

# 一种创新结构的宽带双脊喇叭天线

黄亚琪

西南科技大学数理学院, 四川 绵阳

收稿日期: 2025年5月30日; 录用日期: 2025年7月1日; 发布日期: 2025年7月10日

## 摘要

文章创新性地提出使用二次贝塞尔曲线作为脊曲线模型, 并结合一种创新的馈电结构, 使电压驻波比 (VSWR) 在1~10 GHz频段内稳定于2以下, 在1~10 GHz频段内匹配完美。通过参数化仿真优化发现, 该馈电结构能够有效降低驻波比并提升增益。此外, 脊倒角和空腔组合设计进一步减少了反射。基于参数化建模, 采用遗传算法进行迭代参数优化, 最终实现了在双指数函数脉冲源下的最佳匹配效果。该设计不仅性能优异, 而且部件设计简单, 便于后续加工, 适用于多种辐射场景。

## 关键词

双脊喇叭天线, 宽带, 驻波比, 增益, 方向图

# An Innovative Dual-Ridged Wideband Horn Antenna with Novel Structure

Yaqi Huang

School of Mathematics and Physics, Southwest University of Science and Technology, Mianyang Sichuan

Received: May 30<sup>th</sup>, 2025; accepted: Jul. 1<sup>st</sup>, 2025; published: Jul. 10<sup>th</sup>, 2025

## Abstract

This paper innovatively proposes the use of a quadratic Bézier curve as the ridge curve model, combined with an innovative feeding structure. As a result, the voltage standing wave ratio (VSWR) remains stable below 2 in the 1~10 GHz frequency band and achieves excellent matching in the 1~10 GHz frequency band. Parametric simulation optimization reveals that this feeding structure can effectively reduce the VSWR and improve the gain. Additionally, the combined design of the ridge chamfer and the cavity further reduces reflections. Based on parametric modeling, a genetic algorithm is employed for iterative parameter optimization, ultimately achieving the best matching effect under a double-exponential function pulse source. This design not only boasts excellent performance but

also features a simple component design, facilitating subsequent processing. It is suitable for a variety of radiation scenarios.

## Keywords

Dual-Ridged Horn Antenna, Wideband, Voltage Standing Wave Ratio (VSWR), Gain, Radiation Pattern

Copyright © 2025 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

在脊形喇叭天线的优化设计中, 脊曲线的数学建模始终是提升宽带匹配性能的核心研究方向。先前的研究着重于通过组合指数函数和三角函数来定义脊曲线, 这一领域的重要进展包括 Walton 团队所提出的标志性的对称双脊模型[1]、Kerr 引入的一种创新的复合脊设计, 即线性 - 指数组合结构。这一设计确保脊曲线实现平滑的频率响应过渡, 同时将 1 至 12 GHz 频段内的电压驻波比(VSWR)限制在 2 以下[2], 但是这些模型在高次模激励下(2~4 GHz)出现了显著的方向图分裂现象。

针对传统双脊喇叭天线在高频段(>5 GHz)因脊曲线不连续导致的方向图裂瓣问题, Daniel Oloumi 团队提出了一种分段式连续脊曲线结构[3], 以及文献[4]-[6]中提到, 脊曲线的设计通常采用指数型曲线或在指数型曲线末端添加圆弧线的形式。而 Yue、Zhenzhen 等人采用了三次贝塞尔曲线来拟合脊曲线, 这种设计可以更好地控制脊的形状, 从而提高天线的增益和效率[7]。相较于其他改善天线辐射性能的方法来说[8][9], 这些脊曲线较好地解决了模型方向图分裂的现象, 也更精准地控制了脊曲线的弧度, 但也正因如此, 在改变其他参数来优化模型时, 很显然地带来更多步骤。

双脊喇叭天线在通信、雷达和电磁兼容测试等领域的应用日益广泛。其宽带特性使其能够满足多种电磁测试和应用需求, 可以成为电磁脉冲模拟器、高功率微波系统以及电磁兼容性测试中的关键组件。因此对其结构的迭代创新和性能的改良仍有较大前景。

## 2. 双脊喇叭天线的理论和辐射特性

### 2.1. 麦克斯韦方程

在脊与喇叭壁面处, 电场切向分量强制为零, 导致电场在脊间垂直集中。

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \Rightarrow E_{tan}|_{\text{导体表面}} = 0 \quad (1)$$

其中  $\mathbf{D}$  是电通量密度(也称为电位移);  $\rho$  是电荷密度;  $\nabla$  是散度算子。

脊间准 TEM 波的传播特性显著, 表现为波导区域脊间的准 TEM 波传播, 横向场( $E_x, H_y$ )主导, 纵向分量( $E_z$ )被抑制。

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2)$$

其中  $\mathbf{E}$  是电场;  $\mathbf{B}$  是磁场。

喇叭张开时, 传导电流( $\mathbf{J}$ )逐渐过渡为位移电流主导, 场扩散符合辐射条件。

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (3)$$

其中  $\mathbf{H}$  是磁场强度，用于描述磁场的强度和方向； $\nabla$  是旋度算子，表示磁场的涡旋源，即磁场的“漩涡”强度； $\mathbf{J}$  是传导电流密度，表示单位面积上自由电荷运动形成的电流； $\partial$  代表位移电流密度，表示电场  $\mathbf{E}$  随时间变化率产生的电流效应； $\mathbf{D}$  是电位移矢量。

要向自由空间辐射，因此控制喇叭口径面场的辐射特性，以此决定远场方向图。

$$\nabla^2 \cdot \mathbf{E} + k^2 \cdot \mathbf{E} = 0 \quad (k = \omega \sqrt{\mu \cdot \epsilon}) \quad (4)$$

其中  $k$  是波数，表示单位长度内波的周期数； $\omega$  是角频率，表示单位时间内相位的变化量； $\mu$  是磁导率，描述磁场在介质中的传播特性； $\mathbf{E}$  是电场强度，是一个矢量场。

## 2.2. 边界条件

脊波导段的边界条件：需要电场在脊间形成纵向分布，磁场沿侧壁切向分布。

$$\mathbf{E}_{tan} = 0; \mathbf{H}_{norm} = 0 \quad (5)$$

其中  $\mathbf{E}_{tan}$  是电场切向分量； $\mathbf{H}_{norm}$  是磁场法向分量。

喇叭口径面的辐射边界：确保能量有效辐射至外部空间，同时抑制反射现象，以维护并优化方向图的主瓣特性。

$$\lim_{r \rightarrow \infty} r \left( \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial r} + \mathbf{j}k\mathbf{E} \right) = 0 \quad (6)$$

其中  $\mathbf{j}k$  表示波数  $k$  乘以虚数单位  $\mathbf{j}$ ； $\mathbf{E}$  表示电场强度。

## 2.3. 脊结构优化分析

电磁波在脊间的有效传播与否，关键在于该电磁波的工作频率与脊间内部结构参数之间是否存在着直接且重要的关联，即存在一个临界值——截止频率  $f_c$ 。当电磁波的频率恰好等于或超过这个截止频率  $f_c$  时，意味着具备了在脊间内实现有效传播的条件；反之，如果电磁波的频率低于此  $f_c$  值，将会引发一种称为“截止衰减”的现象，导致电磁能量在传输过程中显著减弱直至消失，从而无法在脊间中维持稳定的传播状态。

脊波导的截止频率和截止波长：

$$f_c = \frac{1}{\pi \sqrt{\mu \epsilon} \sqrt{\left( \frac{a_1}{b_1} + \frac{2C_f}{\epsilon} \right) (a - a_1) b}} \quad (7)$$

$$\lambda = \pi \sqrt{\left( \frac{a_1}{b_1} + \frac{2C_f}{\epsilon} \right) (a - a_1) b} \quad (8)$$

其中  $f_c$  是截止频率； $\mu$  是介质的磁导率； $\epsilon$  是介质的电容率； $a_1$  和  $b_1$  分别是脊的宽度和高度； $C_f$  是一个常数，与波导的形状和尺寸有关； $a$  和  $b$  分别是波导的总宽度和总高度。

脊波导的特征阻抗：

$$Z_0 = \frac{Z_\infty}{\sqrt{1 - (\lambda/\lambda_c)^2}} \quad (9)$$

其中  $Z_0$  是特征阻抗； $Z_\infty$  是波导在高频极限下的阻抗； $\lambda$  是电磁波的波长； $\lambda_c$  是波导的截止波长。  
截止条件：

$$k_c = \frac{\pi}{a} \sqrt{1 + \left(\frac{b}{\lambda}\right)^2} \tag{10}$$

如图 1 所示，其中  $k_c$  是截止波数； $a$  和  $b$  是波导的尺寸参数。

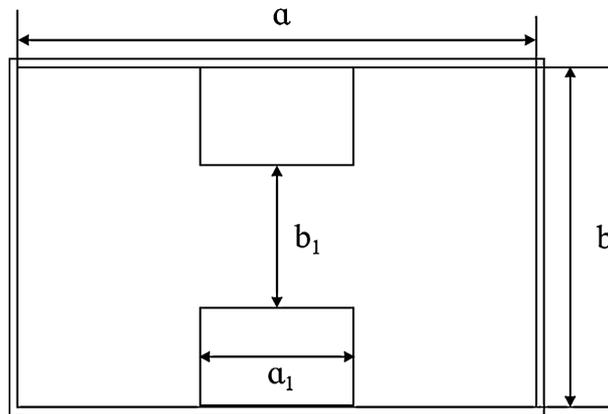


Figure 1. Schematic diagram of a double-ridge waveguide  
图 1. 双脊波导示意图

### 3. 双脊喇叭天线参数化仿真模型

双脊喇叭天线一般由短路板、矩形波导、脊波导、喇叭段和馈线组成，如图 2 所示。近年来对双脊喇叭天线结构的改进研究主要集中在短路板和波导之间的后腔形状、脊结构、侧壁结构等方面。

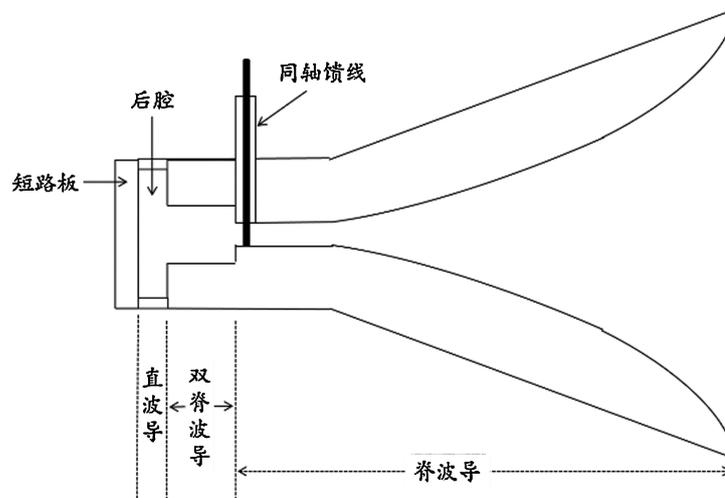


Figure 2. Structure of the antenna  
图 2. 天线结构

天线和馈线的连接端，即馈电点两端感应的信号电压与信号电流之比，称为天线的输入阻抗。输入阻抗有电阻分量和电抗分量。输入阻抗的电抗分量会减少从天线进入馈线的有效信号功率。因此，必须使电抗分量尽可能为零，使天线的输入阻抗为纯电阻。而当天线的工作频率大于脊波导的截止频率，且

小于矩形波导反馈腔的截止频率时，天线处于截止状态，在这种情况下，同轴传输线中的大部分能量将被传输到脊状波导中，而一小部分能量将在矩形波导后馈腔中迅速衰减，不影响天线的性能。当天线的工作频率同时大于脊波导和矩形波导反馈腔的截止频率时，同轴传输线中的部分传输功率将流入矩形波导反馈腔内并进行反射。

### 3.1. 馈线设计

在工作开始前，首先确定馈线结构的合理性，单独设计一个同轴馈线，使其满足高匹配的传输特性。其中需要注意的是介质层填充的介质材料，设置电导率为 2.05，得到最佳馈线结构建模方法。建模结构如图 3(a)所示，驻波比如图 3(b)所示。

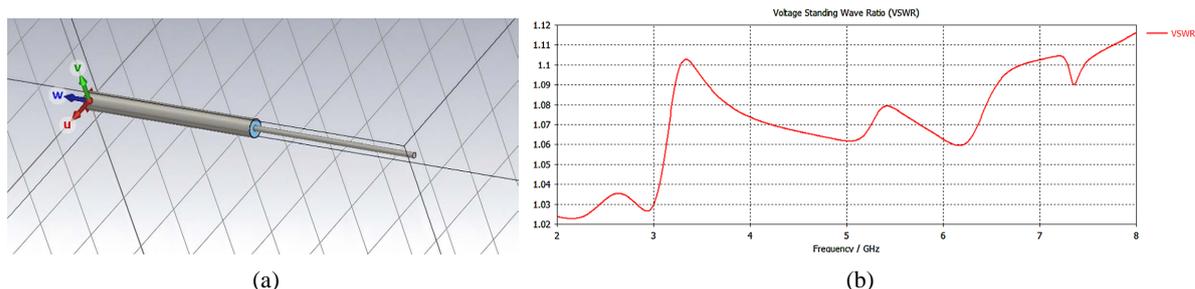


Figure 3. Schematic of feeding structure; (b) Feed line VSWR simulation results

图 3. (a) 馈线结构示意图；(b) 馈线仿真驻波比

单独仿真的驻波比在 2~8 GHz 能够接近 1 的完美匹配，这说明该馈线结构的建模在运用到喇叭天线作馈源结构时可以得到接近完美匹配的驻波比性能。因此说明该介质设置以及馈线建模方法正确，可以应用在新的仿真结构中。

### 3.2. 脊曲线设计

利用计算工具，我们对多种曲线进行了比较与分析，其直观结果呈现在图 4(a)中；经过一系列仿真对比后，最终确定了一条最普适的脊曲线，该优选脊曲线的构建策略展现出卓越的稳定性，即使在面对其他参数变动的情况下，其性能表现依然保持了较高的可靠性与一致性。

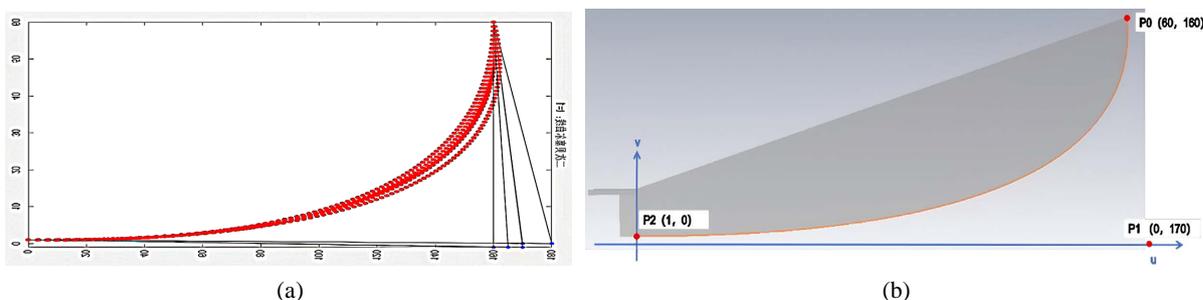


Figure 4. (a) The influence of different selections of control point P1 on the curve shape; (b) Schematic diagram of the coordinates of the ridge curve

图 4. (a) 不同控制点 P1 的选取对线形的影响；(b) 脊曲线坐标示意图

在设计双脊喇叭天线的过程中，为了精确控制其性能，通常需要选定若干关键控制点以调整天线特性。在这之中，将其中两个特别重要的控制点分别定位在矩形喇叭边界 P0 处以及二次贝塞尔脊曲线的起点 P2 位置，这一做法具有重要意义。

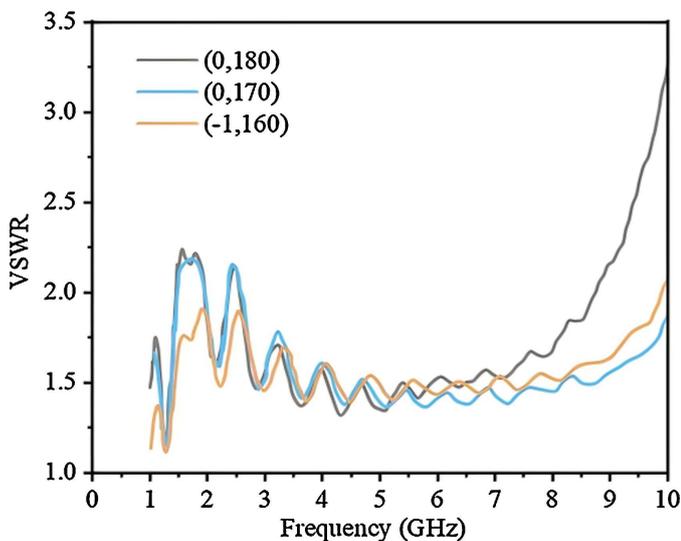
假设以脊间距中线为  $u$  轴，以直波导终平面(喇叭段开始平面)为  $v$  平面，以此确定的坐标系如图 4(b) 所示。一些关键参数设置如下：喇叭口宽度  $b_2$  为 120 mm，喇叭段长度  $c_2$  为 160 mm，脊间距即两脊间最小距离  $b_1$  为 2 mm。

因此将  $P_0$  坐标在代码中表示为  $(b_2/2, c_2)$ ， $P_2$  坐标在代码中表示为  $(b_1/2, 0)$ 。

通过在  $P_0$  处设置控制点，使其与喇叭口面参数相关，可以有效影响天线的辐射方向图和增益分布，确保在特定频率范围内获得期望的辐射特性。而位于  $P_2$  的另一个控制点，与脊间距参数相关，则可以调整天线的阻抗匹配和带宽特性，进而优化天线的整体性能和效率。这样的布局策略不仅能够满足不同应用场合对于天线特性的多样化需求，还能简化后续的优化和调试过程，显著提升设计的灵活性与实用性。

在处理二次贝塞尔曲线以获取更佳效果时，选择合适的控制点至关重要，特别是当目标为精确模拟喇叭天线的特性时。为此，我们应首先精准定位起点  $P_0$ ，即喇叭口面与脊线的交汇点，以及终点  $P_2$ ，即直波导部分的终结位置。这样的配置策略旨在灵活应对不同型号的喇叭天线，确保脊曲线的拟合方法能够适应广泛的应用场景，以及实现精确的模型构建。

分析图 4(b)可知，实际构建的脊曲线由两个部分组成，即一条代表直波导特性的脊曲线与一条采用二次贝塞尔曲线描述的脊段，这能够有效避免对脊曲线整体结构的任何破坏或不连续性影响，确保了脊曲线在中期到后期部分的曲率展现出更为稳定的辐射性能。曲线光滑无拐点，可以避免电场畸变，同时仅调整  $P_1$  即可控制脊宽渐变速率，简化优化过程。



**Figure 5.** The voltage standing wave ratios (VSWR) of horn antennas with ridge curves having three different control points  
**图 5.** 三个不同控制点脊曲线的喇叭天线驻波比

通过参数化建模方法，可以确保脊曲线在不同段落间的平滑过渡和稳定性。这不仅有助于维持主模传输的稳定性，后段的自然过渡也确保了连接点处的一阶导数连续性，有效避免了曲率急剧变化可能引起的模式扰动，还进一步强化了曲线的整体连续性和流畅性。而  $P_1$  的对比选择确保了贝塞尔曲线的末端切线方向与喇叭口径边缘保持平行。这一设计使得口径场的相位梯度能够与辐射方向完美对齐，从而实现了远场等相位面的形成，显著提升了装置的辐射性能和效率。

通过对脊曲线进行优化调整，如图 5 所示的仿真结果显示，平均驻波比显著降低至 1.7，特别是在涵盖从 1~3 GHz 的中低频段以及 7~10 GHz 的高频区域，优化效果尤为突出，因此将  $P_1$  控制点的坐标选取在  $(0, 170)$ ，该点位于  $u$  轴，略高于喇叭口面。

该设计方案在保持结构统一性的基础上,提出了更利于模型迭代的参数设置方法和曲线选取办法,这为之后对模型参数化建模和使用遗传算法迭代模型建立了基础。

### 3.3. 空腔设计和脊结构倒角

通过优化设计,双脊喇叭天线的辐射方向图畸变与高频增益的陡降问题能够得到有效改善,这一过程主要涉及减小天线口径面积以及降低由不连续结构所引发的高阶模效应。缩小口径面积实际上降低了喇叭有效吸收和利用周围环境中的电磁能量效率,从而影响其整体性能[10] [11]。基于天线互易性原理,实际应用中会导致增益出现衰减现象,这一特性显著阻碍了我们在设计与构建高增益天线系统时追求理想性能目标的进程。

所以在设计波导系统时,为了确保信号传输的高效,一种有效策略是在后腔内波导段周围加入楔形结构,以实现从波导截面到喇叭截面之间平滑、连续的过渡,从而显著提升整个系统的性能。

通过设计具有对称楔形结构的空腔部分,成功地改变了原有空腔的几何形态,如图 6(a)所示。这一设计有效地抑制了因空腔内部谐振而引发的不期望寄生反射现象,显著提升了系统性能与稳定性。通过采取措施减少反射波的影响,可以有效提升驻波比,确保信号传输的效率与质量得到显著增强。通过参数化扫描及电磁仿真分析发现,在楔形区域沿轴向的扩展长度达到等于最低工作频率下波长的四分之一,即精确至约 4.175 mm 这一特定值时,能够实现对高阶模最为有效的抑制效果,从而显著提升天线或微波器件的性能与效率。

同时对直波导的直角状尾部进行倒角处理,如图 6(b)所示。仿真结果表明该结构不仅有效改善驻波比以及 S 参数,对方向图的集中性也有一定改善,可以看到该结构下的方向图对称性良好、对后瓣抑制在中高频较好、对旁瓣电平有相当的抑制,但是在高频部分出现栅瓣,这说明仍然可以继续优化结构使其更加连续从而达到对高次模的进一步抑制。总的来说,此集成优化方案在 1~10 GHz 的宽频谱范围内,可以综合提高后腔模态的抑制效能与脊部边缘磁场的分布均衡性,实现辐射效率的提升与平均驻波比的减小,从而达到协同优化的目标。

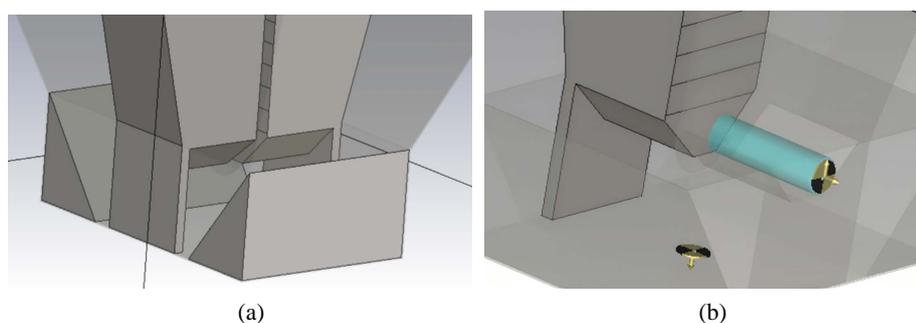


Figure 6. (a) Wedge structure schematic; (b) Chamfer structure schematic

图 6. (a) 楔子结构示意图; (b) 倒角结构示意图

### 3.4. 同轴馈线

通过引入轴向渐变导体锥于同轴馈线的末端,本文对传统的同轴馈电结构进行了创新性优化,这一设计从多个方面都成功提升了系统性能与效率。此设计显著优化了双脊喇叭天线在 1~10 GHz 频段内的阻抗匹配,尤其在 2~10 GHz 区间内表现尤为出色,大幅降低了驻波比,通过调整锥体底部半径与同轴馈线外径的比例,实现对高频段增益的有效提升,确保了喇叭天线在整个工作频率范围内的增益稳定维持在 16 以上,展现出优异的辐射性能,对于此类天线的设计与应用具有重要意义。

在进行结构设计的过程中，我们选定以脊间距的其中半段作为关键区域，在分析扫参仿真数据后，我们发现当特定条件下，即馈线的外径设置为 4 mm，内径为 2 mm，并在内导体的末端附加一个锥形导体，该导体的底部半径恰巧调整至 3.6 mm 时(图 7)，系统能够实现最为理想的匹配效果，这一配置成功优化了信号传输的效率与质量。

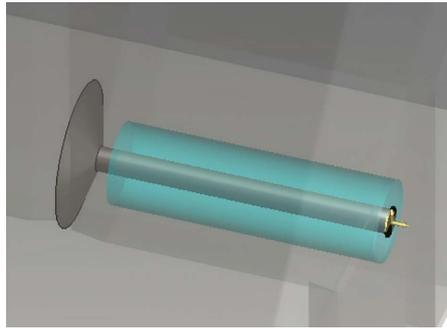


Figure 7. Novel feeding structure  
图 7. 新型馈电结构

此设计的双脊喇叭天线在覆盖 1~10 GHz 全频段的情况下，展现出较好的驻波比性能，如图 8(b)所示，最低可降至 2.2 以下，特别是在 1~10 GHz 的频段内，其驻波比更优化至 2 以下的标准，显著提升了通信效率与稳定性；同时，该天线结构有效地减少了信号反射，增强了系统的匹配性，具体表现为提高了 S11 (输入回波损耗)并降低了 S12 (第一端口的互调干扰)，如图 8(a)和图 8(c)所示，这也可以佐证该结构确实在保持高增益的同时，实现了增益曲线的小幅提升，整体上提升了天线在复杂电磁环境下的可靠性和性能表现。此设计引入了一个顶角约为 119.44°的导体锥体，这一形状相较于传统的直角连接导体结构，展现出更为平滑、近弧形的外观，其目的是模仿脊部的倒角处理，从而在脊波导与短路板之间创造出一种优化的腔体结构。

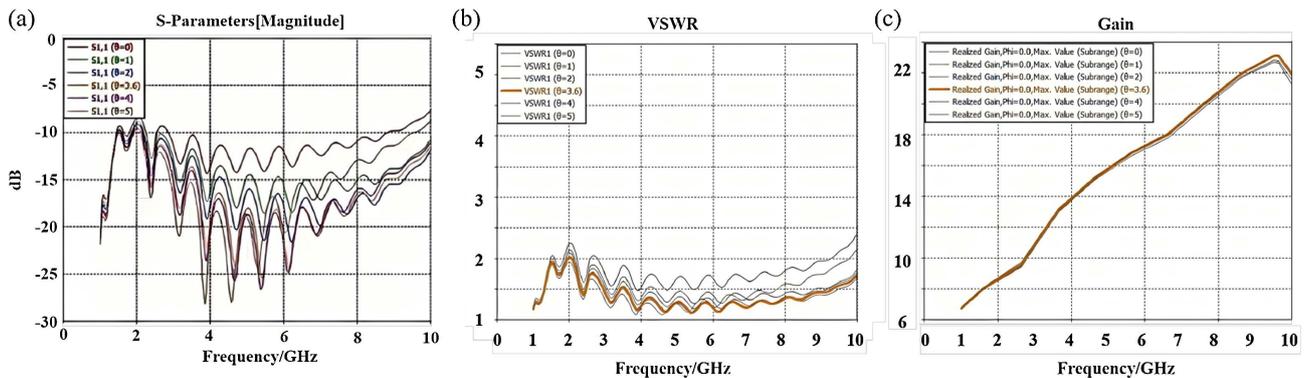


Figure 8. Under different feed structure bottom radii (a) S1,1, (b) standing wave ratio, (c) gain  
图 8. 不同馈电结构底部半径下的(a) S1,1、(b) 驻波比、(c) 增益

仿真结果表明，通过采用这样一个具有准弧形渐变轮廓的导体锥体设计，系统能够实现两个关键的优化目标：一方面，它能够有效地缓解脊波导与短路板之间的几何突变，使得空腔内的等效特性阻抗由阶跃式突变转变为平滑过渡，进而显著抑制了高次模的谐振现象；另一方面，通过扩大趋肤效应的影响范围，重新规划了高频段内的表面电流分布路径，成功降低了高频段的感性失配问题，使反射系数 S11 平均提升了 10 dB，同时透射系数 S12 降至低于-16 dB，确保了反射面远离最大波长的 10 倍远场距离，

这一设计不仅证实了其在增强系统性能方面的有效性，还展示了其在提升增益上的潜力。导体加载可以等效为并联电感，根据阻抗匹配公式，低频段(1~3 GHz)：感性阻抗较小，几乎不影响匹配；高频段(6~10 GHz)，补偿因相位延迟产生的容性失配，降低 VSWR 0.3~0.5 未加载时，高频电流分散于脊边缘；加载后，电流集中于导体附近，增强等效电感效应，抑制高阶模反射。该设计证明了空腔中渐变曲率结构在实现宽带阻抗匹配方面的效能，探讨了空腔与馈电系统协同优化对于显著提高辐射效率的内在机制，从而为双脊喇叭天线的创新设计提供了一个可能的方向。

#### 4. 最终优化结构及仿真结果

最终结构如图 9 所示，在最佳参数下，双脊喇叭天线的可用频域非常广，在 1~10 GHz 的低频与高频部分性能效果最好。通过仿真得到如图 10 所示的结果，可以看到，驻波比基本可以实现 1.7 以下的高匹配度，增益(图 11)实现了逐渐上升的趋势且最高达到 23 dBi，与同类型的双脊喇叭天线相比，性能有较好的提升。从方向图(图 12)来看，在 10 GHz 左右(9.5 GHz)得到的方向图基本无突出旁瓣，主要方向清晰，这说明该结构的双脊喇叭天线在 1~10 GHz 具有较好的天线特性，同时由于建模仿真的馈源设置是双指数函数的脉冲，也侧面证明该结构的双脊喇叭天线一定程度上可以作为脉冲源应用，负载在电磁兼容领域。

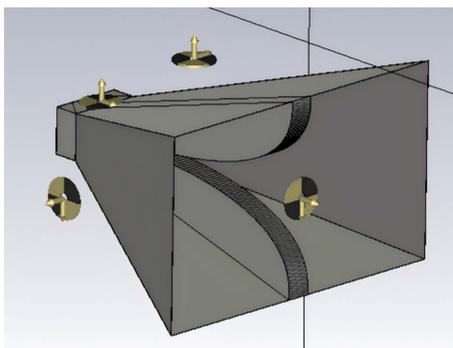


Figure 9. Structure of the final optimized model  
图 9. 最终优化建模结构图

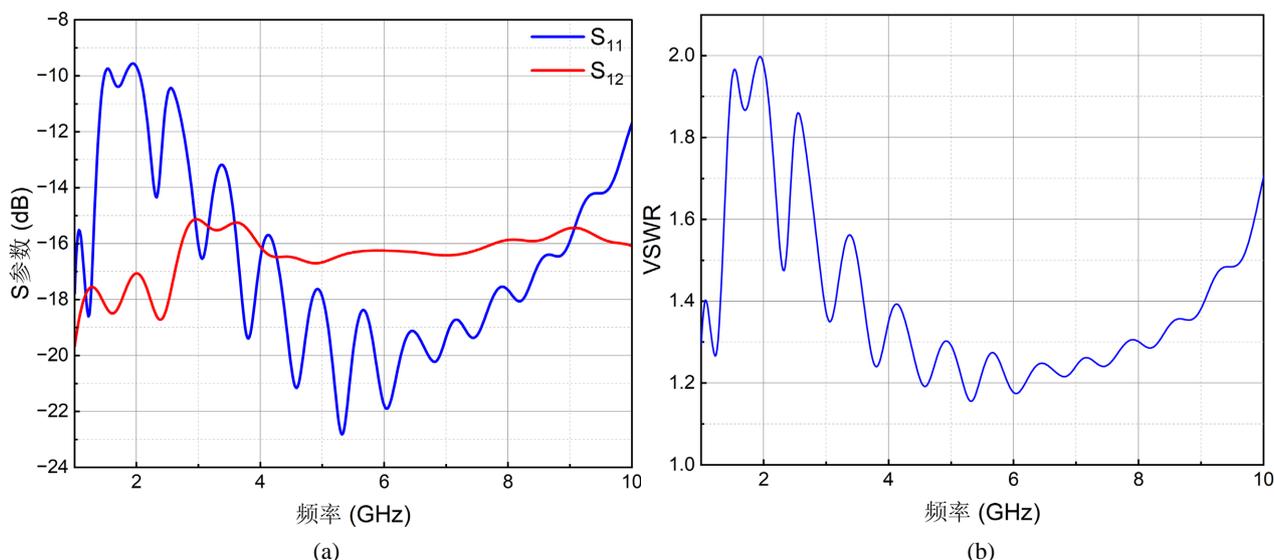


Figure 10. Final optimization results: (a) S-parameters, (b) VSWR  
图 10. 最终优化结果：(a) S 参数；(b) 驻波比

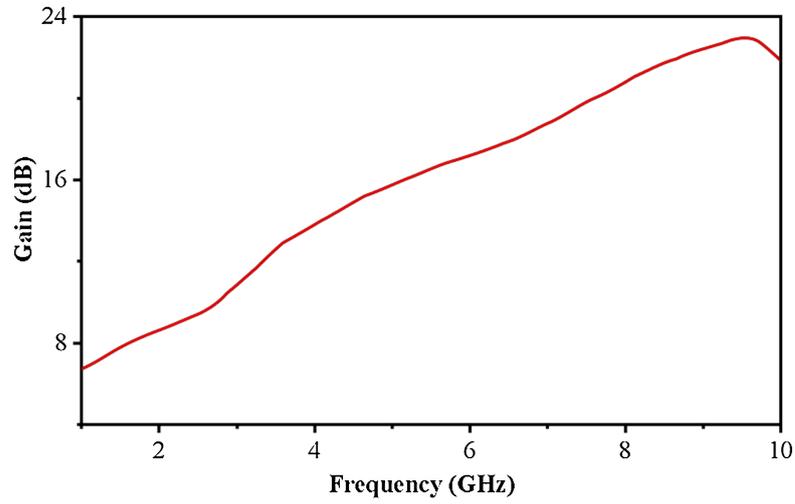


Figure 11. Final optimized gain  
图 11. 增益最终优化结果

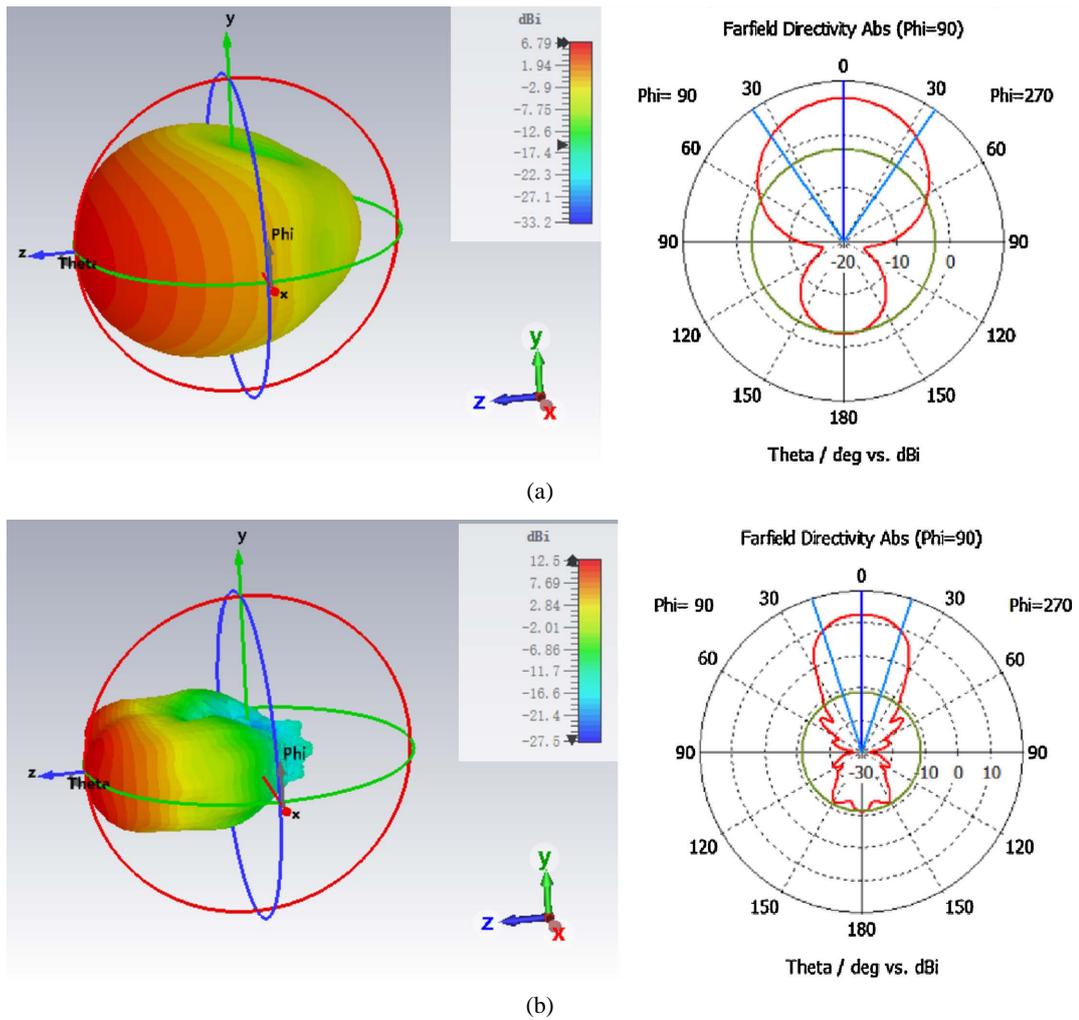


Figure 12. Simulated radiation patterns at different frequencies: (a) 1 GHz, (b) 9.5 GHz  
图 12. 不同频率下的仿真方向图: (a) 频率 1 GHz; (b) 频率 9.5 GHz

最终优化结构如图 9 所示。在最佳参数配置下,该双脊喇叭天线展现出宽达 1~10 GHz 的工作带宽,且在低频与高频段(1 GHz 及 10 GHz 附近)辐射特性最为优越。仿真结果表明:天线输入端口驻波比在全频带内稳定低于 1.7,表明其具有优异的阻抗匹配特性;增益特性(图 11)呈现单调递增趋势,峰值增益达 23 dBi,较同类双脊喇叭天线设计提升显著。方向图特性分析(图 12)表明:在 9.5 GHz 高频点,天线主瓣轮廓清晰,旁瓣电平抑制良好,未出现明显畸变。综上,该天线在 1~10 GHz 频段内具备稳定的辐射性能。值得注意的是:由于仿真采用双指数脉冲(Double-Exponential Pulse)作为馈源激励,其时域特性验证了该结构作为瞬态辐射源的可行性,暗示其在电磁兼容脉冲辐射场模拟中具有潜在应用价值。

## 5. 结论

本文创新性地使用二次贝塞尔曲线作为脊曲线,确定脊曲线起点和终点,将贝塞尔曲线脊的坐标点用 MATLAB 计算得出,对脊模型的修改更直观便捷。同时提出了一种改进结构的宽带喇叭天线,对馈电结构进行改进,提出更利于喇叭天线的辐射特性的结构设计。带宽 1~10 GHz,满足大部分测试要求,增益在工作频域可以达到 23 dBi,在 1~10 GHz 范围内的驻波比在 2.2 以下,方向图的侧瓣抑制效果良好,并且满足工程上对设计结构部件少、结构简单的要求,相较三次贝塞尔曲线更易于仿真计算和工程实现。

## 基金项目

基于能量采集的认知无线自组织网络关键技术研究(61771410)。

## 参考文献

- [1] Walton, K. and Sundberg, V. (1964) Broadband Ridged Horn Design. *Microwave Journal*, **4**, 96-108.
- [2] Kerr, J. (1973) Short Axial Length Broad-Band Horns. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **21**, 710-714. <https://doi.org/10.1109/tap.1973.1140561>
- [3] Oloumi, D., Mousavi, P., Pettersson, M.I. and Elliott, D.G. (2013) A Modified TEM Horn Antenna Customized for Oil Well Monitoring Applications. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **61**, 5902-5909. <https://doi.org/10.1109/tap.2013.2281720>
- [4] Abbas-Azimi, M., Arazm, F., Rashed-Mohassel, J. and Faraji-Dana, R. (2007) Design and Optimization of a New 1-18 GHz Double Ridged Guide Horn Antenna. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, **21**, 501-516. <https://doi.org/10.1163/156939307780616810>
- [5] Jacobs, B., Odendaal, J.W. and Joubert, J. (2012) An Improved Design for a 1-18 GHz Double-Ridged Guide Horn Antenna. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **60**, 4110-4118. <https://doi.org/10.1109/tap.2012.2207043>
- [6] Baker, D. and Van Der Neut, C. (1982) A Compact, Broadband, Balanced Transmission Line Antenna Derived from Double-Ridged Waveguide. 1982 *Antennas and Propagation Society International Symposium*, Albuquerque, 24-28 May 1982, 568-571. <https://doi.org/10.1109/aps.1982.1148767>
- [7] Yue, Z., Liu, Y. and Gong, S. (2018) A Novel 2-18 GHz Double-Ridged Horn Antenna with Simple Structure. *Microwave and Optical Technology Letters*, **60**, 1787-1794. <https://doi.org/10.1002/mop.31248>
- [8] Oktafiani, F., Hamid, E.Y. and Munir, A. (2022) Wideband Dual-Polarized 3D Printed Quad-Ridged Horn Antenna. *IEEE Access*, **10**, 8036-8048. <https://doi.org/10.1109/access.2022.3143164>
- [9] 吴亮. 宽带双脊喇叭天线设计及在微波吸收材料测试中的应用[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京大学, 2012.
- [10] 刘密歌. 超宽带双脊喇叭天线的研究与设计[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西北工业大学, 2007.
- [11] 赵丽新, 刘爽, 胡南, 等. 一种超宽带双脊喇叭天线的设计[C]//中国电子学会. 2023 年全国微波毫米波会议论文集汇编(一). 2023: 264-266.