结果决定的. 对紧缩场性能鉴定有多种方法,国际上最通用的方法是探头扫描法,即用标准探头直接对紧缩场测试区准平面波场的幅度和相位进行测试评估[21].

经过综合的电性能测调,该紧缩场获得了良好的电性能指标. 图 5 和图 6 分别为在 32 GHz 及 100 GHz 频点处,静区范围内竖直中线及水平中线上的幅值和相位曲线,测试范围为 2 m. 对实测数据曲线进行拟合得到拟合中值曲线,该曲线上静区中心与静区边缘的幅度之差代表幅值锥削度,实测数据曲线围绕在中值曲线附近波动的峰峰值表示波纹度,对于幅值曲线锥削度要求在 1 dB以内,波纹度要优于 ±0.5 dB;而对于相位曲线,波纹度要求最大相位偏差在 20°以内.

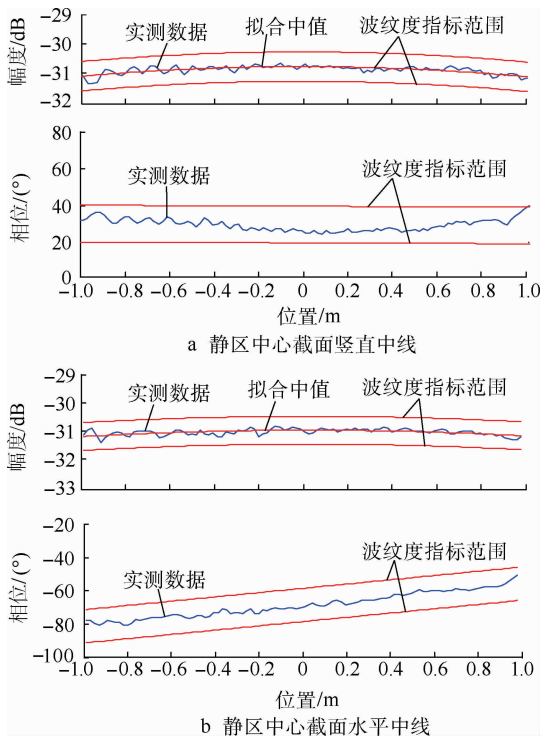


图 5 32GHz 频点处静区内实测曲线

实际测试结果表明,该紧缩场的电气性能满足相应的设计指标. 其中,32 GHz 频点处的测试结果对于指标要求还存有一定的余量,根据场的连续性原理,可以预期,紧缩场在该频点处的实际可工作静区尺寸还会大于 2 m × 2 m 的范围. 在 100 GHz 频点处,幅值测试结果同样满足相应的指标要求,由于相位信息在高频处受面板制造、场地环境、扫描探针定位精度等因素的影响,在静区边缘处的测试结果稍微超出指标要求,但实际可工作静区尺寸仍接近 2 m × 2 m. 天线电气性能测试结果验证了天线型面测量结果的正确性.

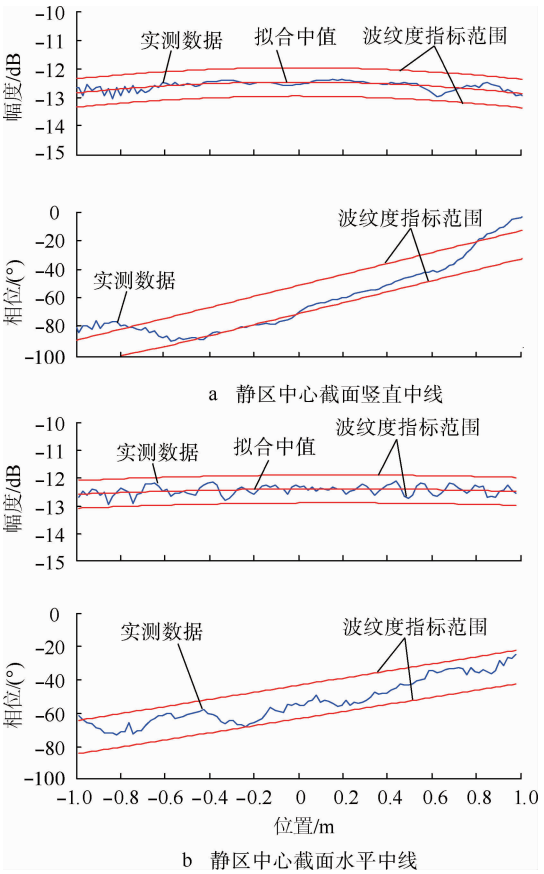


图 6 100 GHz 频点处静区内实测曲线

5 结 论

本文针对高精度反射面天线检测和装配,基于激光跟踪测量系统,提出以半光程差为最小量的机械精度检测方法,其在工程中得到了有效应用.

该高精度紧缩场静区型面精度达到 26 μm,整体型面精度达到 27 μm,馈源定位在 3 个坐标方向误差在 40 μm 以内,满足设计要求,最终电气性能测试数据显示,在所测频点范围内,幅值范围在 1 dB 以内,最大相位偏差基本在 20°以内. 电测结果验证了天线型面测量结果的正确性,该紧缩场在 26 ~ 110 GHz 时具有优良的电气性能.

参考文献 (References)

[1] Olver A D. Compact antenna test ranges[C]//ICAP 91. Seventh International Conference on Antennas and Propagation. London: IEE, 1991: 99 - 108

[2] Karttunen A, Ala-Laurinaho J, Vaaja M, et al. Antenna tests with a hologram-based CATR at 650 GHz[J]. IEEE Trans on Antennas and Propagation, 2009, 57(3): 711 - 720

[3] Iversen P, Boumans M, Burgos S. Mini compact range for automotive radar antenna testing[C]//6th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP). Prague: IEE, 2012:

2240 – 2243

[4] 全绍辉,何国瑜,徐永斌,等. 一种高性能反射面紧缩场[J]. 北京航空航天大学学报,2003,29(9):767 – 769
Quan Shaohui, He Guoyu, Xu Yongbin, et al. High performance single reflector compact range[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2003, 29(9): 767 – 769 (in Chinese)

[5] Johnson R C, Ecker H A, Moore R A. Compact range techniques and measurements[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1969, 17(5): 568 – 576

[6] 李宗春,李广云,金超. 面天线检测数据处理方法的探讨[J]. 宇航计测技术,2003,23(2):12 – 19
Li Zongchun, Li Guangyun, Jin Chao. On the data processing methods of surface antenna's calibration[J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2003, 23(2): 12 – 19 (in Chinese)

[7] 陈继华,李广云. 离散点的抛物面拟合研究[J]. 无线电工程,2005,35(4):39 – 43
Chen Jihua, Li Guangyun. The study on paraboloid fitting of discrete points[J]. Radio Engineering of China, 2005, 35(4): 39 – 43 (in Chinese)

[8] 王伟,段宝岩,马伯渊. 一种大型反射面天线面板测试与调整方法及其应用[J]. 电子学报,2008,36(6):1114 – 1118
Wang Wei, Duan Baoyan, Ma Boyuan. A method for panel adjustment of large reflector antenna surface and its application[J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(6): 1114 – 1118 (in Chinese)

[9] 王兆峻,陈五一. 大型紧缩场反射面板的变形分析与控制[J]. 航空学报,2004,25(4): 416 – 419
Wang Zhaojun, Chen Wuyi. The deformation analysis and control of compact antenna range reflecting panel[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2004, 25(4): 416 – 419 (in Chinese)

[10] 周贤宾,郝长岭,李东升,等. 高精度反射面板的形面调节新技术[J]. 北京航空航天大学学报,2009,35(2):127 – 131
Zhou Xianbin, Hao Changling, Li Dongsheng, et al. New technique of contour adjustment for high precision reflector panels[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2009, 35(2): 127 – 131 (in Chinese)

[11] Ruze J. Antenna tolerance theory: a review[J]. Proceedings of the IEEE, 1966, 54(4): 633 – 642

[12] 王从思,段宝岩,仇原鹰. 基于最小二乘法的天线变形反射面的拟合[J]. 现代雷达,2004,26(10):52 – 55
Wang Congsi, Duan Baoyan, Qiu Yuanying. Fitting of distorted reflector antenna surface based on least square method[J]. Modern Radar, 2004, 26(10): 52 – 55 (in Chinese)

[13] 周国锋,李晓星. 基于半光程差的天线反射面型面精度检测[J]. 北京航空航天大学学报,2010,37(6):723 – 727
Zhou Guofeng, Li Xiaoxing. Base on semi-optical path difference of antenna reflector surface accuracy detection[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2010, 37(6): 723 – 727 (in Chinese)

[14] Bahadori K, Rahmat-Samii Y. Characterization of effects of periodic and aperiodic surface distortions membrane reflector antennas[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2005, 53(9): 2782 – 2791

[15] Anderson L J, Groth L H. Reflector surface deviations in large parabolic antennas[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1963, 11(2): 148 – 152

[16] Rahmat-Samii Y. An efficient computational method of characterizing the effects of random surface errors on the average power pattern of reflectors[J]. IEEE Transactions of Antennas and Propagation, 1983, 31(1): 92 – 98

[17] 李宗春,李广云. 天线几何量测量理论及其应用[M]. 北京:测绘出版社,2009
Li Zongchun, Li Guangyun. Measuring theory, technique and application of antenna [M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 2009 (in Chinese)

[18] Butler B P, Forbes A B, Harris P M. Algorithms for geometric tolerance assessment[R]. B0018QIC00, 1994

[19] 陆佳艳,瞿剑苏. 复合材料天线反射面的测量与分析[J]. 计测技术,2012,32(4):42 – 44
Lu Jiayan, Qu Jiansu. Measurement and analysis of composite antenna reflector[J]. Metrology & Measurement Technology, 2012, 32(4): 42 – 44 (in Chinese)

[20] 宋立伟,段宝岩,郑飞. 变形反射面天线馈源最佳相位中心的研究[J]. 北京理工大学学报,2009,29(10):894 – 897
Song Liwei, Duan Baoyan, Zheng Fei. A study on the optimal feeds phase center for distorted reflector antennas[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2009, 29(10): 894 – 897 (in Chinese)

[21] 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 Microwaves, 2003, 19(2): 77 – 80 (in Chinese)