

# 宽频带多波束抛物环面抗干扰天线特性分析及研究

刘 鹏, 邓阳光, 李现敏, 孔 萌, 钞 婷

西安航天天绘数据技术有限公司, 陕西 西安

收稿日期: 2026年3月23日; 录用日期: 2026年4月15日; 发布日期: 2026年4月22日

## 摘 要

结合抛物环面天线的电性特点, 采用宽频带馈源组阵设计, 利用接收信号的方向图特点, 建立天线系统仿真模型, 并对天线模型进行优化分析, 使用三维电磁仿真软件进行仿真设计, 从工作频带、辐射特性、抗干扰性能、波束覆盖角域等特性开展设计及研究, 结合系统实测结果, 实现了宽频带多波束抛物环面抗干扰天线在电子对抗技侦领域的应用。

## 关键词

宽频带, 多波束, 抛物环面, 抗干扰, 电子对抗

# Analysis and Research on the Characteristics of Wideband Multi-Beam Toroidal Parabolic Antenna for Anti-Interference

Peng Liu, Yangguang Deng, Xianmin Li, Meng Kong, Ting Chao

Xi'an Aerospace Remote Sensing Data Technology Co., Ltd., Xi'an Shaanxi

Received: March 23, 2026; accepted: April 15, 2026; published: April 22, 2026

## Abstract

By combining the electrical characteristics of parabolic torus antennas, a wideband feed array design is adopted. Using the pattern characteristics of received signals, a simulation model of the antenna system is established and optimized. The simulation and design are carried out by employing three-dimensional electromagnetic simulation software. The design and research are carried out in terms of operating frequency band, radiation characteristics, anti-jamming performance, beam

coverage angular domain and other properties. Combined with the measured results of the system, the application of wideband multi-beam parabolic torus anti-jamming antennas in the field of electronic countermeasures and technical reconnaissance is realized.

## Keywords

Wideband, Multi-Beam, Toroidal Parabolic, Anti-Interference, Electronic Warfare

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

在电子对抗应用中,为了提高设备工作效率,天线系统应具备宽频带、高增益、低旁瓣、抗干扰、广角域波束覆盖等性能特点,且需满足技侦任务全天候工作的工作需要。目前实现多波束的方式,主要有数字相控阵体制、模拟相控阵体制、抛物面多波束体制等,相控阵天线系统组成相对复杂,有源器件较多,费效比较低,基于此提出了一种在费效比、设备性能、系统可靠性上相对均衡的多波束天线解决方案——宽频带多波束抛物环面天线。

## 2. 应用分析

结合电子对抗技侦任务特点,从技术实现、研制成本、任务工况方面,对相控阵多波束体制、抛物面多波束体制系统进行对比分析。

技术实现方面:相控阵多波束系统具有波束合成灵活、波束角域覆盖广的优点,但由于其设备组成复杂,集成度高,设计难度大,技术能力要求较高,技术实现难度大,相控阵多波束系统费效比较低。抛物面多波束系统构成相对简单,设备相对独立,易于实现。

研制成本方面:本项目带宽为 6~18 GHz,相对带宽 100%,属于宽带天线,且要求高增益。相控阵多波束系统如需实现超宽带,则采样点多,运算量大,器件量庞大,所需成本高。抛物面多波束系统多为无源器件,加工简单,耐磨耐用,可大幅度降低系统的研制、维护成本。

任务工况方面:相控阵多波束系统由于系统组成复杂,电子元器件多,设备集成度高,工作过程中的散热问题是技术难点,有时因设备散热需要系统间歇性工作,考虑技侦任务全天候任务需求,抛物面多波束系统的可靠性相对较高。

## 3. 宽频带多波束抛物环面抗干扰天线设计

### 3.1. 馈源设计

馈源作为信号接收的核心器件,是抛物环面天线十分重要的信号接收器件,馈源的电性设计直接影响抛物环面天线系统的工作性能。本系统所设计的双脊喇叭馈源是一种工作频段覆盖 6~18 GHz 的线极化喇叭馈源,具有工作频带宽、高频插损小、辐射方向图一致性好的特点,可满足左旋极化信号、右旋极化信号及线极化信号多种极化形式的信号接收,具有较好的信号接收性能,且双脊喇叭馈源具有尺寸小、重量轻、安装方便、可靠性高等特点,满足实际使用需求。

宽频带双脊喇叭馈源性能主要是由脊波导的宽频带特性所决定的,在馈源的馈电波导和馈源口加入脊波导结构,利用脊波导的辐射特性对主模截止频率进行优化,通过仿真在方向图出现高次模时优化扩

展单模的工作带宽, 实现了 6~18 GHz 频段内的信号接收。

根据脊结构的特性, 在脊波导的结构边楞处会产生边缘效应, 从而影响脊波导的电磁场分布, 脊波导电磁场分布如图 1 所示[1]。

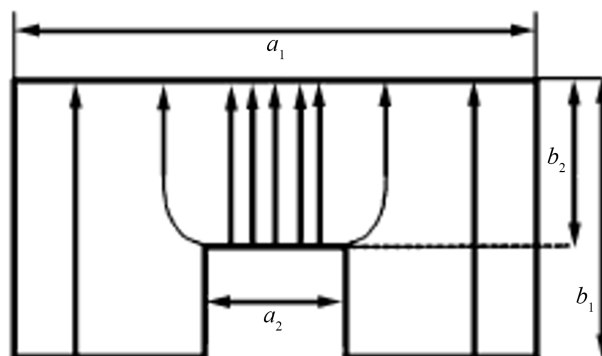


Figure 1. Schematic diagram of electromagnetic field distribution in ridge waveguide

图 1. 脊波导电磁场分布示意图

结合脊波导电磁场分布, 利用奇偶模谐振方程, 在频率无限大的条件下, 可以得到其主模的特性阻抗如下式[2] [3]:

$$Z_{0\infty} = \frac{\sqrt{\mu/\varepsilon}}{\frac{2c_f}{\varepsilon} + \frac{a_2}{b_2} + \frac{a_1}{2b_1} - \frac{a_2}{2b_1}}$$

式中,  $\varepsilon$  为喇叭中介质的介电常数,  $\mu$  为喇叭中介质的磁导率。

双脊波导相比较单脊波导而言, 其特性阻抗扩大二倍, 由上式可以看出, 当  $a_2/a_1$  的值确定后, 随着  $b_2/b_1$  值变小,  $TE_{10}$  的截止波长变大。双脊喇叭馈源, 喇叭形状是一个渐变张开的波导腔壁, 其后连接传输波导[4], 对脊波导的入/出端的脊宽, 脊的间距、厚度、长度、高度等尺寸进行匹配设计[5], 并根据阻抗及工作带宽要求对双脊尾端多种结构进行选取, 在工作带宽内抑制末端反射、展宽低频带宽。选用混合曲线进行拟合, 实现高低频段兼容。宽频带双脊喇叭馈源模型如图 2 所示。

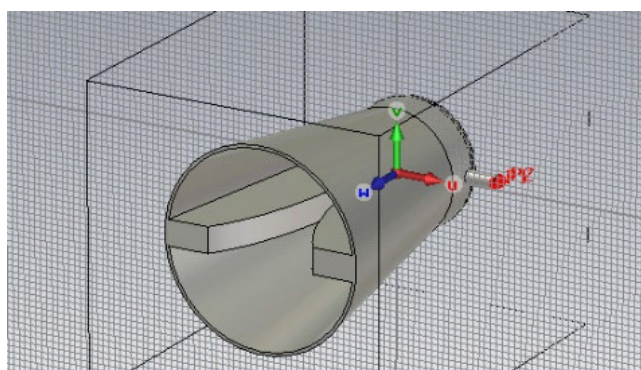


Figure 2. Model of broadband double-ridge horn feed

图 2. 宽频带双脊喇叭馈源模型图

方向图辐射特性如图 3、图 4、图 5 所示。

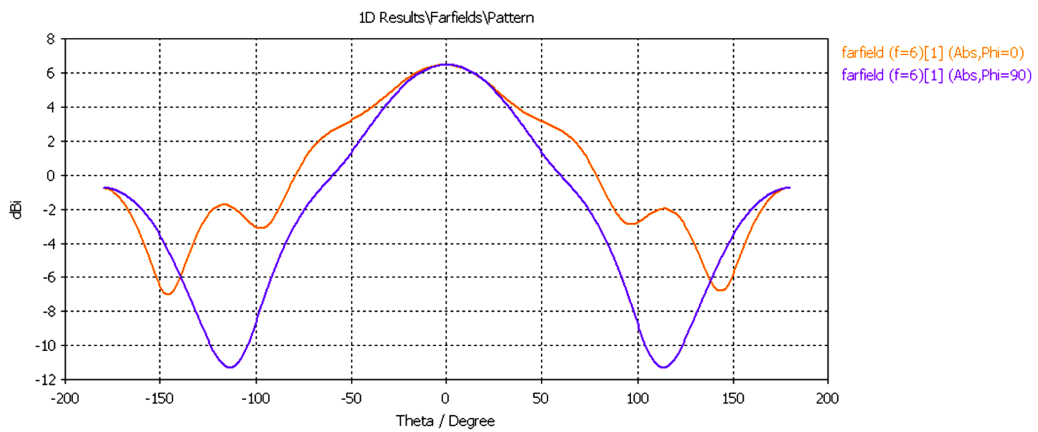


Figure 3. Simulated radiation pattern at 6 GHz—Feed  
图 3. 6 GHz 仿真方向图——馈源

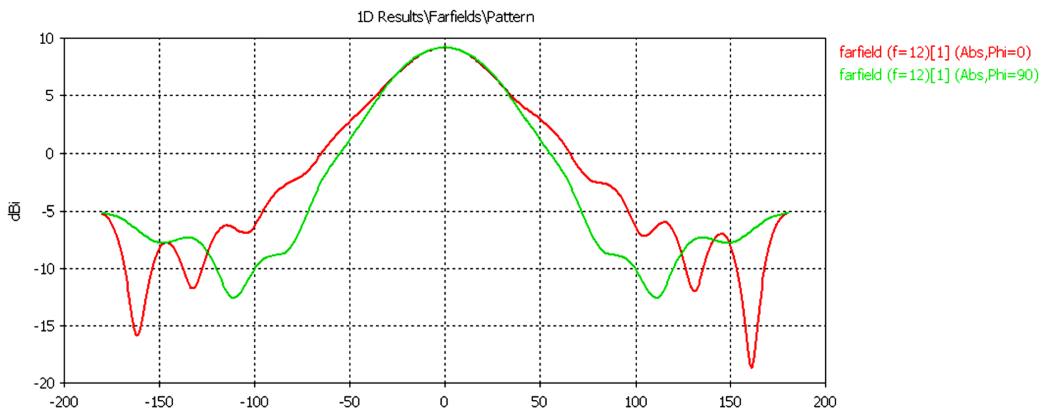


Figure 4. Simulated radiation pattern at 12 GHz—Feed  
图 4. 12 GHz 仿真方向图——馈源

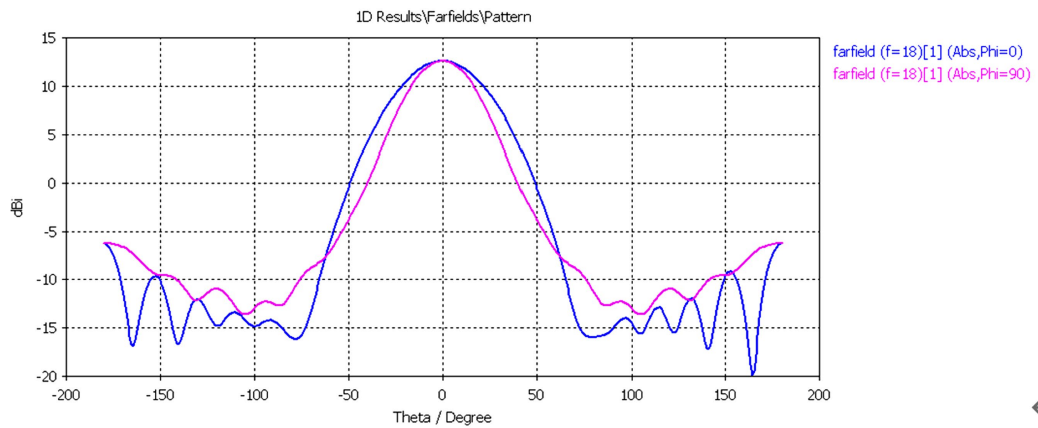


Figure 5. Simulated radiation pattern at 18 GHz—Feed  
图 5. 18 GHz 仿真方向图——馈源

根据宽频带双脊喇叭馈源仿真结果分析可得，在馈源照射范围内，馈源的 E、H 两个面方向图具有较好的对称性和等化性，且驻波性能良好，满足系统设计要求。

### 3.2. 抛物环面设计

本系统所设计的抛物环面利用抛物面天线可以将接收的平面波聚焦在一个焦点上，进而提高接收波束增益的优点，结合球反射面的球对称特性，建立抛物环面模型，进行了仿真分析。

抛物环面天线的多波束特性取决于抛物环面设计及馈源性能，抛物环面天线是由一条抛物线作为母线，绕一条旋转轴旋转形成的，其焦点组成一条对称的圆弧焦线，按实际使用需求将馈源分布在焦线上，且馈源的相位中心应与对对应照射面的焦点重合，馈源在圆弧的任一点放置，都不存在偏焦问题[6]，每个独立的馈源均可形成一个对应的信号接收波束。馈源的照射角与抛物面张角相匹配，尽量减少能量损失。在馈源布局时应考虑照射面均匀，且相邻馈源之间的耦合影响，充分考虑天线面的重复利用性，提高天线接收增益，降低旁瓣电平。

同时，抛物环面天线设计应确定尽量大的波束覆盖角域，广角域波束覆盖可以提升系统的工作效率，但由于水平面上圆弧特性的影响，抛物线母线绕旋转轴旋转的圆弧角度越大，其慧形相差现象越严重，使得增益严重降低。

本设计从抛物环面母线设计、馈源布局、波束覆盖角域等方面进行建模仿真，实现了高增益、低旁瓣、广角域波束覆盖的信号接收。抛物环面的设计几何关系图如图 6 所示[4]：

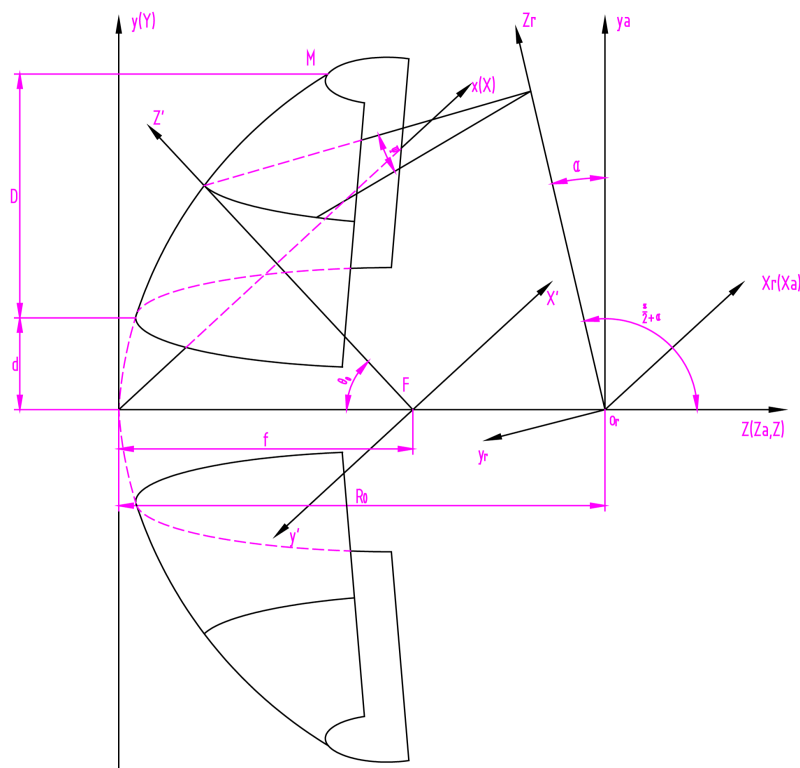


Figure 6. Geometric relationship diagram of parabolic torus design  
图 6. 抛物环面设计几何关系图

其中，M 为抛物线，是抛物环面天线旋转的母线，F 为抛物线的焦点，O 为抛物线的顶点，f 为抛物环面天线的焦距，坐标系(x, y, z)为抛物环面的直角坐标系，D 为抛物环面天线沿 z 轴的尺寸，L 为抛物环面天线沿 y 轴的最大尺寸，(x<sub>r</sub>, y<sub>r</sub>, z<sub>r</sub>)为生成抛物环面时的旋转直角坐标系，z<sub>r</sub> 轴为母线的旋转轴。

抛物环面上任意一点 P(x, y, z)是由母线 M 上的对应点从 M<sub>p</sub>(0, y<sub>m</sub>, z<sub>m</sub>)绕 z<sub>r</sub> 轴旋转而产生的，θ 为旋

转角度，如上图所示，且  $M_p$  点满足：

$$y_m^2 = 4fz_m$$

经过推导，可得抛物环面的参数方程为下式：

$$\begin{cases} x = \rho \sin \theta \\ y = y_i + \rho \cos \theta \\ z = z_i \end{cases}$$

依据工作频段、天线增益、馈源照射角等，通过电磁仿真软件进行天线建模及仿真分析，本系统工作频率为 6~18 GHz，通过合理的分配馈源布局，利用多个宽频带双脊喇叭组阵作为抛物环面的馈源，抛物环面设计过程中需考虑慧形相差[7]，在设计过程中考虑馈源阵列布局产生慧形相差的影响，抛物环面天线的尺寸 L\*D 设计为：4200 mm × 1750 mm，天线模型如图 7 所示。

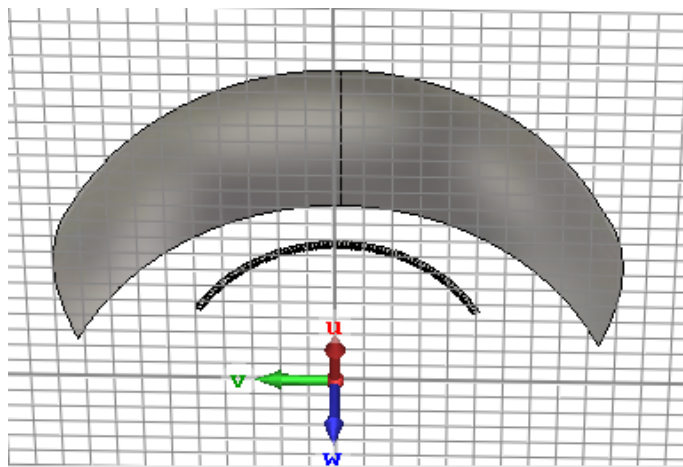


Figure 7. Model of parabolic torus antenna  
图 7. 抛物环面天线模型

方向图辐射特性如图 8、图 9、图 10 所示。

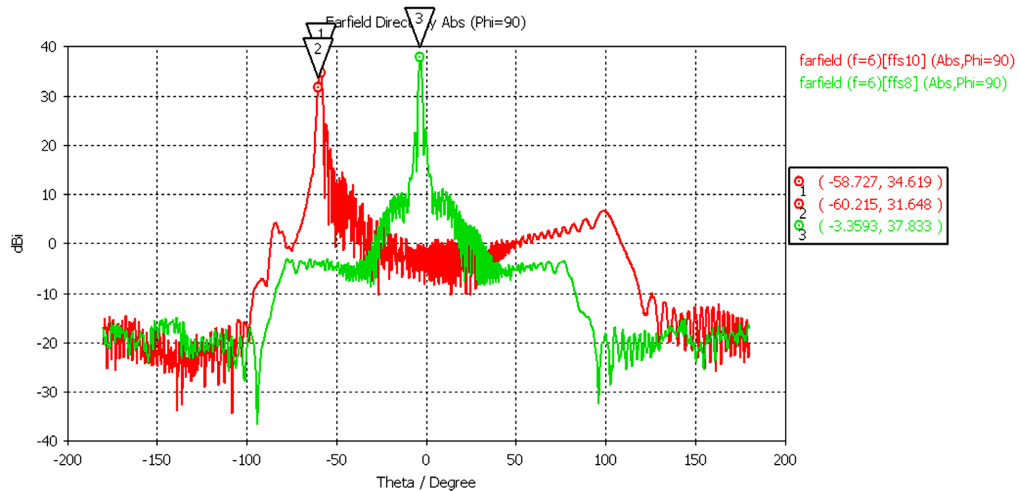


Figure 8. Simulated radiation pattern at 6 GHz—Antenna  
图 8. 6 GHz 仿真方向图——天线

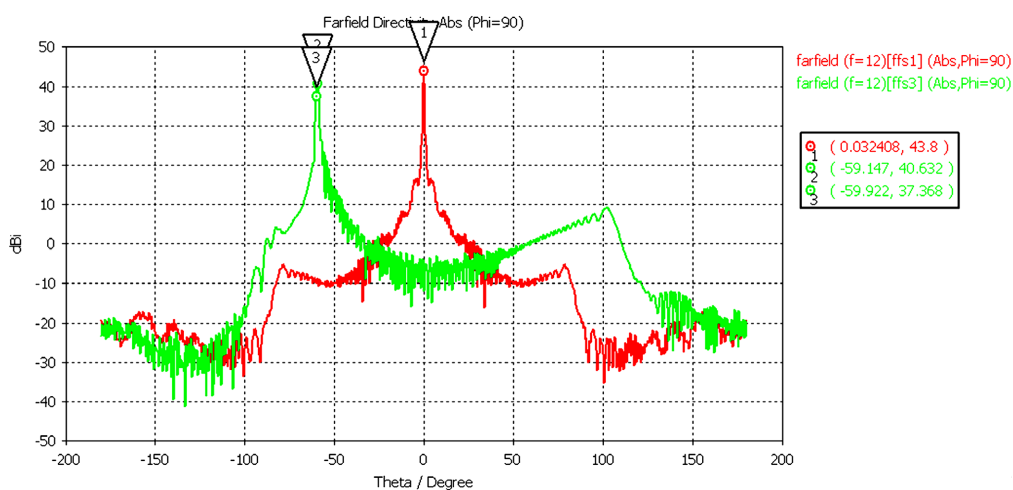


Figure 9. Simulated radiation pattern at 12 GHz—Antenna

图 9. 12 GHz 仿真方向图——天线

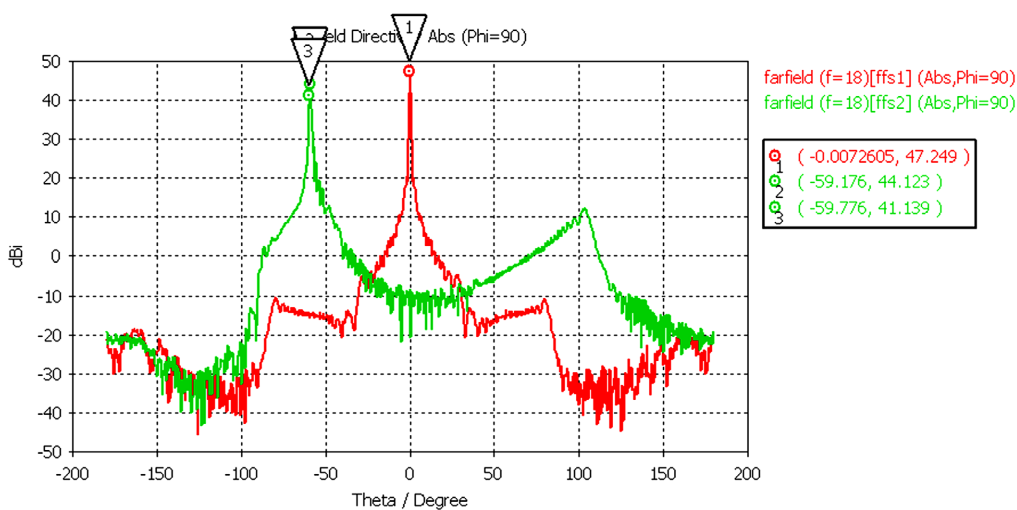


Figure 10. Simulated radiation pattern at 18 GHz—Antenna

图 10. 18 GHz 仿真方向图——天线

通过对抛物环面天线的方向图仿真结果分析，可得如下表 1。

Table 1. Simulation results

表 1. 仿真结果

频率	中间波束增益(dB)	边波束增益(dB)	角域覆盖范围(度)	Dm = 1.75 m 效率
6 GHz	37.8	34.6	±60.2	50%
12 GHz	43.8	40.6	±59.9	50%
18 GHz	47.2	44.1	±59.7	49%

### 3.3. 抗干扰设计

天线接收信号接收质量直接影响电子对抗技侦设备系统的工作状况，特别在微弱信号接收方面，为了提高系统的灵敏度，一方面要尽量优化天线波束的接收增益，提高信号接收效率，另一方面应尽量减

少从天线波束的旁瓣进入接收系统的干扰信号对信号质量的影响，因此提出增加旁瓣抑制天线，与主天线配合进行空间滤波，进而达到抗干扰的使用需求。

相对于主天线，旁瓣抑制天线的主瓣电平应高于主天线的旁瓣电平，且波束宽度应尽量覆盖主天线旁瓣的波束宽度。根据主天线方向图仿真结果可知第一旁瓣电平值较高，则要求旁瓣抑制天线具有较高增益，高于主天线的旁瓣电平，并覆盖主天线旁瓣的波束宽度，因此选用抛物面天线作为旁瓣抑制天线，用来抑制边波束的旁瓣，相邻主波束之间相互抑制其旁瓣，进而达到所有主天线旁瓣的抑制作用。

旁瓣抑制天线仿真模型如图 11 所示。

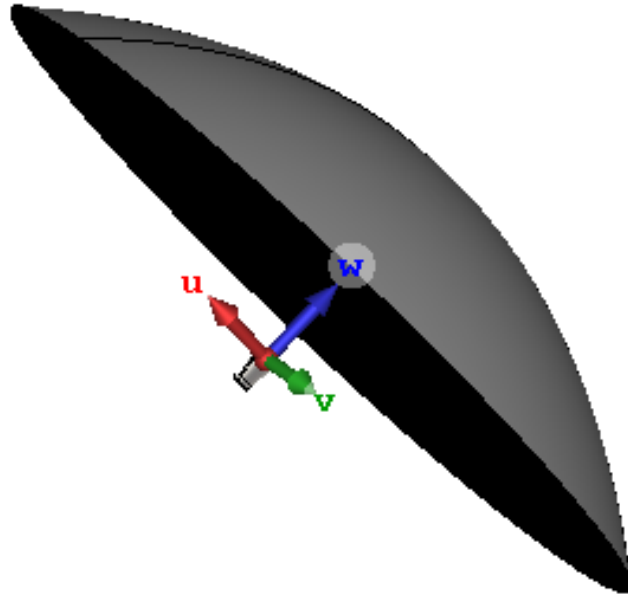


Figure 11. Simulation model of sidelobe-suppression antenna  
图 11. 旁瓣抑制天线仿真模型

方向图辐射特性如图 12、图 13、图 14 所示。

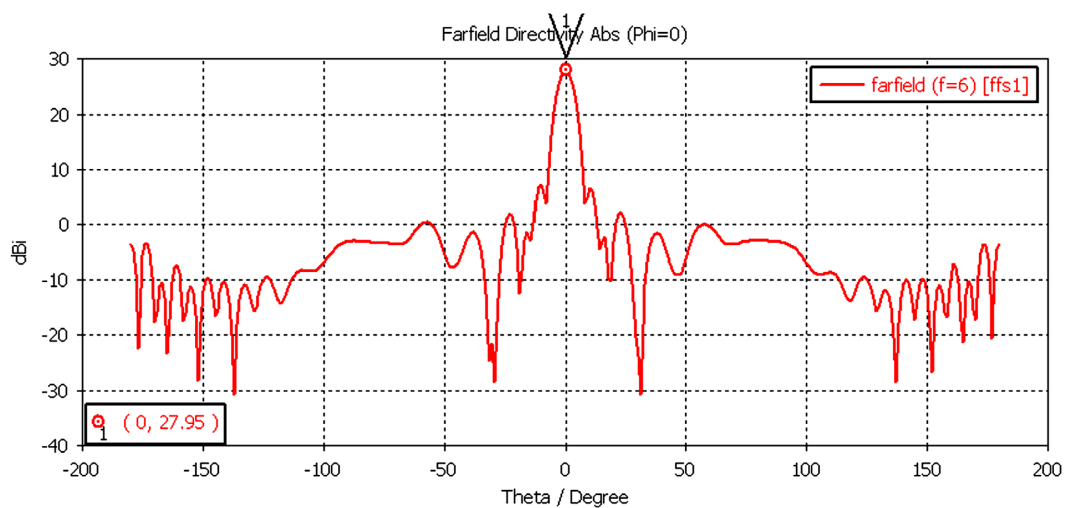


Figure 12. Simulated radiation pattern at 6 GHz—Suppression system  
图 12. 6 GHz 仿真方向图——抑制系统

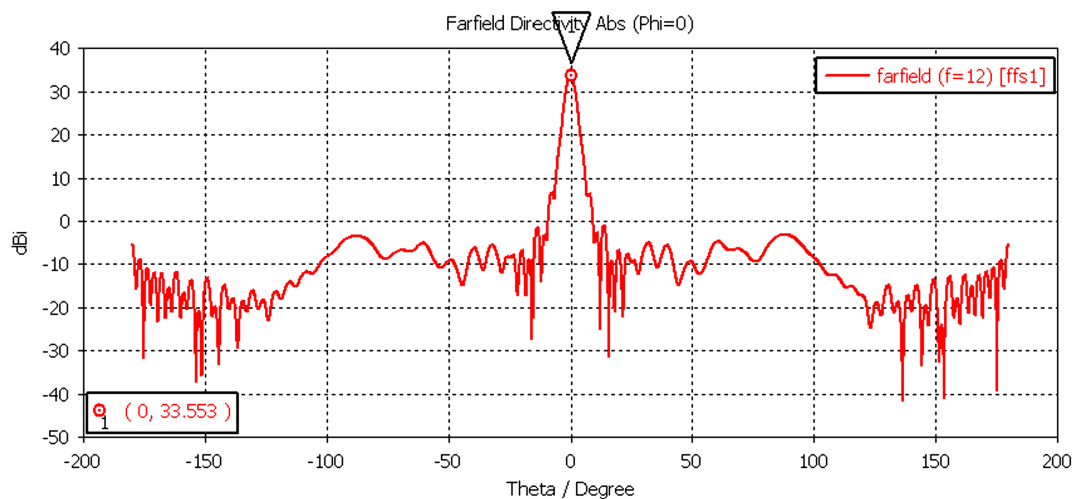


Figure 13. Simulated radiation pattern at 12 GHz—Suppression system

图 13. 12 GHz 仿真方向图——抑制系统

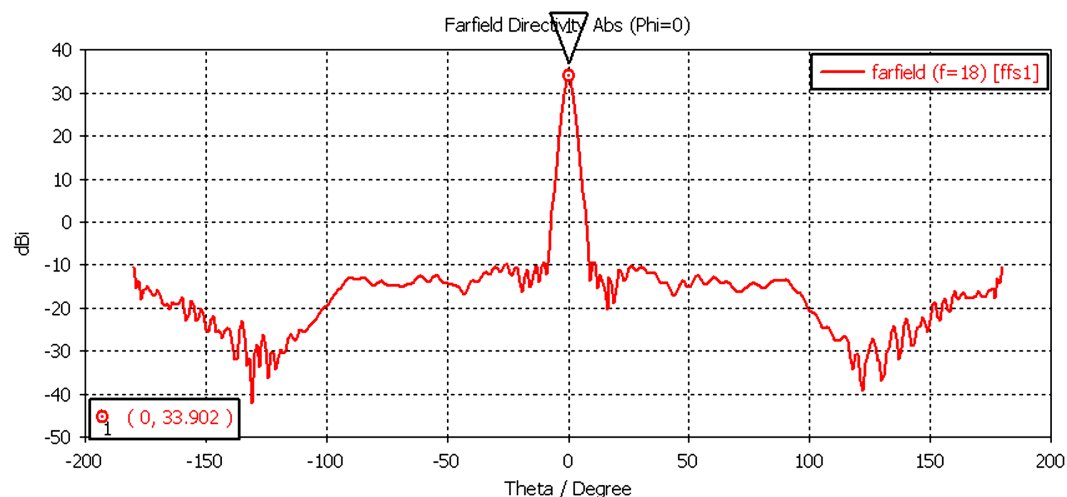


Figure 14. Simulated radiation pattern at 18 GHz—Suppression system

图 14. 18 GHz 仿真方向图——抑制系统

### 3.4. 系统实测

天线性能测试是验证天线性能的关键手段，其重要任务是通过合理的天线性能测试方案对天线性能进行验证，确保天线设计满足使用需求。目前可用于天线电性能测试的测试场地按测试环境来分可分为：远场测试场、近场测试场和压缩测试场。近年来近场测试方法和压缩场测试方法发展较快，但由于其测试场地空间尺寸的限制，不便于进行大型天线的电性能测试。因此，大型地面站天线主要采用远场测试场来完成电性能测试，常使用的远场测试可分为场地法、射电天文法和卫星源法，其中常规的场地法是天线测试的常用外场测试法，满足一般的地面站天线的测试需求。因多波束宽频域天线待测波束数量多的特点，测试工作量大，利用目前常规的场地法对多波束宽频域天线进行电性能测试，测试周期较长，测试成本较高，基于此提出了一种针对大型多波束天线的全自动化外场测试解决方案，搭建外场测试环境需考虑测试系统的动态范围、收发端设备布设与控制、环境电磁干扰影响、系统自动化程度等因素，大型多波束天线外场测试系统组成框图如图 15 所示。

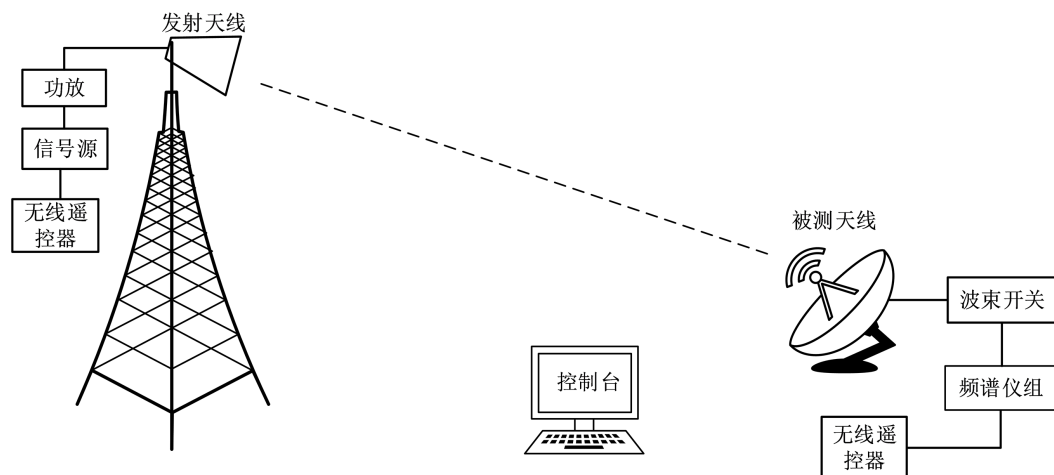


Figure 15. Block diagram of the test system composition

图 15. 测试系统组成框图

此测试系统具备测试设备、被测天线的联动控制能力，对测试数据进行实时储存、分析，测试流程全自动化，实现了测试系统智能化、一体化的运行，该测试系统也可以满足测试频点密集的测试需求，有效的提升了大型多波束天线系统的测试效率。

依据仿真设计结果，进行天线整机结构设计及生产加工，利用大型多波束天线外场测试系统对宽频带多波束抛物环面抗干扰天线进行测试，验证了抛物环面主天线的辐射特性，同时验证了旁瓣抑制天线的旁瓣抑制效果。

通过对实测结果进行分析，本文设计的宽频带多波束抛物环面抗干扰天线，可以实现 6~18 GHz 宽频带信号覆盖，测试结果与仿真设计基本一致，从主天线中心波束的测试结果来看，增益可以达到 43.8dB@12GHz，旁瓣电平较低，旁瓣抑制天线的主波束能较好的覆盖主天线的旁瓣。边波束测试结果可以验证当馈源分布在 $\pm 60^\circ$ 附近位置时，边波束的辐射特性已出现明显的慧形相差现象，对波束增益影响较大。

#### 4. 结论

本文从多波束抛物环面天线的辐射特性着手，对宽频带馈源、抛物环面及旁瓣抑制天线进行联合仿真，并搭建全自动化外场测试环境，对系统性能进行了实测验证，验证了宽频带多波束抛物环面抗干扰天线系统的宽频带、高增益、低旁瓣、抗干扰、广角域波束覆盖的系统性能，具有较高的实用价值。

#### 参考文献

- [1] 刘首岚. 具有金属栅格侧壁的超宽带双脊喇叭天线的设计与分析[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- [2] Nguyen, C., Lee, J. and Park, J. (2001) Ultra-Wideband Microstrip Quasi-Horn Antenna. *Electronics Letters*, **37**, 731-732. <https://doi.org/10.1049/el:20010532>
- [3] 刘密歌. 基于 HFSS 的双脊喇叭天线的设计与仿真[J]. 电子测量技术, 2007, 30(7): 142-145.
- [4] 杨可忠. 多波束抛物环面天线的设计方法[J]. 无线电通信技术, 1994(5): 1-16.
- [5] 凡创. 一款高增益双脊喇叭天线[J]. 现代雷达, 2024, 46(8): 71-77.
- [6] 赵娜, 郭刚涛, 张正谦, 等. 基于 Vivaldi 馈源的多波束抛物环面天线研究[EB/OL]. <https://cpfd.cnki.com.cn/Article/CPFDTOTAL-ZDWB202305004075.htm>, 2023-05-15.
- [7] 邹火儿. 多波束抛物环面天线相差补偿与赋形优化[J]. 无线电通信技术, 2023, 49(2): 201-208.