

# 一种基于悬置带线馈电的宽带双极化阵列天线

钞 婷, 吕娅娜, 张正谦, 叶广健, 刘 鹏, 杨 洋, 王淑萍

西安航天天绘数据技术有限公司, 陕西 西安

收稿日期: 2026年8月17日; 录用日期: 2026年9月10日; 发布日期: 2026年9月17日

## 摘 要

文章提出一种悬置带线馈电的宽带双极化高增益低剖面四脊喇叭阵列天线, 其由悬置带线馈线、四脊喇叭和国产低损耗PCB介质板组成。辐射单元采用台阶式四脊喇叭形式, 易加工且具有高增益和宽带的特性; 在四脊喇叭两个相互垂直的内壁上开孔馈电, 实现了双极化要求; 选择低损耗PCB介质板, 降低了悬置带线馈电网络传输损耗; 通过调整悬置带线馈线的尺寸, 有效展宽了天线驻波带宽。

## 关键词

悬置带线, 宽带, 双极化, 高增益, 低剖面, 阵列天线

# A Wideband Dual-Polarized Array Antenna Based on Suspended Stripline Feed

Ting Chao, Yana Lyu, Zhengqian Zhang, Guangjian Ye, Peng Liu, Yang Yang, Shuping Wang

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

Received: August 17, 2026; accepted: September 10, 2026; published: September 17, 2026

## Abstract

This paper proposes a wideband dual-polarized high-gain low-profile quad-ridged horn array antenna based on suspended stripline feed, composed of suspended stripline feeders, quad-ridged horns, and domestically produced low-loss PCB substrates. The radiating element adopts a stepped quad-ridged horn configuration, offering advantages such as ease of fabrication, high gain, and broadband characteristics. Dual-polarization is achieved by aperture feeding on two orthogonal inner walls of the quad-ridged horn. The use of low-loss PCB substrates reduces transmission loss in the suspended stripline feeding network, while adjusting the dimensions of the suspended stripline feeders effectively broadens the antenna's voltage standing wave ratio (VSWR) bandwidth.

**文章引用:** 钞婷, 吕娅娜, 张正谦, 叶广健, 刘鹏, 杨洋, 王淑萍. 一种基于悬置带线馈电的宽带双极化阵列天线[J]. 天线学报, 2026, 15(3): 58-71. DOI: 10.12677/ja.2026.153007

## Keywords

**Suspended Stripline, Wideband, Dual-Polarization, High Gain, Low Profile, Array Antenna**

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

近年来,随着 5G/6G 移动通信、低轨卫星星座通信、点对点微波中继等技术的快速发展,无线通信系统对天线的带宽、增益、极化特性与剖面提出了更高要求。双极化天线利用极化分集与极化复用技术,可在不扩展频谱资源的条件下提升信道容量、增强系统抗干扰能力,已成为卫星通信系统的核心部件。

Ku 频段天线由于其频率高、波束定向性好、传输容量大,广泛应用于卫星广播、卫星宽带与深空通信。但 Ku 频段信号在空间传输中面临显著的路径损耗和大气衰减,因此必须采用高增益阵列天线以保证远距离通信链路的可靠性。同时,星载、车载、机载等移动平台对天线的低剖面、轻量化、易共形、易集成特性提出严格要求,传统波导喇叭天线带宽宽、效率高,但剖面高、重量大,难以满足现代通信系统的集成需求。因此,研发兼具宽带、双极化、高增益、低剖面的 Ku 频段平板阵列天线具有重要的理论价值与工程意义。

目前,宽带阵列天线辐射单元主要包括偶极子、微带贴片、波导缝隙与喇叭天线等类型。偶极子天线剖面低但增益有限;微带贴片与波导缝隙天线带宽较窄;喇叭天线辐射效率高、工作带宽宽,但传统结构剖面较高。为兼顾带宽、增益与加工性,本文采用台阶式四脊喇叭作为辐射单元,通过加脊结构拓展阻抗带宽,并利用台阶化设计简化加工工艺,提升单元一致性[1]-[9]。

馈电网络方面,传统波导馈电损耗低,但剖面高;微带线在 Ku 波段传输损耗大,辐射效率低;基片集成波导(SIW)需大量金属化过孔,加工成本高。而悬置带线的电磁场主要在空气介质中传输,具有传输损耗低、寄生辐射小、剖面低、易集成、成本低等优势,是 Ku 波段大规模阵列馈电网络的理想选择。

基于上述技术分析,本文设计一种基于悬置带线的宽带双极化 Ku 波段平板阵列天线。通过正交开孔耦合实现双极化,采用国产低损耗 PCB 基板减小馈电损耗,通过不等功分网络实现幅度锥削与副瓣抑制,最终实现宽带、高增益、低剖面与高隔离双极化的综合性能。

## 2. 天线设计

### 2.1. 辐射单元设计

本文所设计辐射单元采用台阶式四脊喇叭结构,如图 1 所示。在喇叭内壁加载金属脊,可有效拓展阻抗带宽,改善辐射方向图对称性;台阶化结构降低加工难度,保证批量生产的一致性。喇叭台阶高度、金属脊长度与宽度直接影响天线单元的阻抗匹配、辐射效率与工作带宽,是结构设计的关键参数。

馈电方式采用悬置带线开孔耦合,将两层正交悬置带线分别伸入喇叭腔体内部,通过优化耦合段的形状与尺寸,实现馈电网络与辐射单元之间的良好阻抗匹配,从而展宽天线驻波带宽。双极化通过两组正交布置的馈电结构实现,极化隔离度高。

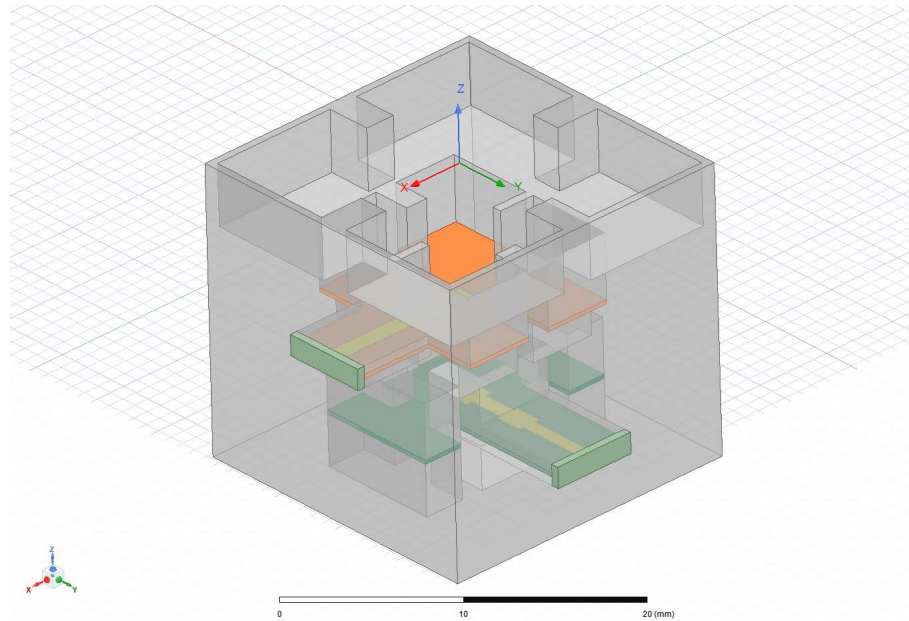


Figure 1. Stepped quad-ridged horn element  
图 1. 四脊台阶喇叭单元

出台阶式四脊喇叭单元与正交悬置带线开孔耦合馈电的关键尺寸为(单位: mm): 喇叭开口外边长为 22.5; 金属脊长度为 3; 金属脊宽度为 2; 两级台阶高度分别为 4.5、3.9; 正交馈电耦合孔尺寸为  $5.5 \times 1.4$ ; 介质基板厚度为 0.25; 悬置带线主线宽为 0.9。根据上述布局设计, 利用电磁仿真软件对天线单元进行建模仿真及优化, 得到该喇叭单元的反射系数、端口隔离度、增益方向图和极化隔离度仿真图, 如图 2~4 所示。

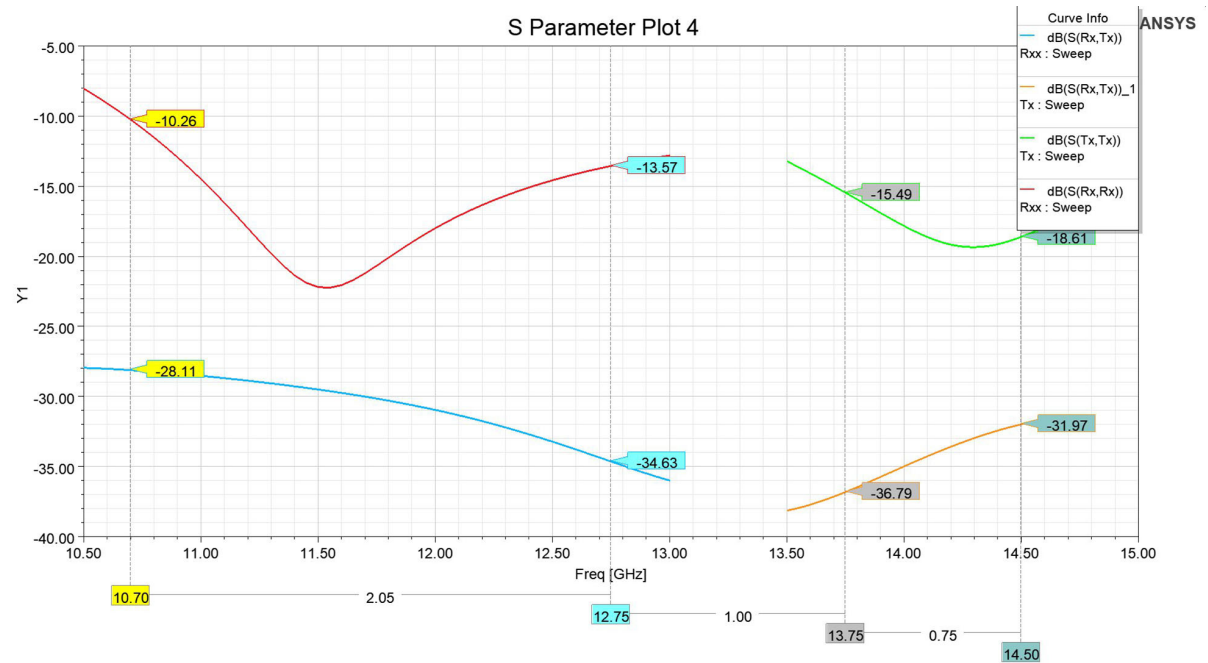
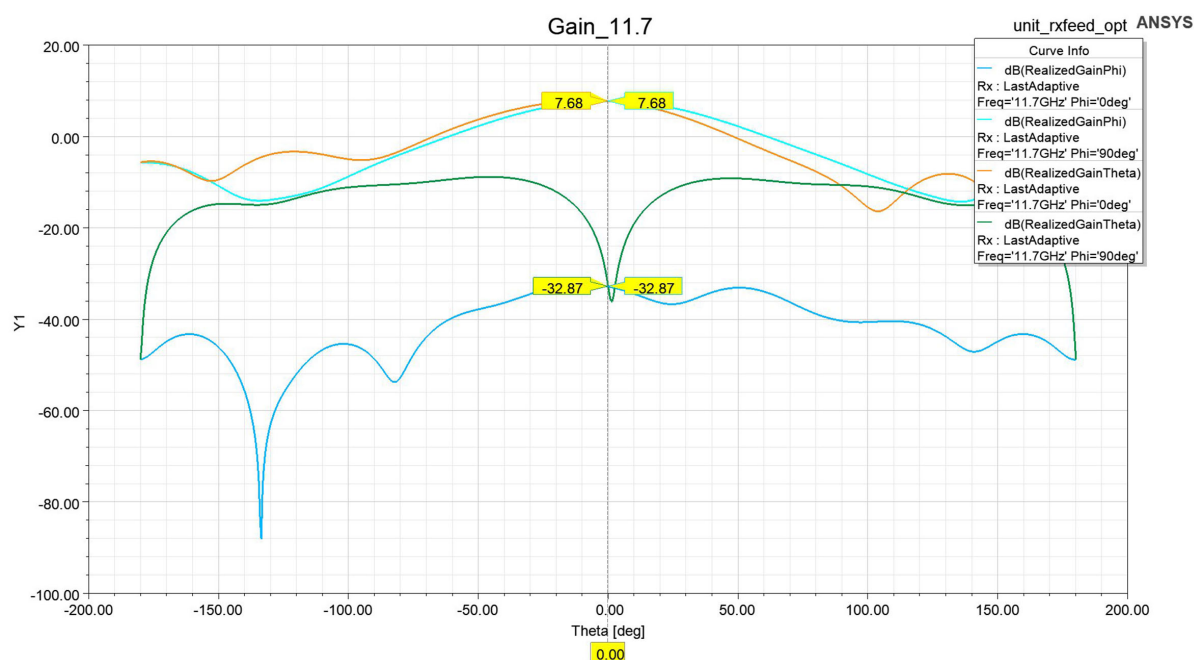
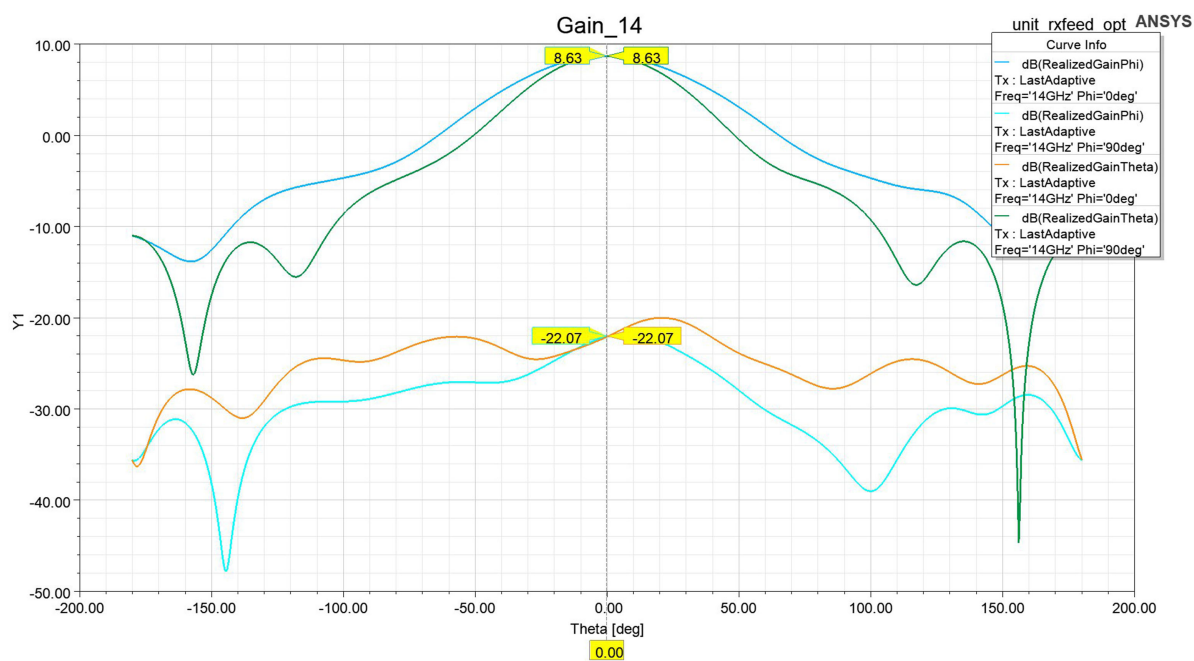


Figure 2. Simulated reflection coefficient and port isolation of element  
图 2. 反射系数及端口隔离度图



**Figure 3.** Co-polarization and cross-polarization pattern at receive center frequency  
**图 3.** 接收中心频点主极化及交叉极化方向图



**Figure 4.** Co-polarization and cross-polarization pattern at transmit center frequency  
**图 4.** 发射中心频点主极化及交叉极化方向图

仿真结果表明:

在接收频段 10.7~12.75 GHz 范围内, 回波损耗  $\leq -10.67$  dB;

在发射频段 12.75~14.5 GHz 范围内, 回波损耗  $\leq -15.49$  dB;

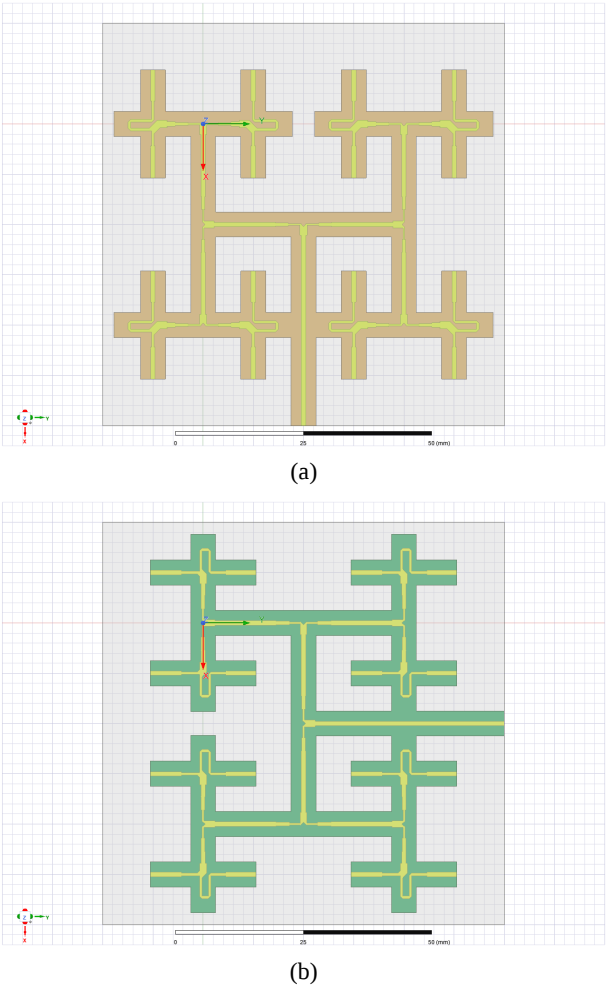
在接收中心频点处增益 7.68 dBi, 交叉极化隔离度 40.55 dB;

在发射中心频点处增益 8.63 dBi，交叉极化隔离度 30.70 dB。  
天线单元具备良好的宽带特性与双极化性能，满足大规模阵列应用要求。

2.2. 馈电网络设计

Ku 频段大规模阵列天线的馈电网络损耗会直接影响天线整机增益与辐射效率。本文选用悬置带线作为馈电传输线，其核心优势如下：

- 1) 相较于波导馈电网络，剖面低，易于实现低剖面天线集成；
- 2) 场主要在空气中传输，传输损耗远低于微带线；
- 3) 金属屏蔽结构抑制寄生辐射，提升阵列效率；
- 4) 相较于基片集成波导网络，无需大量金属化过孔，加工成本低，工艺简单。



**Figure 5.** Upper and lower 1-to-16 feed networks: (a) Upper feed network for receive band; (b) Lower feed network for transmit band  
**图 5.** 上、下层 1 分 16 馈电网络：(a) 上层网络；(b) 下层网络

所设计馈电网络印制在国产低损耗微波 PCB 介质板上，其基板关键参数为：厚度  $h = 0.254\text{ mm}$ ，介电常数  $\epsilon_r = 2.2$ ，损耗角正切  $\tan\delta = 0.0009^1$ 。整阵采用分层金属腔体结构加工，将馈电网络夹于腔体中间，

<sup>1</sup>板材参数来源于生益科技(2024)：0.254 mm 低损耗 PCB 材料特性表。

实现紧凑集成与屏蔽保护。

为支撑  $16 \times 16$  单元阵列，分别设计两层 1 分 16 悬置带线功分网络，上层对应接收频段，下层对应发射频段，如图 5 所示。

对馈电网络进行全波仿真优化，回波损耗与插入损耗如图 6、图 7 所示。

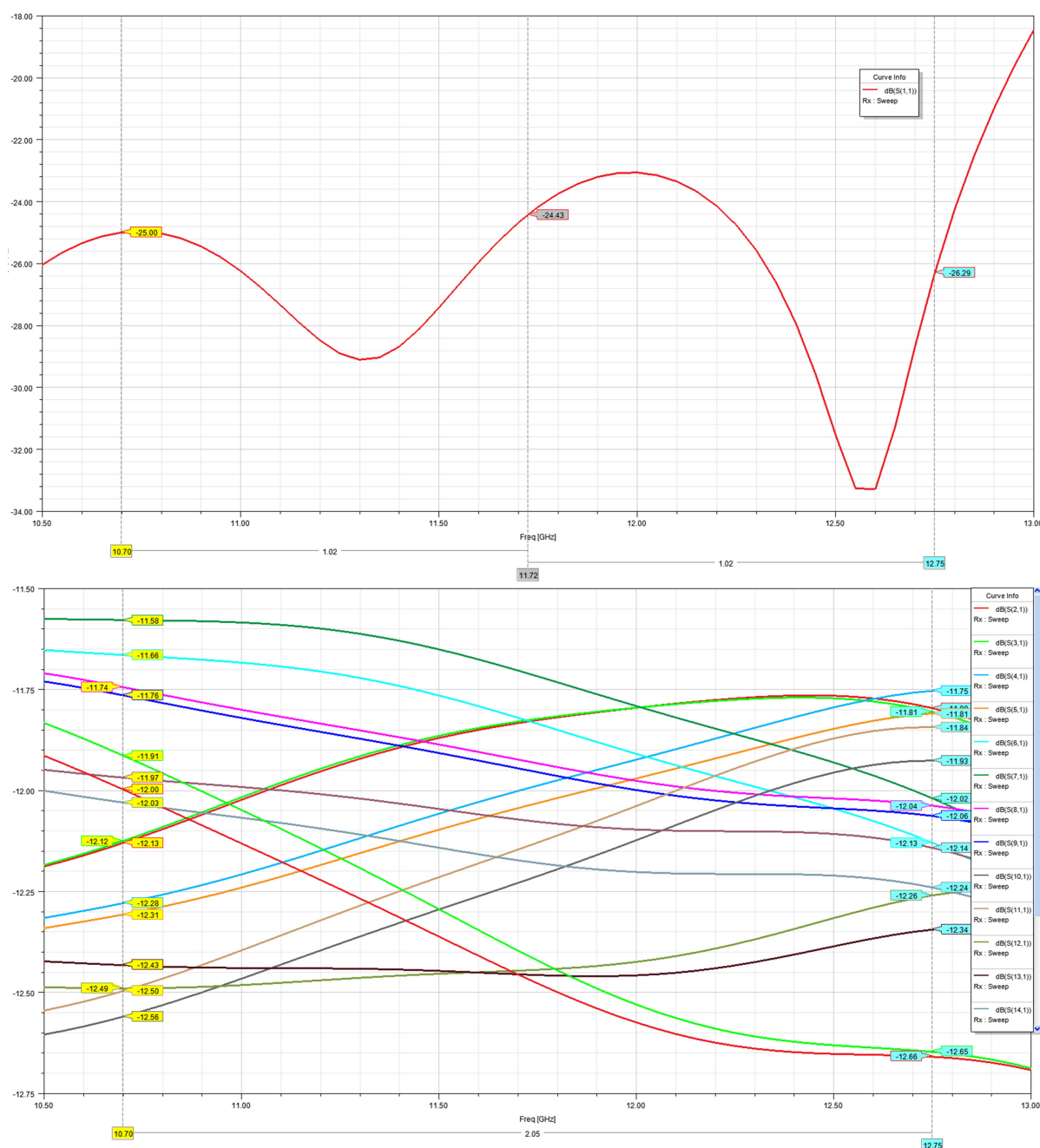


Figure 6. Return loss and insertion loss of upper receive feed network

图 6. 上层网络回波损耗及插入损耗

仿真结果表明：

上层接收频段馈电网络回波损耗  $\leq -23$  dB，平均插入损耗  $\leq 0.2$  dB；

下层发射频段馈电网络回波损耗  $\leq -19.19$  dB, 插入损耗  $\leq 0.2$  dB。  
所设计馈电网络具备低损耗、高匹配、高一致性特性, 为阵列高增益提供可靠保障。

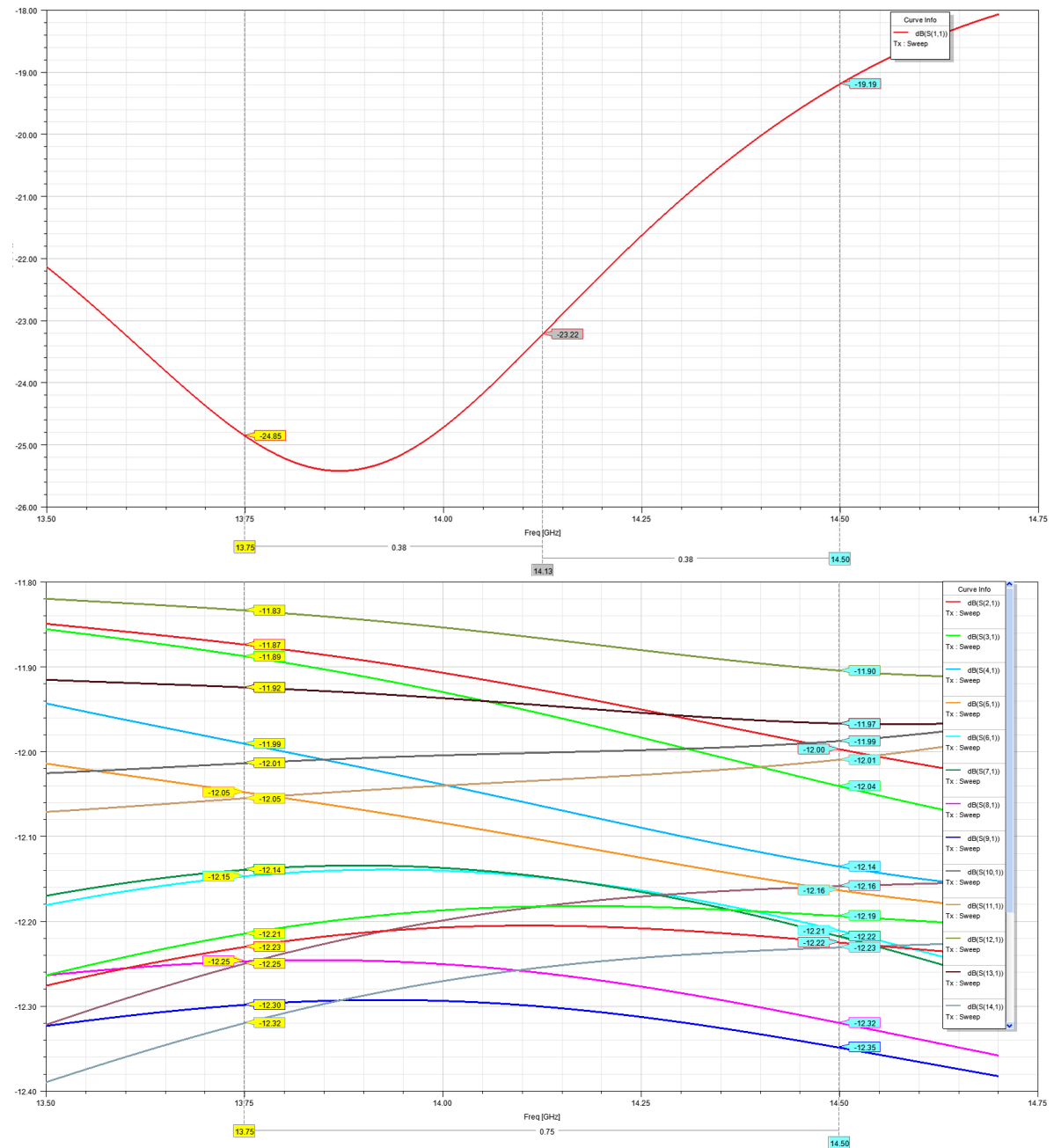


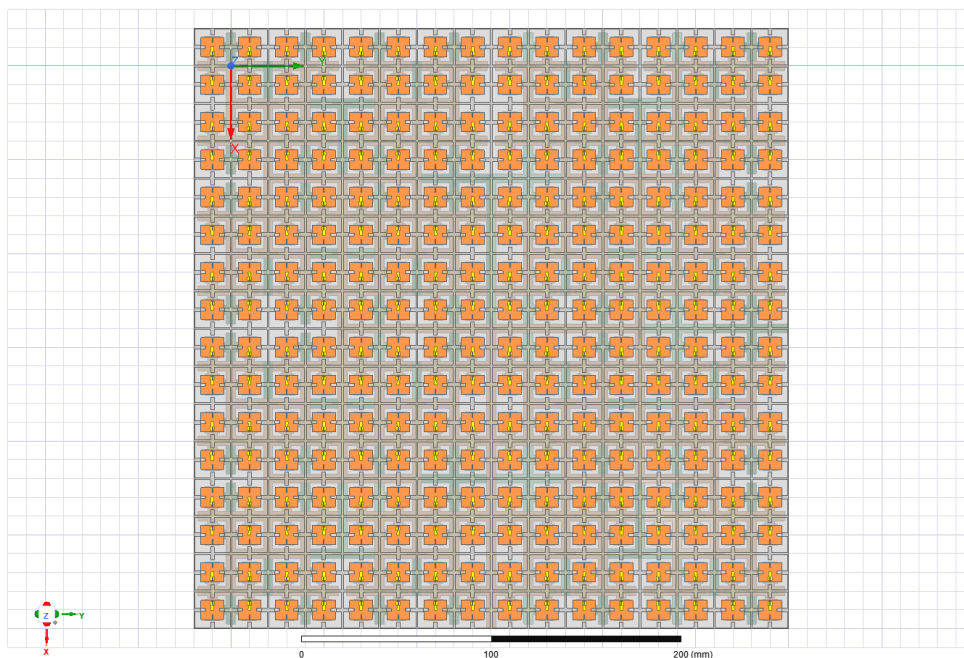
Figure 7. Return loss and insertion loss of lower transmit feed network  
图 7. 下层网络回波损耗及插入损耗

### 2.3. 天线阵列设计

将优化后的喇叭天线辐射单元与两层馈电网络集成, 构建  $16 \times 16$  单元的平板天线阵列, 结构如图 8 所示。

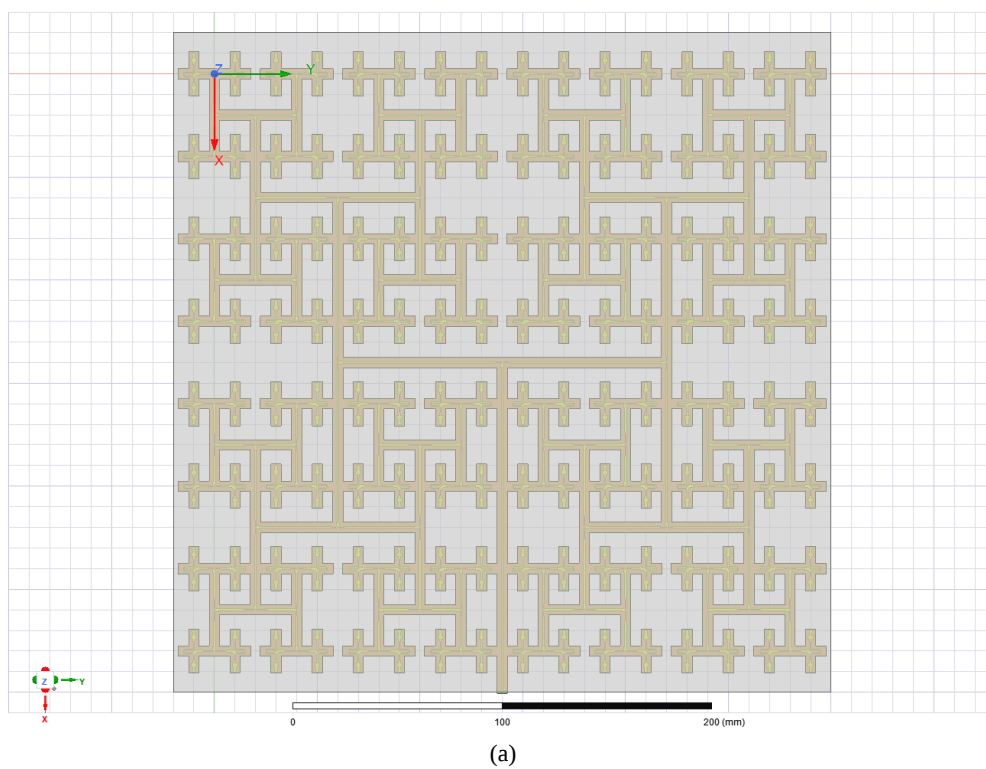
卫星通信系统对天线方向图副瓣有严格要求, 为避免对相邻卫星产生干扰, 规定副瓣电平  $\leq -14$  dB 方

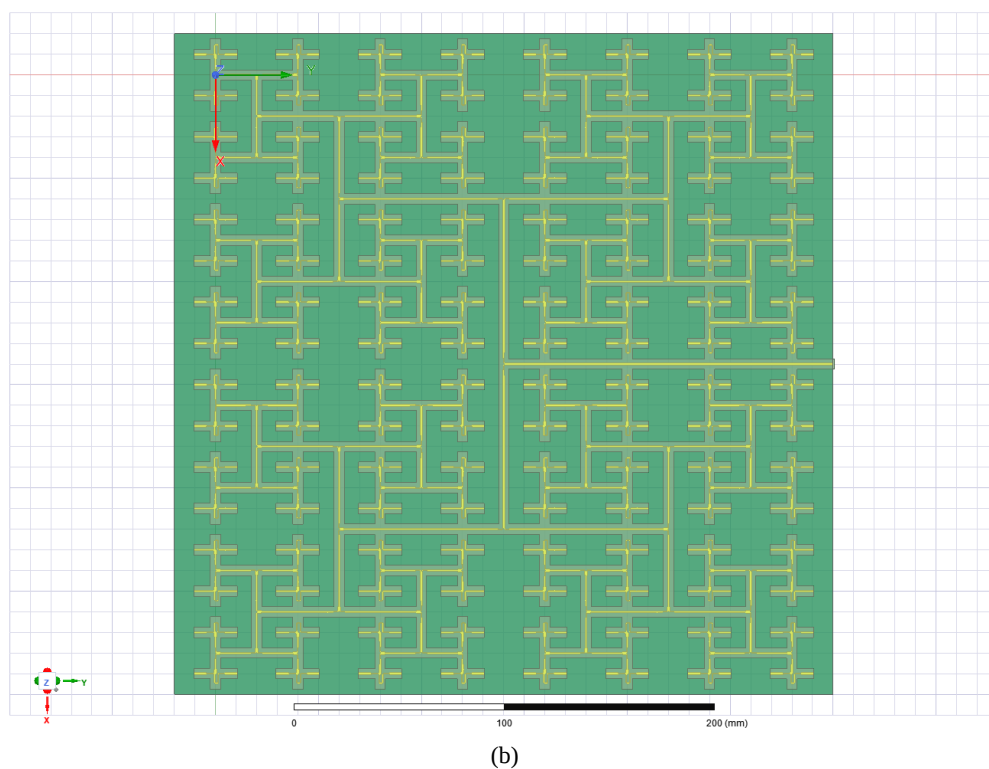
可入网。本文采用幅度锥削加权技术，分别对上下两层馈电网络进行设计。通过级联两级功分比为 1:2 的 1 分 2 不等功分器，得到功分比为 1:2:2:1 的 1 分 4 支路，再多级级联等功分 1 分 2 功分器，最终使每一行/列 16 个单元的激励幅度比构成皆为 1:1:1:1:2:2:2:2:2:2:2:2:1:1:1:1，有效降低副瓣电平，馈电网络如图 9 所示。



**Figure 8.** Structure model of  $16 \times 16$  antenna array

**图 8.**  $16 \times 16$  单元天线阵列结构模型

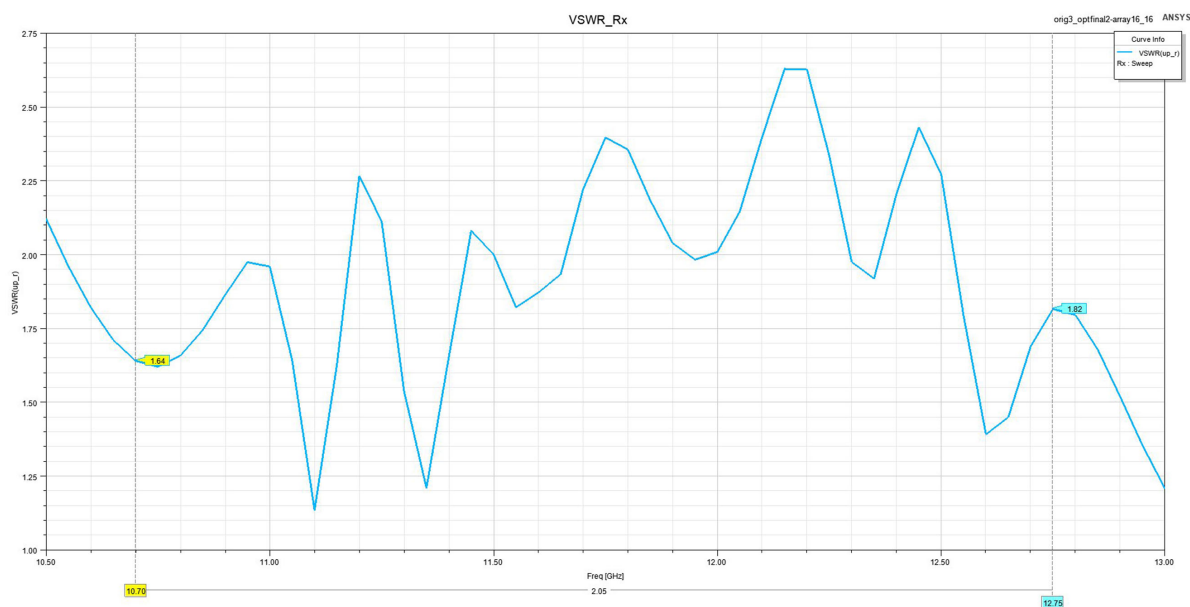




**Figure 9.** Dual-layer amplitude-tapered feed network for  $16 \times 16$  array: (a) Upper amplitude-tapered feed network; (b) Lower amplitude-tapered feed network

**图 9.**  $16 \times 16$  单元天线阵列上、下层馈电网络模型: (a) 上层网络; (b) 下层网络

利用电磁仿真软件对阵列天线进行全波仿真计算, 得到驻波比、增益方向图与交叉极化特性图, 如图 10~13 所示。



**Figure 10.**  $16 \times 16$  element array receiving-band VSWR

**图 10.**  $16 \times 16$  单元阵列接收频段驻波

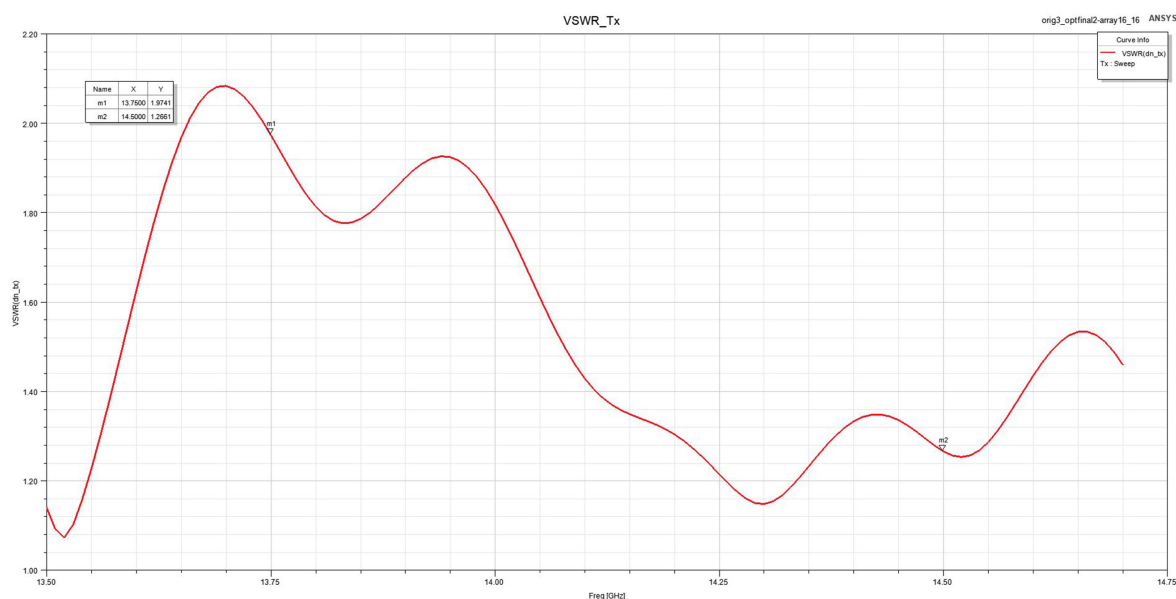


Figure 11. 16 × 16 element array transmit-band standing wave

图 11. 16 × 16 单元阵列发射频段驻波

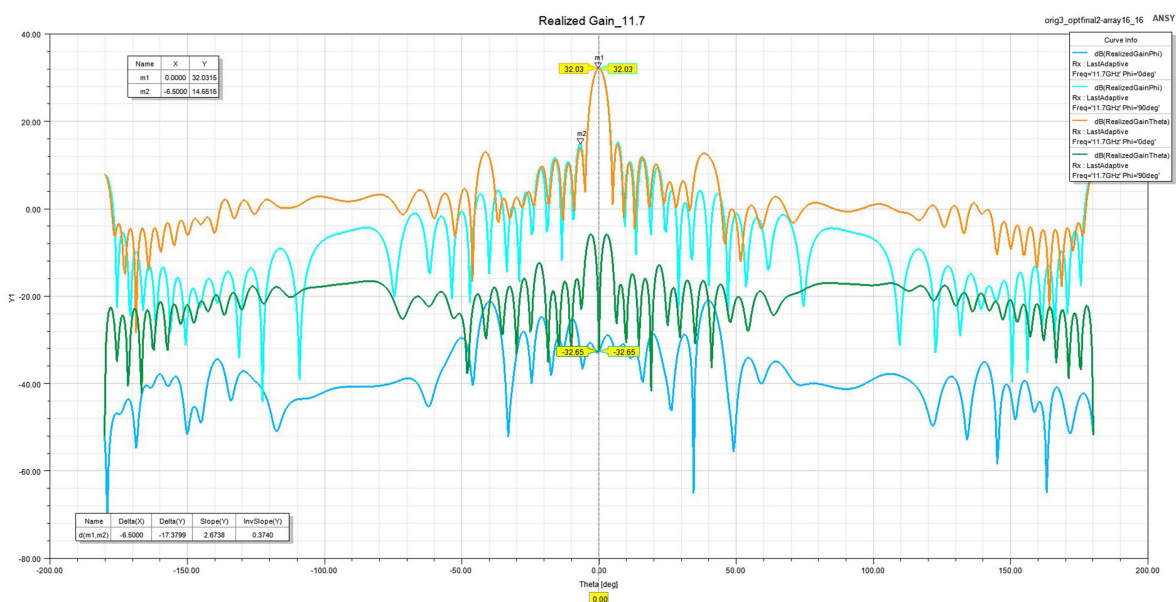


Figure 12. Radiation pattern of a 16 × 16 element array at the center frequency

图 12. 16 × 16 单元阵列接收中心频率方向图

所设计阵列天线核心电性能:

- 1) 接收频段驻波比:  $\leq 2.6:1$ ;
- 2) 发射频段驻波比:  $\leq 2.0:1$ ;
- 3) 接收频段中心频点增益: 32.03 dBi, 辐射效率达 82%;
- 4) 发射频段中心频点增益: 34.16 dBi, 辐射效率达 94%;
- 5) 接收中心频点副瓣电平:  $\leq -17.37$  dB, 满足卫星通信入网要求;
- 6) 发射中心频点副瓣电平:  $\leq -18.94$  dB, 满足卫星通信入网要求。

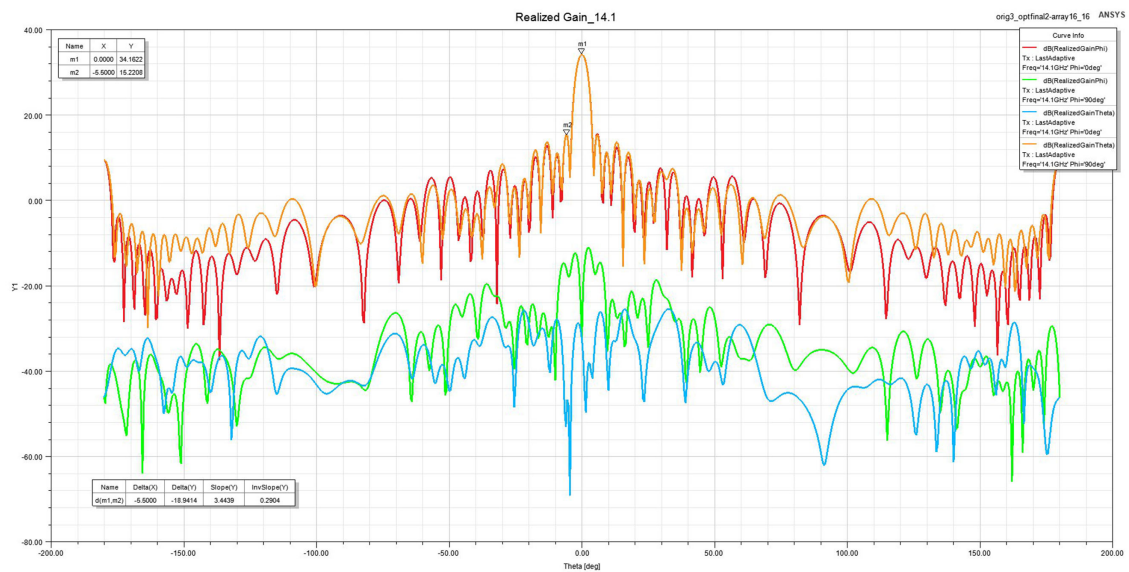


Figure 13. Radiation pattern at the center frequency for a  $16 \times 16$  element array  
图 13.  $16 \times 16$  单元阵列发射中心频率方向图

### 3. 实物加工与测试

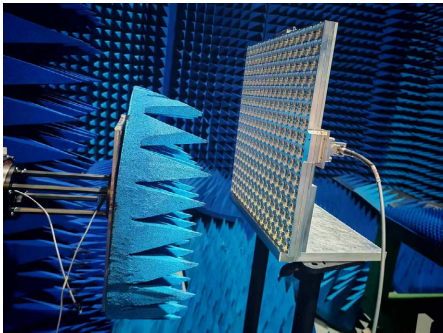
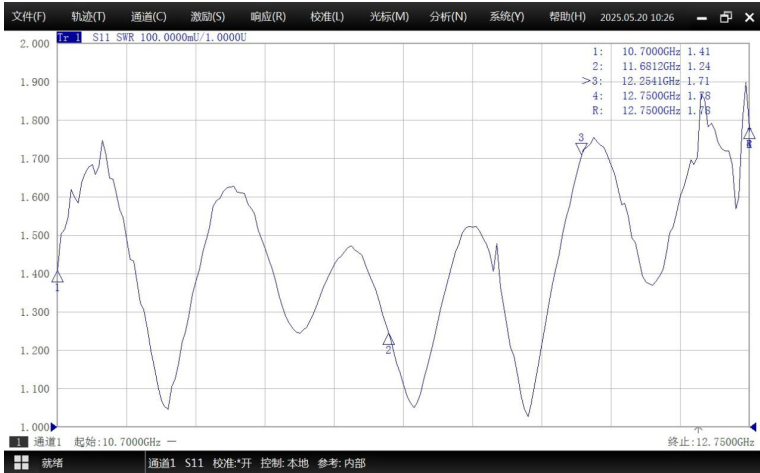


Figure 14. Photograph of fabricated antenna array under test  
图 14. 天线阵列实物图



(a)



(b)

**Figure 15.** Measured VSWR curves of antenna array: (a) Measured VSWR curve of receive band; (b) Measured VSWR curve of transmit band

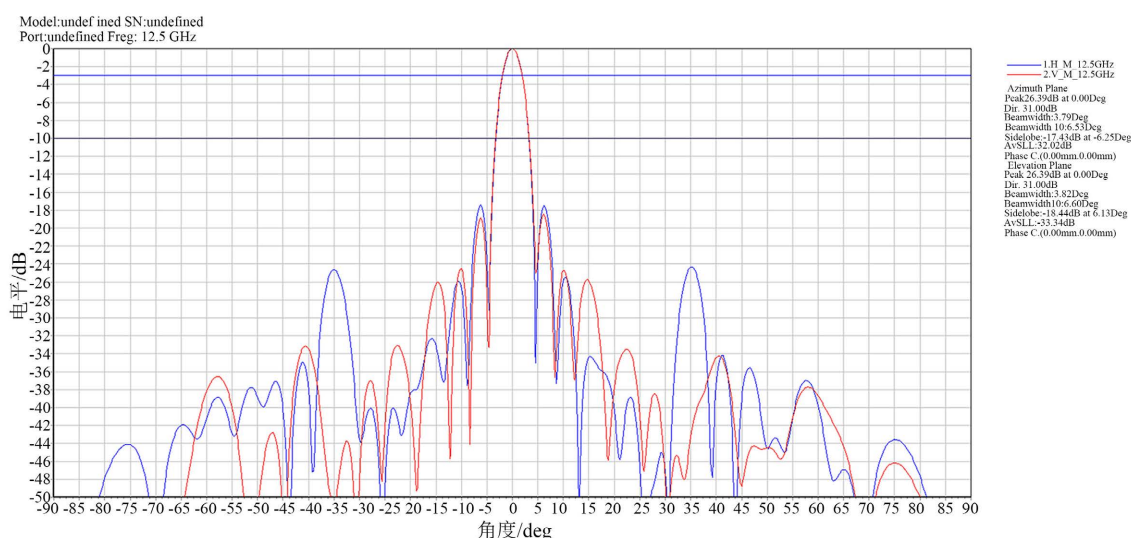
**图 15.** 天线阵列测试驻波图：(a) 接收频段；(b) 发射频段

对  $16 \times 16$  阵列天线进行加工、组装与调试，实物如图 14 所示。采用 Keysight N5245B 矢量网络分析仪(频率覆盖 10~50 GHz)在微波远场暗室(长 12 m × 宽 6 m × 高 6 m，静区有效尺寸 1 m × 1 m，静区全频段反射电平  $\leq -42$  dB)，完成驻波比与方向图测试，测试结果如图 15~17 所示。

实测结果与仿真结果对比如表 1 所示。

测试与仿真对比分析：

- 1) 接收频段驻波曲线趋势一致，发射频段实测驻波曲线毛刺较多，主要由加工误差、装配间隙、介质损耗离散性导致；
- 2) 方向图形状、波束宽度与副瓣电平与仿真结果基本吻合，满足系统指标；
- 3) 实测增益略低于仿真值，主要原因包括：介质损耗、金属表面粗糙度、装配缝隙漏波、接头损耗等；
- 4) 整体测试结果验证了天线设计的正确性与可行性，天线满足 Ku 波段卫星通信工程应用要求。



**Figure 16.** Testing the antenna array's radiation patterns in the azimuth and elevation planes within the receive frequency band

**图 16.** 天线阵列测试接收频段方位面及俯仰面的方向图

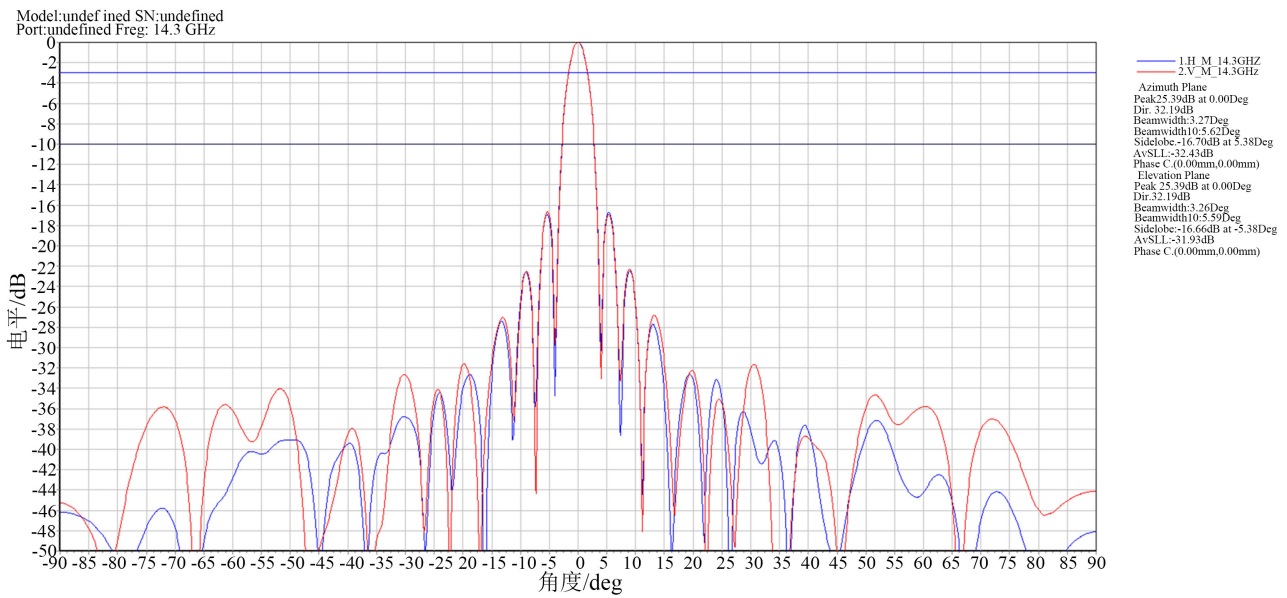


Figure 17. Testing the azimuth and elevation radiation patterns of the antenna array in the transmit frequency band  
图 17. 天线阵列测试发射频段方位面及俯仰面方向图

Table 1. Comparison of simulated and measured electrical performance  
表 1. 实测结果与仿真结果对比表

| 测试项目 |    | 仿真           | 实测           |
|------|----|--------------|--------------|
| 驻波   | 接收 | $\leq 2.6:1$ | $\leq 1.9:1$ |
|      | 发射 | $\leq 2.0:1$ | $\leq 1.9:1$ |
| 增益   | 接收 | 32.03 dBi    | 31.00 dBi    |
|      | 发射 | 34.16 dBi    | 32.19 dBi    |
| 副瓣   | 接收 | -17.37 dB    | -16.70 dB    |
|      | 发射 | -18.94 dB    | -17.43 dB    |

4. 创新优势

选取 2021~2026 年国内外主流 Ku 平板阵列相关文献实测指标，列于表 2：

Table 2. Measured performance comparison with recent Ku-band array antennas  
表 2. 本文天线与近年 Ku 波段双极化阵列实测性能对比

| 文献  | 阵列规模    | 馈电形式       | 辐射效率    | 天线厚度(mm) | 极化隔离度(dB)   | 核心短板                |
|-----|---------|------------|---------|----------|-------------|---------------------|
| 本文  | 16 × 16 | 悬置带线       | 82%~94% | 26.8     | $\geq 30.7$ | 无明显短板，全频段低损耗        |
| [3] | 8 × 8   | 悬置带线       | 75%     | 32.5     | $\geq 28$   | 阵列规模小、剖面更高、效率偏低     |
| [6] | 12 × 12 | 3D 打印波导    | 78%     | 41.2     | $\geq 27$   | 3D 打印成本高、剖面大、损耗高    |
| [7] | 16 × 16 | SIW 基片集成波导 | 76%     | 30.4     | $\geq 29$   | 大量金属化过孔，加工成本高，馈电损耗大 |
| [4] | 10 × 10 | 微带线馈电      | 69%     | 22.3     | $\geq 26$   | Ku 波段微带损耗大，效率低，带宽窄  |

由表 2 横向对比可得本文创新优势：

- 1) 馈电损耗与辐射效率最优：采用空气为主传输介质的悬置带线 + 国产低损耗 PCB，发射频段实

测效率达 94%，显著优于 SIW、微带、3D 打印波导馈电阵列；

2) 低剖面兼顾大阵列：16×16 大规模阵列整机剖面仅 26.8 mm，低于同规格 SIW 阵列，适配机载、车载轻量化集成；

3) 高极化隔离度：极化隔离优于 30 dB，卫星通信抗干扰能力更强；

4) 工程成本优势：无需 SIW 大量金属化过孔、3D 打印工艺，常规 PCB + 金属腔体数控加工即可批量生产，加工一致性好。

## 5. 总结

本文设计了一种基于悬置带线馈电的宽带双极化 Ku 波段 16×16 平板阵列天线，辐射单元采用台阶式四脊喇叭，实现宽带与高辐射效率；馈电网络采用悬置带线结构，实现低损耗、低剖面与易集成；通过正交开孔耦合实现高隔离双极化；利用幅度锥削得到低副瓣方向图。

仿真与测试表明，该天线在 Ku 全频段内阻抗匹配良好、增益高、极化纯度高、副瓣电平低，具备宽带、双极化、高增益、低剖面、易加工、可批量生产等优势，可广泛应用于 Ku 波段低轨卫星通信、微波中继、车载/机载宽带通信系统。

## 参考文献

- [1] 王秉中. 超宽带天线原理与设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 2012.
- [2] 朱剑锋. 低轨卫星通信系统接入控制与波束赋形方法研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京邮电大学, 2025.
- [3] 张磊. 基于悬置带线的功分/合成技术的研究与应用[D]: [硕士学位论文]. 绵阳: 西南科技大学, 2021.
- [4] 赵峰. 宽带双极化金属阵列天线研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安电子科技大学, 2022.
- [5] 王崇惜, 邓淑英. 一种 X 波段余割平方赋形平面微带阵列天线[J]. 通信技术, 2019, 52(9): 2310-2316.
- [6] Xia, Y.Q., Li, X.P., Kou, G.Q., Zhao, W.Y., Zhang, J., Ishfaq, M., et al. (2025) Three-Dimensional-Printed Low-Sidelobe Dual-Band Dual-Polarized Antenna Array for Ku-Band Satellite Communications. *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*, 26, 1501-1508. <https://doi.org/10.1631/fitee.2400709>
- [7] 张耀航. Ku 波段双频双极化 OMT 平板阵列天线设计[J]. 无线通信技术, 2024, 33(4): 28-31.
- [8] 杨贵挺, 谢小强, 张云华. 一个微波小型化超宽带高功率分配网络[J]. 电子测试, 2016(Z1): 101-103.
- [9] 谢拥军, 刘莹, 李磊, 等. HFSS 原理与工程应用[M]. 北京: 科学出版社, 2011.