

# 基于稀疏重建的频率扫描漏波天线设计

李远航, 顾鹏飞\*, 赵 辉, 何 姿, 樊振宏, 丁大志

(南京理工大学微系统集成技术系, 江苏南京 210094)

**摘要:** 波导缝隙阵列天线是微波与毫米波系统中的关键辐射器件, 其工作原理在于缝隙切割了波导壁上的表面电流, 从而产生辐射. 通过设计缝隙的偏置、倾角、长度以及在波导上的排列方式 (如谐振式或非谐振式阵列), 可以控制天线的辐射方向图、极化方式和阻抗特性. 常见的阵列形式包括在宽边中心线两侧交替偏置的纵缝 (用于形成边射阵) 以及与轴向成一定角度的斜缝 (可用于实现频率扫描或圆极化). 该类天线具有结构紧凑、功率容量高和损耗低等优点, 广泛应用于雷达、通信及电子对抗领域. 传统均匀直线排列的波导缝隙阵列在频率扫描范围和副瓣抑制方面存在局限. 为突破这些限制, 本文设计并加工了一款中心频率为 15.35 GHz 的“蛇”形脊波导缝隙阵列天线. 该结构创新性地引入“蛇”形慢波线, 通过增加电磁波传播路径, 显著提升等效传播相位常数, 使得频率变化时产生更大的波束偏转, 从而实现更宽角度的频率扫描. 仿真与实测结果表明, 该天线实现了  $-30^\circ$  至  $+30^\circ$  的宽角度频率扫描, 覆盖范围广, 且在整个扫描过程中保持良好的低副瓣特性. 同时, 该结构具有紧凑、低剖面的优点, 适合空间要求严格的集成化系统. 为进一步提升性能, 本文采用结合多测量向量与欠定系统局灶解法的 M-FOCUSS (一种多测量向量 (Multiple Measurement Vectors, MMV) 欠定系统局灶解法 (FOCAL Underdetermined System Solver, FOCUSS)) 综合算法, 对阵列进行稀疏优化. 该方法在保证辐射性能的前提下, 将缝隙单元数量减少约 28%, 实现约 -18 dB 的低副瓣电平, 并保持良好频率扫描特性. 稀疏化使波导表面开口面积减少, 功率容量提升约 40%, 对高功率应用具有重要意义. 实验测试结果与全波仿真数据吻合良好, 验证了“蛇”形脊波导结构在拓展波束扫描范围方面的有效性, 以及 M-FOCUSS 稀疏综合方法的实用价值. 该设计为波导缝隙天线实现宽角频率扫描与低副瓣性能提供了新思路, 同时展示了稀疏化在提升功率容量和降低制造成本方面的潜力, 对新一代高性能扫描天线发展具有积极参考意义.

**关键词:** 波导缝隙天线; 脊波导; 频扫天线; 低副瓣; 稀疏天线

**基金项目:** 国家自然科学基金 (No.62431012, No.62271256, No.62025109, No.32261133623); 江苏省重点研发计划项目 (No.BE2022070); 南京理工大学自主科研专项计划项目 (No.30922010703)

**中图分类号:** TN823

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0372-2112(2025)10-3473-10

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>

**DOI:** 10.12263/DZXB.20250392

## Design of Frequency-Scanning Leaky-Wave Antenna Based on Sparse Reconstruction

LI Yuan-hang, GU Peng-fei\*, ZHAO Hui, HE Zi, FAN Zhen-hong, DING Da-zhi

(Department of Microsystems Integration Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China)

**Abstract:** Waveguide slot array antennas are crucial radiating components in microwave and millimeter-wave systems. The operational principle relies on the slots interrupting the surface currents on the waveguide walls, thereby generating radiation. By designing the offset, inclination angle, and length of the slots, as well as their arrangement on the waveguide (e.g., resonant or non-resonant arrays), the antenna's radiation pattern, polarization, and impedance characteristics can be controlled. Common array configurations include longitudinal slots alternately offset on either side of the broad-wall centerline (used to form broadside arrays) and inclined slots at a certain angle to the axis (which can be used for frequency scanning or circular polarization). This type of antenna offers advantages such as a compact structure, high power capacity, and low loss, making it widely applicable in radar, communications, and electronic countermeasures. Traditional uniformly spaced linear waveguide slot arrays have limitations in frequency scanning range and sidelobe suppression. To overcome these constraints, this paper presents the design and fabrication of a serpentine ridge waveguide slot array antenna with a

center frequency of 15.35 GHz. This structure innovatively incorporates a serpentine slow-wave line, which increases the propagation path of the electromagnetic wave and significantly enhances the equivalent propagation phase constant. As a result, a larger beam deflection is achieved for a given frequency change, enabling a wider angular frequency scan. Simulation and experimental results demonstrate that the proposed antenna achieves a wide-angle frequency scan from  $-30^\circ$  to  $+30^\circ$ , offering broad coverage while maintaining excellent low sidelobe characteristics throughout the scanning process. Furthermore, the structure is compact and low-profile, making it suitable for integrated systems with strict space requirements. To further enhance performance, this paper employs the M-FOCUSS synthesis algorithm: which integrates the multiple measurement vectors (MMV) and the focal underdetermined system solver (FOCUSS): to sparsely optimize the array. This method reduces the number of slot elements by approximately 28% while preserving radiation performance, achieving a sidelobe level of approximately  $-18$  dB and maintaining favorable frequency scanning characteristics. The sparsification reduces the aperture area on the waveguide surface, increasing the power capacity by about 40%, which is significant for high-power applications. Experimental measurements show good agreement with full-wave simulation results, validating the effectiveness of the serpentine ridge waveguide structure in expanding the beam scanning range and the practical value of the M-FOCUSS sparse synthesis method. This design provides a new approach for achieving wide-angle frequency scanning and low sidelobe performance in waveguide slot antennas, while also demonstrating the potential of sparse arrays in enhancing power capacity and reducing manufacturing costs. It offers valuable insights for the development of next-generation high-performance scanning antennas.

**Key words:** waveguide slot antenna; ridge waveguide; frequency-scanning antenna; low sidelobe; sparse antenna

**Foundation Item(s):** National Natural Science Foundation of China (No.62431012, No.62271256, No.62025109, No.32261133623); Primary Research and Development Plan of Jiangsu Province (No.BE2022070); Fundamental Research Funds for the Nanjing University of Science and Technology (No.30922010703)

## 1 引言

漏波天线(Leaky-Wave Antennas, LWAs)是一种行波天线,其电磁波在沿天线结构传播时会持续产生辐射.由于天线内部电磁波呈行波状态,这类天线需要在终端连接匹配负载以消除反射波.此外,它的主瓣波束具有随频率变化的扫描特性.漏波天线可采用多种传输结构实现,例如基片集成波导(Substrate Integrated Waveguide, SIW)<sup>[1]</sup>、微带天线<sup>[2]</sup>以及波导缝隙天线等.

矩形波导缝隙阵列天线广泛应用于许多领域,例如雷达和无线或移动的通信系统,其需要高功率容量、低损耗和高增益性能<sup>[3]</sup>.包括在Ku波段采用宽边纵向缝隙天线用于合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)的研究,采用单脊结构,减小波导截面尺寸,实现宽扫描能力<sup>[4]</sup>.缝隙天线研发之初主要应用于军事中地面和机载雷达系统,用于目标探测和跟踪.后来的应用包括飞机和太空飞行器的遥感以及微波通信链路,带有缝隙的波导阵列的机载合成孔径雷达(SAR)阵列可用于天气预报、环境监测、气候变化研究等<sup>[5]</sup>.

本文天线采用的是对称单脊波导缝隙天线,通过对脊波导进行弯曲处理,并将脊边弯曲成“蛇”形的方式,顶端采用直角弯曲,并在弯折处采用倒角处理,下端采用曲边弯曲,形成慢波线结构<sup>[6]</sup>,辐射缝隙单元交替排布,天线采用一端波端口馈电,另一端匹配负载,因为这里用到的是行波天线.将脊波导弯曲处理是为了通过更方便地改变慢波线长度,从而改变每个缝隙

的相位差,增加扫描角度.

频率扫描天线原理是通过调整天线工作频率,改变天线阵元之间的相位差,从而影响阵因子的波束方向.根据方向图相乘原理,这一变化进一步作用于天线阵列,使其整体波束随频率调整而偏移,从而达到波束扫描的效果.在频率扫描天线中,例如矩形波导<sup>[7-9]</sup>、间隙脊波导<sup>[10]</sup>、平行板波导<sup>[11]</sup>和基片集成波导<sup>[12-16]</sup>,展示了频率扫描天线的辐射特性研究,为克服传统波导频率扫描范围有限的局限,本文设计将慢波结构应用于全金属脊波导,通过降低相速度以增强单频点的扫描能力.据此设计的“蛇”形波导缝隙天线,最终实现了更宽的角度扫描范围.

本文采用对称单脊波导缝隙阵列天线.该天线在脊波导的宽边或窄边刻蚀缝隙,缝隙厚度通常小于0.1倍波长,长度约为二分之一波长.其辐射特性由缝隙的位置、形状与方向共同决定.若在脊波导上开一定规则排列的缝隙,那么就构成脊波导缝隙阵列天线,其只需要控制这些缝隙的排列、形状等,就可以控制天线的口径分布<sup>[17]</sup>,脊波导缝隙天线的辐射机制源于缝隙对波导表面电流的截断.传输的电磁波使能量通过每个缝隙逐步向外辐射,导致波导内能量逐次递减,形成渐弱的行波.常见的阵列形式包括宽边偏置、宽边倾斜及窄边缝隙线阵<sup>[18]</sup>.

本文采用宽边偏置、交错排布的脊波导缝隙天线设计.该天线作为一行波阵,一端馈电,另一端接匹配

负载以吸收剩余功率. 其波束指向偏离法向, 并能随频率变化进行扫描, 构成一个频率扫描天线阵.

在上面提到的关于具有慢波结构的脊波导缝隙天线设计的基础上, 本文基于均匀波导缝隙阵列天线, 使用一种多测量向量 (Multiple Measurement Vectors, MMV) 欠定系统局灶解法 (FOCAL Underdetermined System Solver, FOCUSS) 对该天线进行稀疏重建处理. 该算法通过求最优将 36 阵元均匀阵列转化为 26 阵元的非均匀阵列, 在减少 28% 阵元的同时, 实现了  $\pm 30^\circ$  的扫描范围, 并将天线功率容量提升了近 40%.

## 2 “蛇”型脊波导缝隙阵列天线的设计与分析

### 2.1 “蛇”型脊波导缝隙阵列天线设计

通常设计的直脊波导频率扫描范围比较小, 本文通过将直脊波导缝隙阵列天线进行弯折为“蛇”型脊波导缝隙阵列天线, 采用非脊边弯折, 这种设计可以通过改变慢波长的长度从而改变缝隙间相位延迟从而增大天线扫描范围. 本节设计了一个 36 阵元的“蛇”型脊波导缝隙阵列天线, 结构图如图 1 所示.

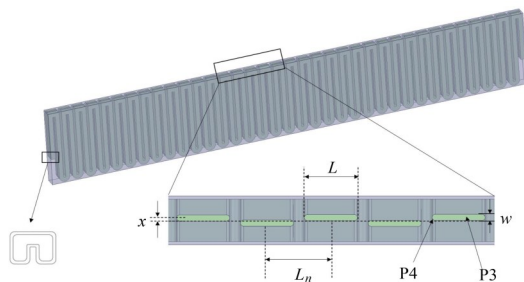


图 1 “蛇”型脊波导缝隙阵列天线模型图

图 1 为本文“蛇”型脊波导缝隙阵列天线的结构图, 天线工作频段在 14.4~15.6 GHz, 工作频率为 15.35 GHz. 内部弯曲部分为空气, 外部为金属外壳, 顶端开缝, 其中  $L$  为缝隙长度, 缝隙的长度  $L > \lambda_g/2$  或  $L < \lambda_g/2$ , 本设计选取  $L = 8.3 \text{ mm} (0.42\lambda)$ ;  $w$  为缝隙宽度,  $w = 1 \text{ mm}$ ,

$L_n$  为缝隙间距; 图 1 为均匀波导缝隙天线, 缝隙单元间距相等, 故取  $L_n = 10 \text{ mm} (0.5\lambda)$ ,  $x$  为缝隙偏离中心线距离, 在波导弯折部分, 采用倒角设计, 为避免脊波导弯折处或缝隙边缘因几何突变引起模式转换、反射及局部电场集中, 而采用圆弧过渡的精密加工手段; 其尺寸以毫米 (mm) 为单位, 通常指圆角半径  $R$ , 数值在 0.2~1.0 mm 量级, 兼顾可加工性与电磁性能. P1、P2、P3 为慢波线弯折部分倒角, P4 为缝隙倒角, 具体如图 2 所示.

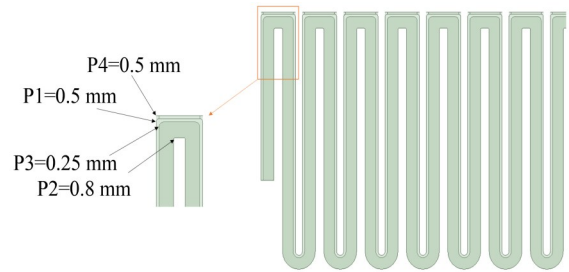


图 2 慢波线结构图

具体圆倒角最优尺寸如表 1 所示.

表 1 倒角参数表

单位: mm

P1	P2	P3	P4
0.5	0.8	0.25	0.5

我们可以通过调节慢波线长度从而改变缝隙间的相位差, 进而影响波束扫描角度, 对于缝隙单元间距  $d$ , 通常选取  $d > \lambda_g/2$  或  $d < \lambda_g/2$ , 当  $d < \lambda_g/2$  时, 波束向后进行扫描, 当  $d > \lambda_g/2$  时, 波束向前进行扫描, 但间距要控制好, 过大过小都会影响天线性能, 间距过小会引起单元间互耦, 间距过大会引起栅瓣. 缝隙间距  $d = \lambda_g/2$  时会让所有缝隙的反射与输入相位相加, 导致输入处的高 VSWR, 为了防止出现高副瓣, 需要满足:

$$d/\lambda < \frac{1.5}{1 + \lambda/\lambda_g} \quad (1)$$

由波导缝隙阵列天线理论可知, 脊波导宽边开纵缝可以用等效并联导纳来表示, 如图 3 所示.

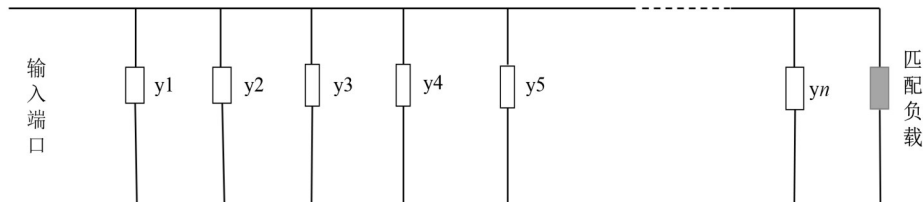


图 3 等效电路图

交替的缝隙偏移产生  $\pi/2$  的相位差, 对于行波阵而言, 其缝隙的偏移距离往往是不同的, 当脊波导上的缝隙偏移距离相同时可以认为缝隙处激励是没有幅度加

权的, 这样往往会导致副瓣过高, 一般会使用 Taylor (泰勒) 综合法或 Chebyshev (切比雪夫) 综合法对其天线进行低副瓣优化. 本文使用了 Taylor 综合法对缝隙进行

幅度加权,主要是使用 Taylor 综合法可以计算得到每个缝隙的归一化电流幅值,将归一化电流幅值与归一化电导值建立联系从而得到每个缝隙的归一化电导值,再使用 ANSYS Electronics Desktop 对脊波导缝隙天线完成电导参数的提取,将缝隙偏移中心线距离与归一化电导值联系起来构成电导函数,从而可以得到脊波导缝隙阵列天线在 Taylor 综合法的运用下实现幅度加权.可以算出缝隙偏移距离,36 阵元“蛇”形脊波导缝隙阵列天线偏移距离分布如表 2 所示.

表 2 缝隙偏移中心线距离

缝隙序号	偏移距离/mm	缝隙序号	偏移距离/mm
1	0.061	19	0.500
2	0.069	20	0.493
3	0.084	21	0.480
4	0.105	22	0.462
5	0.133	23	0.434
6	0.164	24	0.410
7	0.198	25	0.378
8	0.234	26	0.344
9	0.272	27	0.309
10	0.309	28	0.272
11	0.344	29	0.234
12	0.378	30	0.198
13	0.410	31	0.164
14	0.434	32	0.133
15	0.462	33	0.105
16	0.480	34	0.084
17	0.493	35	0.069
18	0.500	36	0.161

在上述设计中,“蛇”型脊波导缝隙天线实现频率扫描功能,扫描角度  $\pm 30^\circ$ ,扫描范围大于  $60^\circ$ ,在 15.6 GHz 时,波束指向  $30^\circ$ ,波束宽度  $3.6^\circ$ ,副瓣电平为  $-18$  dB,如图 4 所示.

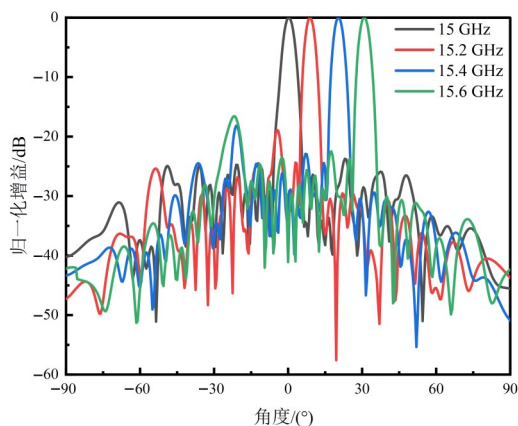


图 4 仿真得到的归一化增益的频率扫描结果

从图 4 可以看出,“蛇”型脊波导缝隙阵列天线具有较好的低副瓣频率扫描特性,在此基础上,下面提出一种基于 M-FOCUSS 稀疏重建算法,利用此算法对“蛇”型脊波导缝隙阵列天线进行稀疏重建,可在阵元减少的情况下实现低副瓣波束扫描,并且实现增大天线功率容量.

本文设计了一种“蛇”形慢波结构的全金属波导,慢波结构可降低电磁波在波导中传播的相速度<sup>[19]</sup>,慢波结构由于其等效传播相位常数大,对比传统直波导结构,能够实现更大角度的频扫.本文设计天线频率扫描可实现  $\pm 30^\circ$  的波束扫描范围.

## 2.2 “蛇”型脊波导缝隙阵列天线的稀疏设计

本节设计的稀疏重建的“蛇”型脊波导缝隙阵列天线是在 2.1 节的提出的“蛇”型脊波导缝隙阵列天线的基础上进行稀疏.本节采用一种欠定系统局灶解法的延伸算法对波导缝隙频率扫描天线阵的多波束方向图进行低副瓣优化,利用多测量向量(MMV)欠定局灶解法(M-FOCUSS)<sup>[20,21]</sup>得到性能更优的稀疏阵列.再基于 M-FOCUSS 算法对上文“蛇”型脊波导缝隙阵列天线进行稀疏,稀疏后波导尺寸不变,缝隙单元被稀疏,阵列稀疏会造成一些缝隙单元间距增大,从而会造成栅瓣的出现,通过使用 HFSS 进行参数扫描将天线性能控制到最优状态.M-FOCUSS 是 FOCUSS 综合算法与多测量向量(Multiple Measurement Vectors, MMVs)稀疏恢复理论结合,实现对线阵的稀疏,M-FOCUSS 主要原理是将稀疏问题等效为稀疏信号问题,将线阵均分为很多虚拟离散阵元,通过求最优解对阵元进行激励,未激励的单元部分就被稀疏掉,从而得到一个新的阵列,之所以选择 M-FOCUSS 稀疏算法是因为该算法是多波束稀疏阵列综合,能够更适用于本设计的波束频率扫描,更多细节参阅文献[20],本节能够实现同一个稀疏阵在不同扫描角度下的波束方向图.

本节利用 M-FOCUSS 综合法对 36 阵元“蛇”形脊波导缝隙阵列天线进行稀疏重建设计,得到一个 26 阵元的“蛇”形脊波导缝隙阵列天线,缝隙单元稀疏近 28%.M-FOCUSS 算法里单元幅值加权用到了 Taylor 综合法,利用 MATLAB 使用 M-FOCUSS 得到一组新的缝隙单元位置,如图 5 所示.

图 5 由 M-FOCUSS 计算出的稀疏单元排布,将稀疏前的天线按零点对称排布,每个单元对应一个位置,图中用波长表示,从而可以根据上图稀疏后缝隙单元位置从而可以算出相邻缝隙间距,然后只需改变单元间距来重新排布稀疏后的天线模型,用  $S_{jmn}$  表示缝隙间距,如表 3 所示.

由于用 M-FOCUSS 稀疏算法得到一个新的 26 阵元“蛇”型脊波导缝隙阵列天线,根据表 3 得出的缝隙间

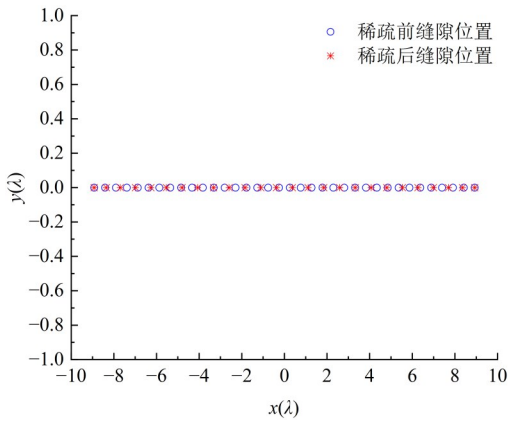


图5 稀疏阵元图

表3 缝隙间距

缝隙间距编号	缝隙间距/mm	缝隙间距编号	缝隙间距/mm
SJ <sub>01</sub>	11.14	SJ <sub>14</sub>	14.26
SJ <sub>02</sub>	12.89	SJ <sub>15</sub>	14.65
SJ <sub>03</sub>	13.77	SJ <sub>16</sub>	14.45
SJ <sub>04</sub>	14.16	SJ <sub>17</sub>	14.36
SJ <sub>05</sub>	14.26	SJ <sub>18</sub>	14.45
SJ <sub>06</sub>	14.36	SJ <sub>19</sub>	14.36
SJ <sub>07</sub>	14.36	SJ <sub>20</sub>	14.36
SJ <sub>08</sub>	14.45	SJ <sub>21</sub>	14.26
SJ <sub>09</sub>	14.36	SJ <sub>22</sub>	14.16
SJ <sub>10</sub>	14.45	SJ <sub>23</sub>	13.77
SJ <sub>11</sub>	14.65	SJ <sub>24</sub>	12.89
SJ <sub>12</sub>	14.26	SJ <sub>25</sub>	11.14
SJ <sub>13</sub>	14.45		

距,可以在HFSS软件里构建一个新的“蛇”型脊波导缝隙天线阵列,并且同时对慢波线长度与其信号传播的相位变量进行大量仿真优化,确定稀疏模型结构,可以看出,由于缝隙分布不均匀得到一个非均匀稀疏“蛇”型脊波导缝隙阵列天线,稀疏后的“蛇”型脊波导缝隙阵列天线如图6所示.



图6 稀疏天线模型

考虑到加工馈电情况,本设计将脊波导转为标准波导,再用WR-51标准波导转同轴进行馈电,其中波导转换采用了阶梯过渡结构进行转换,如图7所示.

从图7可以看出,在稀疏后的“蛇”型脊波导缝隙阵列天线的缝隙单元为非均匀排布,在天线尺寸不变,缝隙单元减少的情况下,缝隙间距增大,往往会导致随着频率的增大伴随栅瓣的出现,在本设计中,实现在±30°

扫描范围,且副瓣电平低于-18 dB,实现低副瓣角度扫描,天线工作在15 GHz在时的辐射方向图如图8所示.

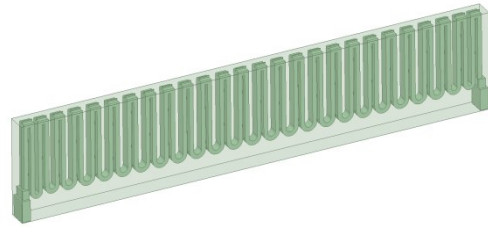


图7 脊波导转标准波导设计

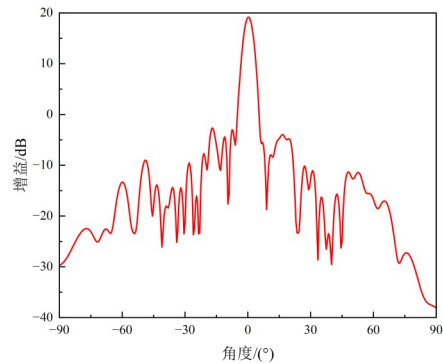


图8 单波束稀疏线阵法向辐射方向图

利用M-FOCUSS综合法稀疏后,再尽量减少阵元的数量来逼近均匀满阵分布的Taylor幅值加权的各个扫描角度的多波束理想方向图,图9为稀疏后的“蛇”型脊波导缝隙阵列天线在不同扫描角度之下的方向图.

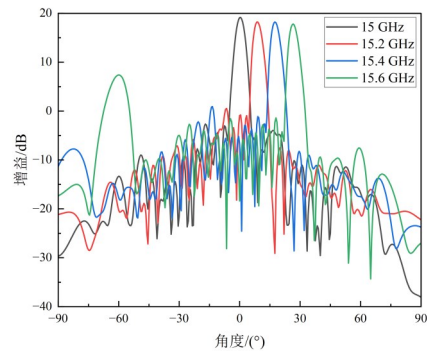


图9 稀疏天线频率扫描方向图

图9表示稀疏后的“蛇”型脊波导缝隙阵列天线在15~15.6 GHz的频率范围实现的扫描角度,分别对应扫描角度0°、10°、20°和30°.在15.6 GHz处副瓣上升,其主要原因由于对天线进行稀疏后缝隙单元间距增大,根据栅瓣公式,随着频率的增大,波长变小,扫描角度越大,副瓣上升更明显.

可以看出在阵列缝隙单元稀疏近28%后仍能实现低副瓣频率扫描,成功地将M-FOCUSS稀疏算法成功运用到“蛇”型脊波导缝隙阵列天线,波导缝隙阵列的稀

疏处理同时可以对波导天线的轻量化问题有着十分积极的影响,也是目前天线设计研究的热点.

此外,对“蛇”型脊波导缝隙阵列天线进行稀疏重建后,不仅实现低副瓣频率扫描,而且增大了天线的功率容量,其原理密集排列的缝隙天线单元存在较强的互耦,导致能量集中,易引发击穿或热损伤.稀疏后增大了单元间距,互耦减弱,电磁场分布更均匀,降低了局部电场强度,从而允许更高的输入功率而不发生击穿.稀疏后天线内部电场减小,其中功率容量计算公式如下:

$$P_d = \left( \frac{E_d}{E_{\max}} \right)^2 \times P_0 \quad (2)$$

其中,  $E_d$  为某种介质的击穿场强;  $E_{\max}$  为结构的最大电场;  $P_0$  为输入功率. 实际仿真时默认取 1 W 作为输入功率来观察电场,在真空条件下,金属的电场击穿阈值可达 70 MV/m. 其中稀疏前后天线辐射面电场强度如图 10 所示.

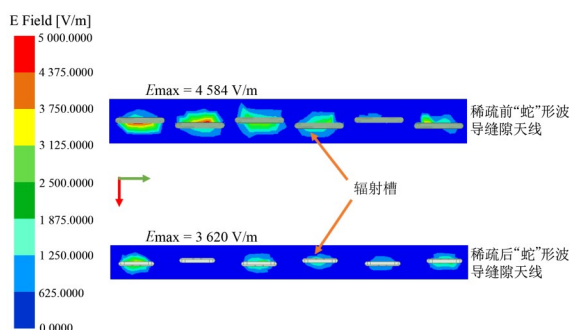


图 10 稀疏前后天线辐射面电场图

由图 10 可知稀疏前后天线最大电场分别为 4 584 V/m 和 3 620 V/m, 根据上文提到的功率容量计算公式可以求出稀疏前天线的功率容量为 233 MW, 稀疏后天线功率容量为 373 MW, 功率容量增大近 40%.

文献[22]中对矩形波导窄边斜缝天线进行了研究,发现功率容量受到缝隙宽度影响,槽宽越宽,槽周围的电场集中和增强越小;因此功率容量更高.文中重点讨论了影响功率容量的槽宽和辐射效率因素.结果表明,在确保天线目标辐射效率为 80% 的条件下,功率容量可达到 662 MW,此外还可以看出,随着目标辐射效率的增加,天线功率容量会降低.其合理的物理解释是因为辐射效率的增加意味着端口匹配负载吸收的能量更少,更多的能量被分配到各个槽,导致周围电场更强,最终导致击穿,从而降低功率容量.同时可以看出减小波导缝隙天线槽周围电场分布可以提高功率容量.增大天线的功率容量可以使其能够适应高功率应用的需求,提高信号的传输能力、系统的可靠性、抗干扰能力和通信效率,在雷达、通信、军事等多个领域有

重要意义.

综上,可以看出“蛇”型波导缝隙天线的稀疏排布具有改变天线内部电场并实现提升功率容量的优势,在相同口径下,稀疏排布减少了天线缝隙单元,并没有对天线性能造成影响,并且这种稀疏后的非均匀排布实现了低副瓣水平.

### 3 天线加工与测试

#### 3.1 加工分析

本文设计的稀疏蛇形脊波导缝隙天线采用了铝合金材质,并使用机械铣削和电火花的方式进行分层加工,将脊波导分为三层设计,然后进行螺钉固定,在端口部分设计了脊波导转同轴部分,并使用标准矩形波导转同轴的法兰进行后续测试馈电,其中分层加工模型如图 11 所示.经过后续加工,实物图如图 12 所示.

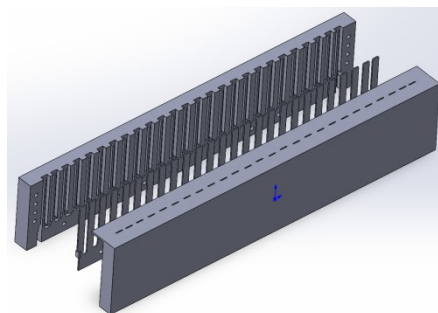
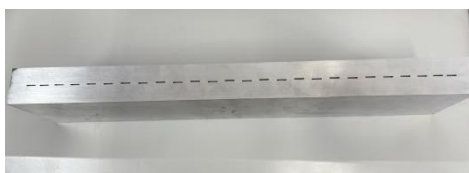


图 11 天线分层加工示意图



(a) 正视图



(b) 俯视图

图 12 加工天线实物图

#### 3.2 测试结果与分析

将波导两个端口采用 WR-51 矩形波导转同轴法兰,一端连接馈电,另一端使用匹配负载,进行矢量网络分析仪测试其天线的 S 参数,测试结果如图 13 所示.

图 13 通过矢量网络分析仪对加工天线进行测试,测试其天线 S 参数,将其与仿真的 S 参数进行比对,实

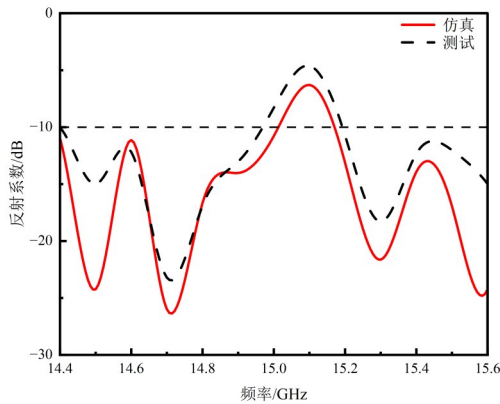


图 13 天线 S 参数

测反射系数曲线与仿真反射系数曲线趋势大致相同,实现工作频段内的阻抗匹配。

为了验证天线性能,将天线放在微波暗室环境中进行测试其频率扫描功能,在暗室测试环境中,通过给天线馈电,并转动转台,对面用喇叭天线进行接收信号,天线测试环境如图 14 所示。

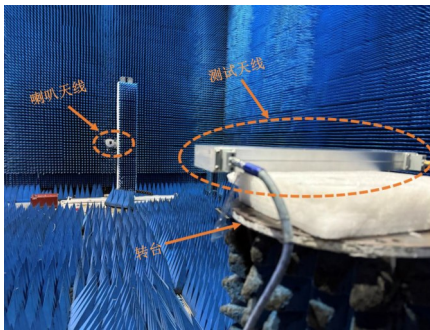
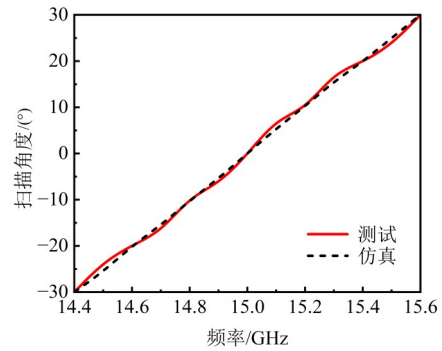


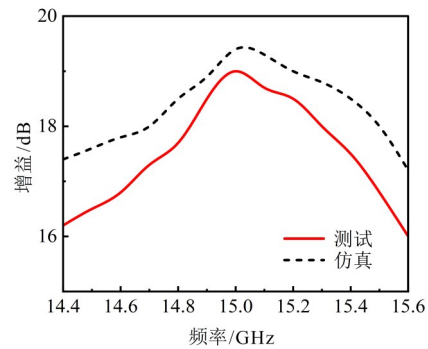
图 14 加工与测试

经过远场测试,本天线可以实现 $\pm 30^\circ$ 的扫描,为了更清楚地展示频率扫描过程,我们将波束指向与频率变化的关系绘制了梯度曲线图,如图 15(a)所示。可以看出本天线在频率从 14.4~15.6 GHz 增大的过程中,波束指向从 $-30^\circ \sim 30^\circ$ 的扫描过程。并且给出了天线实测增益曲线,可以看出实测法向时天线增益为 19.8 dB,将测试增益方向图与仿真方向增益图进行了对比,如图 15(b)所示。可以看出测试与仿真波束的频率扫描趋势基本符合。波束在 15 GHz 处为法向,增益最大,随着频率扫描会出现增益会略微下降。

天线归一化增益方向图的仿真与测试对比如图 16 所示。天线单元的测试与仿真结果基本吻合,验证了仿真的正确性,测试与仿真的差异主要来源于加工和组装误差,由于本文设计的全金属波导缝隙天线在加工时采用的铣削工艺对加工精度会有一点误差,其缝隙的间距和偏置都会影响到天线性能,但仍能满足指标要求。



(a) 波束扫描角度



(b) 天线增益随频率变化曲线

图 15 仿真和测量结果

从图 16 测试天线方向图可以看出,天线在 15~15.6 GHz 分别对应了扫描角度 $0^\circ$ 、 $10^\circ$ 、 $20^\circ$ 和 $30^\circ$ ,由此可以确定该天线能实现 $\pm 30^\circ$ 的频率扫描范围。从测试结果可以看出,当扫描角度为 $30^\circ$ 时,其副瓣电平相对于仿真上升大约 4 dB,扫描角度越大其副瓣电平上升越大,这可能与加工误差和暗室环境等一系列影响有关,从而导致误差的提升。表 4 将本文提出的“蛇”形波导缝隙频扫稀疏天线与其他同类型天线进行了对比,从表中可以看到,与参考文献对比,本设计“蛇”形波导缝隙天线与同类型天线相比在带宽更窄的情况下实现了更大的频率扫描角度。

## 4 结论

本文提出一种具有频率扫描功能的“蛇”型脊波导缝隙阵列天线,并且将 M-FOCUSS 综合法应用于该天线,对 36 阵元的“蛇”型脊波导缝隙阵列天线均匀线阵进行稀疏重建,得到 26 阵元的“蛇”型脊波导缝隙阵列天线非均匀线阵。稀疏后的“蛇”型脊波导缝隙阵列天线实现低副瓣频率扫描,同时增大功率容量,对后续的高功率天线设计有着很大的帮助,并且波导缝隙天线的稀疏优化同时对天线的轻量化设计有着很大帮助。本文将稀疏算法引入波导缝隙天线阵的设计,所提出的天线方案可广泛应用于雷达、通信、遥感和导航等系

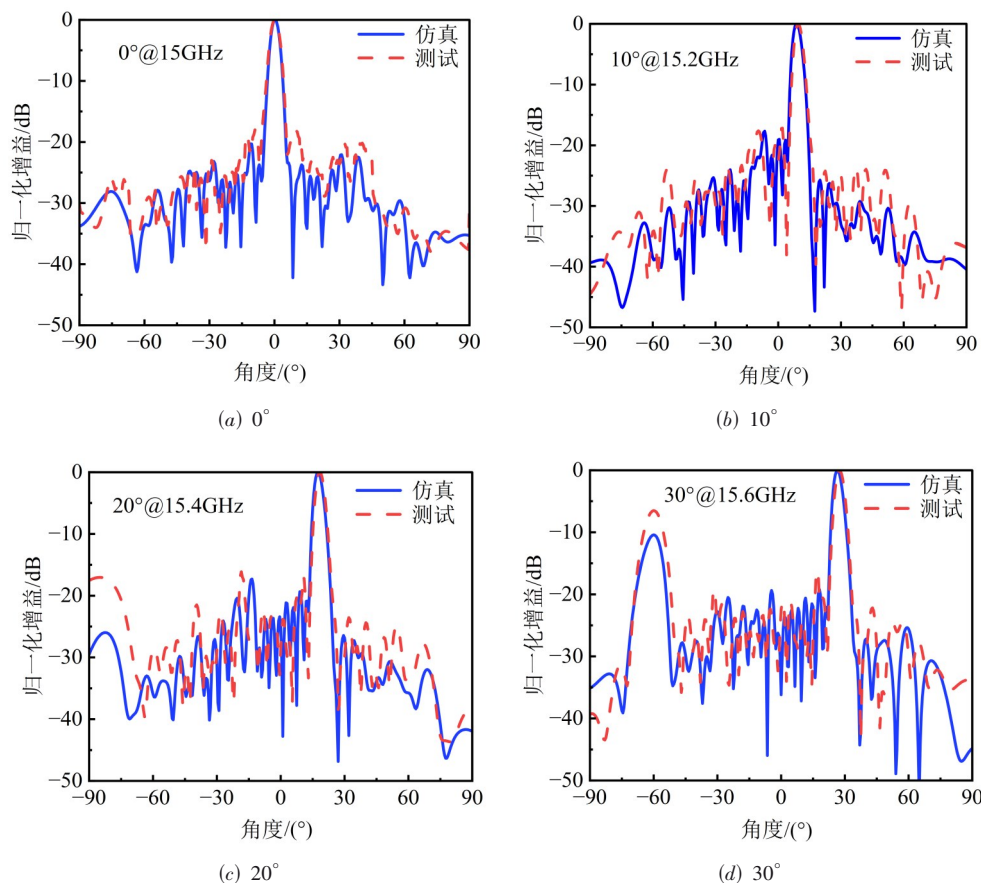


图 16 不同工作状态下的归一化方向图

表 4 本文天线与其他对比

对比文献	频率范围/ GHz	相对带 宽/%	扫描角度/(°)	增益/dBi	稀疏 率/%
文献[6]	9.7~10.3	6	-23~16	20	—
文献[18]	33.7~37.7	11	-21~-2.1	23.4	—
文献[23]	10.2~11.5	12	-4~18	—	—
文献[24]	12.5~16.0	25	-23~2	20.8	—
文献[25]	25.7~31.6	21	-17~17	24.3	—
本文	14.4~15.6	8	-30~30	19.8	28

统. 该波导缝隙阵列在系统中充当关键的无源元件, 其设计被认为是在成本与功能之间的一种有效折中. 此外, 波导结构本身具有屏蔽特性, 能保护接收电路免受外部微波辐射, 从而使系统获得良好的抗干扰性能.

#### 参考文献

[1] 黄文, 詹中杰, 陈肖. 基于慢波基片集成波导的小型化移相功分器[J]. 电子学报, 2024, 52(5): 1562-1569.  
HUANG W, ZHAN Z J, CHEN X. Miniaturized phase-shifting power divider based on slow-wave substrate integrated waveguide[J]. Acta Electronica Sinica, 2024, 52(5): 1562-1569. (in Chinese)

[2] WANG H H, CHEN P Y, SUN S. A microstrip leaky-wave antenna with scanning beams horizontal to the antenna plane[J]. Chinese Journal of Electronics, 2024, 33(5): 1218-1223.  
[3] KIM D J, LEE J H. Compact resonant slot array antenna using partial H-plane waveguide[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2010, 9: 530-533.  
[4] ZHAN Z X, XU T H, HU S S. A Ku-band broadband single-ridge waveguide slot antenna array for UAV SAR application[C]//2019 6th Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar. Piscataway: IEEE, 2020: 1-4.  
[5] MAGNUSSON P, DI SALVO M, SCARCHILLI C. A dual polarised slotted waveguide antenna for satellite based wind scatterometer instruments[C]//2013 7th European Conference on Antennas and Propagation. Piscataway: IEEE, 2013: 3565-3568.  
[6] YIN W S, CHEN A, LIANG X Y, et al. Frequency scanning single-ridge serpentine dual-slot-waveguide array antenna[J]. IEEE Access, 2020, 8: 77245-77254.  
[7] GENTILE G, JOVANOVIĆ V, PELK M J, et al. Silicon-filled rectangular waveguides and frequency scanning an-

- tennas for mm-wave integrated systems[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2013, 61(12): 5893-5901.
- [8] CULLENS E D, RANZANI L, VANHILLE K J, et al. Micro-fabricated 130-180 GHz frequency scanning waveguide arrays[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2012, 60(8): 3647-3653.
- [9] NAVARRO-TAPIA M, ESTEBAN J, CAMACHO-PENALOSA C. On the actual possibilities of applying the composite right/left-handed waveguide technology to slot array antennas[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2012, 60(5): 2183-2193.
- [10] SHARKAWY M AL, KISHK A A. Wideband beam-scanning circularly polarized inclined slots using ridge gap waveguide[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2014, 13: 1187-1190.
- [11] HOST N K, CHEN C C, VOLAKIS J L, et al. Ku-band traveling wave slot array scanned via positioning a dielectric plunger[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2015, 63(12): 5475-5483.
- [12] SÁNCHEZ-OLIVARES P, MASA-CAMPOS J L. Novel four cross slot radiator with tuning vias for circularly polarized SIW linear array[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2014, 62(4): 2271-2275.
- [13] CAO W Q, CHEN Z N, HONG W, et al. A beam scanning leaky-wave slot antenna with enhanced scanning angle range and flat gain characteristic using composite phase-shifting transmission line[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2014, 62(11): 5871-5875.
- [14] CHENG Y J, HONG W, WU K. Millimeter-wave half mode substrate integrated waveguide frequency scanning antenna with quadri-polarization[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2010, 58(6): 1848-1855.
- [15] BAYRAKTAR O, CIVI O A. Circumferential traveling wave slot array on cylindrical substrate integrated waveguide (CSIW) [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2014, 62(7): 3557-3566.
- [16] YANG X X, DI L Q, YU Y J, et al. Low-profile frequency-scanned antenna based on substrate integrated waveguide[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2017, 65(4): 2051-2056.
- [17] MORINI A, ROZZI T, VENANZONI G. On the analysis of slotted waveguide arrays[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2006, 54(7): 2016-2021.
- [18] 马得原, 李少甫, 唐家轩. 用于单脉冲的脊波导缝隙相频扫天线设计[J]. *电子元件与材料*, 2022, 41(3): 284-290.
- MA D Y, LI S F, TANG J X. Design of ridged waveguide slot phase-frequency sweep antenna for monopulse[J]. *Electronic Components and Materials*, 2022, 41(3): 284-290. (in Chinese)
- [19] 尹佳媛, 吴简, 邓敬亚, 等. 基于慢波基片集成波导的高增益连续扫描周期漏波天线[J]. *电子学报*, 2025, 53(3): 782-789.
- YIN J Y, WU J, DENG J Y, et al. Slow-wave SIW periodic leaky-wave antenna with increased gain and continuous beam scanning through broadside[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2025, 53(3): 782-789. (in Chinese)
- [20] 杨奇德. 基于稀疏重建方法的稀疏阵列天线综合[D]. 南京: 南京理工大学, 2018.
- YAND Q D. Sparse Array Antenna Synthesis Based on Sparse Reconstruction Method[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2018. (in Chinese)
- [21] COTTER S F, RAO B D, ENGAN K, et al. Sparse solutions to linear inverse problems with multiple measurement vectors[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2005, 53(7): 2477-2488.
- [22] HOU W S, YONG Y, YU Q. Study of traveling wave waveguide narrow slot array antenna based on high power capacity and high radiation efficiency[C]//2024 Joint International Vacuum Electronics Conference and International Vacuum Electron Sources Conference (IVEC + IVESC). Monterey: IEEE, 2024: 1-2.
- [23] ZHAO S N, DONG Y D. Circularly polarized beam-steering microstrip leaky-wave antenna based on coplanar polarizers[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2022, 21(11): 2259-2263.
- [24] YAO S S, CHENG Y J, WU Y F, et al. THz 2-D frequency scanning planar integrated array antenna with improved efficiency[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2021, 20(6): 983-987.
- [25] KLIONOVSKI K, LIAO H G, BANKOV S E, et al. A planar SIW-based mm-wave frequency-scanning slot antenna array with no scan blindness at normal[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2023, 71(1): 563-569.

## 作者简介



**李远航** 男,2000年5月出生于四川省达州市.现为南京理工大学微电子学院硕士研究生.主要研究方向为阵列天线设计.  
E-mail: 2252989811@qq.com



**顾鹏飞** 男,1990年11月出生于江苏省泰州市.现为南京理工大学微电子学院(集成电路学院)副教授.主要研究方向为计算电磁学、天线与阵列优化设计.中国电子学会会员编号: E190027633S.  
E-mail: pengfeigu@njust.edu.cn



**赵辉** 男,1996年6月出生于山东省德州市.现为南京理工大学电子工程与光电技术学院博士研究生.主要研究方向为天线阵列设计.  
E-mail: 1814914436@qq.com



**何姿** 女,1988年12月出生于河北省石家庄市.现为南京理工大学微电子学院(集成电路学院)教授、博士生导师.主要研究方向为计算电磁学及工程应用.获国家优秀青年基金,在国内外期刊发表学术论文90余篇.中国电子学会会员编号: E190023902S.  
E-mail: 15850554055@163.com



**樊振宏** 男,1978年2月出生于江苏省泰州市.现为南京理工大学微电子学院(集成电路学院)教授、博士生导师.主要研究方向为计算电磁学、天线与阵列优化设计.  
E-mail: zhfan@njust.edu.cn



**丁大志** 男,1979年1月出生于江苏省盐城市.现为南京理工大学微电子学院(集成电路学院)教授、博士生导师.主要研究方向为微波电路与天线、雷达成像与目标识别、电磁兼容分析与设计、目标电磁散射分析.中国电子学会会员编号: E190014223F.  
E-mail: dzding@njust.edu.cn