0254-6124/2019/39(5)-677–07 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

ZHANG Lifang, WANG Hongjian, LIU Yang. Design and analysis of a wide band leaky wave antenna based on fractal (in Chinese). *Chin. J. Space Sci.*, 2019, **39**(5): 677-683. DOI:10.11728/cjss2019.05.677

# 基于分形的宽带漏波天线研究

张立芳　王宏建　刘　洋

(中国科学院国家空间科学中心 微波遥感重点实验室　北京 100190)

(中国科学院大学　北京 100049)

**摘　要**　设计了一种新型的具有宽频带特性的微带平面漏波天线. 该天线由基片集成波导喇叭、抛物面结构和一组 30×10 单元的微带贴片阵列组成. 分析比较了普通贴片和分形结构贴片天线的带宽和辐射特性, 发现具有分形结构单元的天线具有更宽的频带和更好的辐射特性. 仿真结果表明, 采用 Minkowski 准分形结构贴片单元的漏波天线在 18∼22 GHz 内回波损耗都大于 10 dB, 带内增益可达 17 dB. 实测结果表明, 天线在 18∼22 GHz 内回波损耗大于 10 dB, 在 20 GHz 增益为 14 dB, 适合于卫星应用. 这为将其用作对地观测卫星数传天线提供了新的理论支撑. 该新型微带平面漏波天线具有高增益、宽频带、小体积、轻质量和波束扫描等优势, 可作为航天器天线的优选.

**关键词**　漏波天线, 分形, Minkowski 准分形, 宽带

**中图分类号**　V 443.4

# Design and Analysis of a Wide Band Leaky Wave Antenna Based on Fractal

ZHANG Lifang　WANG Hongjian　LIU Yang

(*Key Laboratory of Microwave Remote Sensing, National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190)

(*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049)

**Abstract**　A planar wide band Leaky Wave Antenna (LWA) is proposed in this paper. The antenna is composed of two substrate integrated waveguide horns, the paraboloid structure and a microstrip patch array with 30×10 units. In order to obtain wide bandwidth and high gain, a Minkowski quasi-fractal is properly designed in each unit cell of the patch array. A comparison between two different designs of conventional patch and fractal patch has been done.The simulated results indicate that the LWA with fractal patches has the impedance characteristics with a frequency bandwidth of 18∼22 GHz for input return loss more than 10 dB and a max gain of 17 dB at 20 GHz. The measured results show that the return loss of 18∼22 GHz is greater than 10 dB and the peak gain at 20 GHz is 14 dB. The antenna has the advantages of small size, easy integration, high gain, wide band and beam scanning. It can be widely used in data transmission antenna of satellite.

**Key words**　Leaky wave antenna, Fractal, Minkowski quasi-fractal, Wide band

2018-11-26 收到原稿, 2019-03-28 收到修定稿

E-mail: zhanglifang199504@163.com

# 0 引言

随着星上遥感器的增加, 星载数传天线成为近年来的研究热点. 星载数传天线按形式主要分为螺旋天线、波导缝隙阵列天线和赋形反射面天线等 [1]. 随着小卫星平台的应用, 体积小、易集成且具有高速传输和高覆盖率的天线是未来航天器天线发展的主要方向 [2]. 采用微带贴片阵列形式的平面漏波天线作为一种新型频率扫描天线, 除具有传统金属波导缝隙阵列天线的高增益和宽扫描范围等优势外, 还具有体积小、重量轻、易加工和易集成的优点, 在空间通信、遥感和对地探测等领域具有应用价值.

1940 年, Hansen 发明了漏波天线, 由于其良好的扫描能力和优异的方向性, 漏波天线被广泛应用于航天航空领域 [3]. 为了实现集成化和小型化, 采用微带贴片形式的漏波天线开始出现. 微带漏波天线自出现以来发展迅速, 其小体积和易集成满足现代通信设备对小型化和智能化的要求. 但是, 这类天线因为较大的回波损耗导致其频带较窄, 为了获得更高的传输速率及更多的信息容量, 需要解决其带宽问题 [4,5]. 分形技术为天线多样化和性能优化提供了可能性. 分形结构的自相似性使天线具有多个谐振点, 可以实现天线的宽带和多频特性.

另外, 分形天线的空间填充性使其具有小型化的优势, 可以减小阵列天线单元间的耦合、降低副瓣、增大天线的增益 [6]. 2017 年 Ma 等 [7] 提出了一种新型的基于高阻抗表面的漏波天线, 设计了由两个基片集成波导金属喇叭和周期性排列的矩形贴片组成的天线. 为了减小开阻带 (Open Stop-band) 效应, 在矩形贴片中增加了一个缝隙, 实现了天线在 16~22 GHz 变化时波束指向 $-36^\circ \sim +35.5^\circ$ 的连续扫描. Ma 等提出的天线结构新颖、集成容易、体积小、重量轻, 但是天线的带宽需要进一步优化.

本文提出了一种基于分形结构的新型平面漏波天线, 其采用 Minkowski 准分形结构取代前述设计中的矩形贴片单元. 该平面漏波天线是一种微带阵列天线, 采用分形结构贴片阵列的形式. 电磁仿真软件 HFSS 显示, 采取分形结构的漏波天线在 18~22 GHz 频段的回波损耗大于 10 dB, 增益可达 17 dB. 和传统波导缝隙阵列天线相比, 新型平面漏波天线在电性能上具有扫描角度大、增益较高、带宽较宽的优点, 适合用于星间链路数据传输. 此外, 采用分形结构有效降低了天线尺寸和质量, 近似二维的结构使天线适合与卫星舱板共形设计, 热变形分析结果显示该天线适合于星载温度交变环境. 研究结果对星载数传天线的预研和设计具有指导性意义.

# 1 天线原理

周期性漏波天线以慢波 ($\beta > k_0$) 为传输基本模式, 并通过周期性扰动激起无数次空间谐波, 其中谐波中的快波 ($\beta < k_0$) 对外辐射 [8].

漏波天线在导体中传播的 TM 模式表面波的波数为

$$k_p = \beta - j\alpha = k_0(\beta_{\rm s} - j\alpha_{\rm s}). \tag{1}$$

其中, $\beta_{\rm s}$ 为表面波相位常数, $k_0$ 为自由空间的波数, $\alpha_{\rm s}$ 为表面波衰减常数.

由于漏波天线结构的周期性, 会激起无穷多次谐波, 其中第 $n$ 次谐波的相位常数为

$$\beta_n = \beta + \frac{2\pi n}{p}. \tag{2}$$

第 $n$ 次谐波的波数为

$$k_n = k_0 + \frac{2\pi n}{p}. \tag{3}$$

其中, $p$ 为该结构的纵向周期. 虽然基次谐波 ($n = 0$) 是慢波, 但是第 $n = -1$ 次谐波通常是快波. $n = -1$ 次谐波的相位常数为

$$\beta_{-1} = \beta - \frac{2\pi}{p}. \tag{4}$$

只要在一定频率内满足恰当的几何条件, 就可以满足 $\beta_{-1} < k_0$, 形成快波 [9]. 因此, 周期性漏波天线一般是由第 $n = -1$ 次谐波向外泄露辐射能量的.

天线的辐射角可表示为

$$\cos\theta = \frac{\beta_{-1}}{k_0}. \tag{5}$$

$\beta_{-1} > 0$ 时表示前向扫描角, $\beta_{-1} < 0$ 时表示后向扫描角.

# 2 天线设计

## 2.1 结构设计

宽带漏波天线结构如图 1 所示. 该天线制作在罗杰斯 6010 基板上, 其相对介电常数为 10.2, 厚度

为 1.905 mm, 损耗因子为 0.0023. 整个天线的尺寸为 233 mm×73 mm×1.905 mm ($L$ = 233 mm, $W$ = 73 mm, $H$ = 1.905 mm). 天线分成馈电、补偿系统和辐射三个部分 [7]. 信号由端口 1 (port 1) 馈入, 通过基片集成波导喇叭馈电结构发射到抛物面上, 经过抛物面反射, 再通过辐射贴片辐射出去. 右侧基片集成波导喇叭对称, 有效减少了纵向辐射效应.

如图 1(b) 所示, 馈电部分采用基片集成波导 (SIW) 技术, 正面为喇叭形金属贴片, 这有利于天线平面的集成化和阻抗匹配. 金属喇叭具有方向性好、结构简单等优点. 结合基片集成波导技术, 使整个天线具有低剖面、低成本等显著优势. 如图 1(c) 所示, 在馈电部分设计渐变的微带匹配电路. 结构的渐变型允许天线从一个频率的谐振模式平缓过渡到另一个频率谐振模式. 这确保了天线在宽频带内实现良好的阻抗匹配 [10]. 馈电部分左上方是一个抛物面形状的补偿馈电系统, 该系统结构由金属抛物面嵌入基底, 然后挖空, 再在抛物面四周镀铜. 这是因为考虑到馈电系统为基片集成波导喇叭天线, 而喇叭张角会造成喇叭天线口径上相位不一致. 因此采用抛物面实现相位补偿, 从而产生相位均匀的能量. 如图 1(d) 所示, 辐射部分由 300 个矩形金属贴片周期性排列构成. 每个金属贴片都采用 Minkowski 准分形结构. 为了实现高增益以及保证反射的能量较少, 采用 30 组周期性横向排列的漏波结构, 每组 10 个矩形贴片.

图 2(a) 给出了分形贴片和普通贴片结构, 单元尺寸为 5 mm×2.5 mm. 普通的贴片单元是长 5 mm、宽 2.5 mm 的矩形, 如图 2(b) 所示. 分形贴片单元采

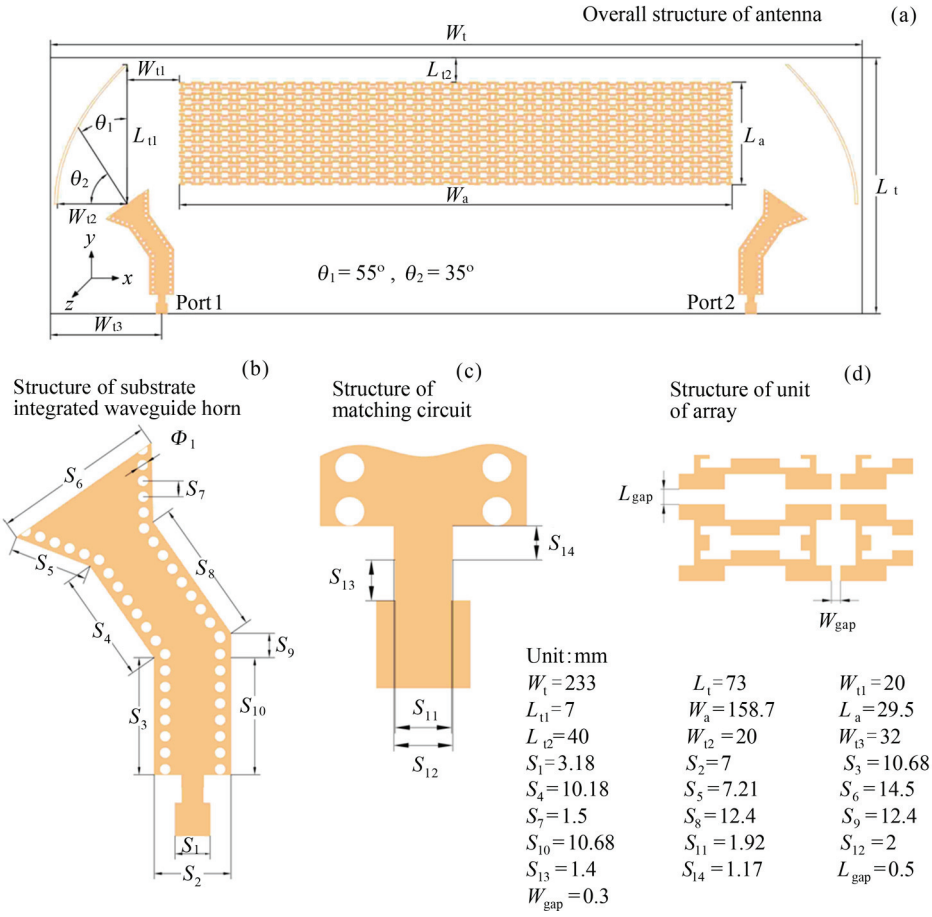



图 1 宽带漏波天线的结构

Fig. 1 Configuration of the proposed wide band HIS leaky wave antenna

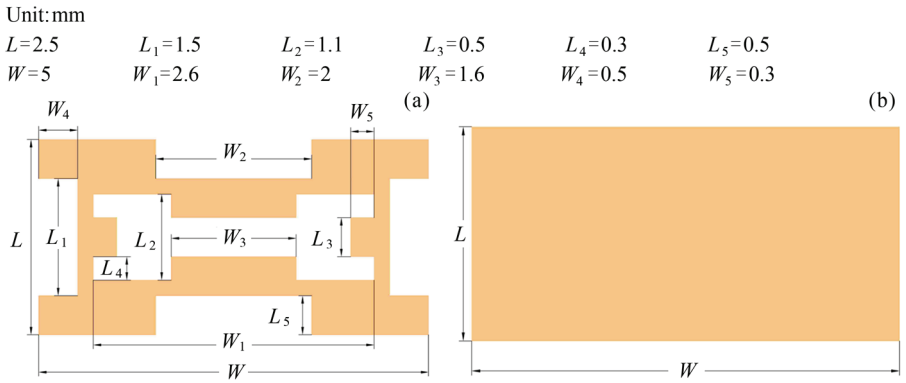



图 2 分形贴片和普通贴片结构

Fig. 2 Top view of unit cell of fractal and conventional structure

用 Minkowski 准分形结构. Minkowski 分形环的具体尺寸为：外环长边边长 $W$, 长边凹陷部分长 $W_2$, 长边凹陷部分宽 $L_5$; 外环宽边边长 $L$, 宽边凹陷部分长 $L_1$, 宽边凹陷部分宽 $W_4$. 内环长边边长 $W_1$, 长边凹陷部分长 $W_3$, 长边凹陷部分宽 $L_4$; 内环宽边边长 $L_2$, 宽边凹陷部分长 $L_3$, 宽边凹陷部分宽 $W_5$. 与传统的 Minkowski 分形结构不同的是, 环中间的间隙部分为金属贴片.

### 2.2 仿真结果与分析

根据以上分析, 利用 HFSS 软件进行仿真优化, 最终确定阵列单元的横向间距 $W_{\mathrm{gap}}$ 为 0.3 mm, 纵向间距 $L_{\mathrm{gap}}$ 为 0.5 mm; 横向周期 $p_{\mathrm{h}}$ 为 30, 纵向周期 $p_{\mathrm{v}}$ 为 10; 辐射贴片阵列总长度为 159 mm, 总宽度为 30 mm. 引入相同尺寸的采用普通矩形贴片结构的漏波天线, 通过仿真比较两者的辐射特性. 图 3 为采用不同贴片结构的同一平面阵列漏波天线参数 $S$ 的对比. 采用普通矩形结构时, 该天线在 18~22 GHz 频段范围内反射系数最大可达 −5 dB, −10 dB 带宽约为 19.2~21.5 GHz. 采用分形结构天线时, 该天线在 18~22 GHz 频带的反射系数低于 −10 dB, 相对带宽约为 20%, 带宽增加了 1.7 GHz. 另外, 通过对比可以发现, 采用分形结构后, $S_{21}$ 在 18~22 GHz 频段内普遍低于采用普通矩形结构的漏波天线, 天线能量能够很好地辐射出去.

图 4 显示了两种贴片结构漏波天线的天线峰值增益的比较. 由图 4 可以看出, 采用分形结构降低阵元之间的互耦效应, 因此峰值增益增加了 3 dB, 同时

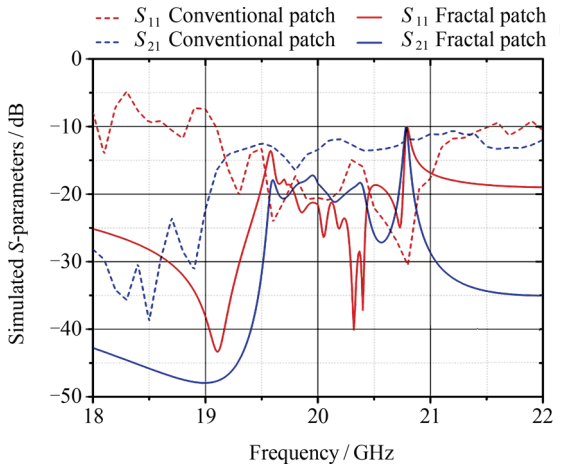



图 3 分形贴片与普通贴片漏波天线的 $S$ 参数仿真曲线

Fig. 3 Simulated $S$-parameters of conventional and fractal patch

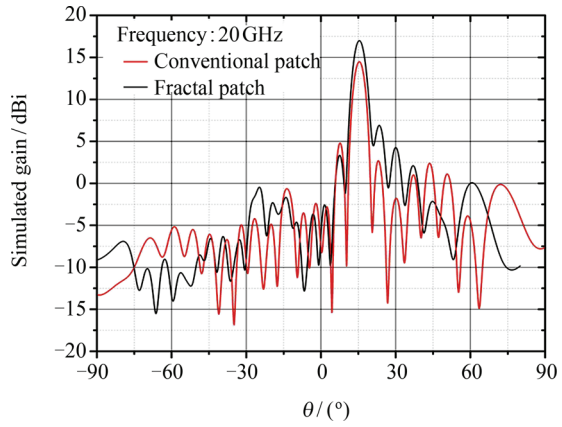



图 4 分形贴片与普通贴片的漏波天线方向图

Fig. 4 Simulated gain of conventional and fractal patch

副瓣电平也有所减小. 在 20G Hz 频率下, 采用普通贴片结构的漏波天线增益仅为 14 dB, 采用分形结构的天线增益为 17 dB.

### 2.3 星载环境对天线性能的影响

星载环境下冷热变形会引起天线电性能下降 [11]. 由于星载环境很难真实模拟, 这里采用全波分析软件 HFSS, 模拟阵列天线发生单元偏移和阵面错位两种形变情况下热变形特性.

#### 2.3.1 单元偏移对天线性能的影响

假设天线阵列单元同时发生偏移, 且偏移量为 0.5 mm. 在 HFSS 中模拟单元偏移对天线增益和副瓣的影响, 结果如图 5 所示.

天线单元位置偏移对天线增益和副瓣性能的影响见表 1. 由表 1 可以看出, 天线增益的变化幅度在 0.5 dB 以内, 相对于 17 dB 的最大增益, 变化幅度较小, 即天线增益对单元偏移的敏感度较弱.

#### 2.3.2 阵面错位对天线性能的影响

假设天线沿中线左右两半发生错位, 且错位偏移量为 0.5 mm, 天线阵面错位对天线增益和副瓣的影响如图 6 和表 2 所示

由表 2 可以看出, 发生错位形变后, 天线增益减小了 0.7 dB 左右, 副瓣也有变化, 最大减小了约 1.5 dB, 即其对副瓣的影响更大. 但是相对整体的增益来说, 变化较小.

通过模拟天线单元偏移和阵面错位两种情况下的天线增益和副瓣的变化可知, 天线在受热变形的条件下电性能变化不大, 抗热变形能力较强, 非常适合于星载环境中使用.

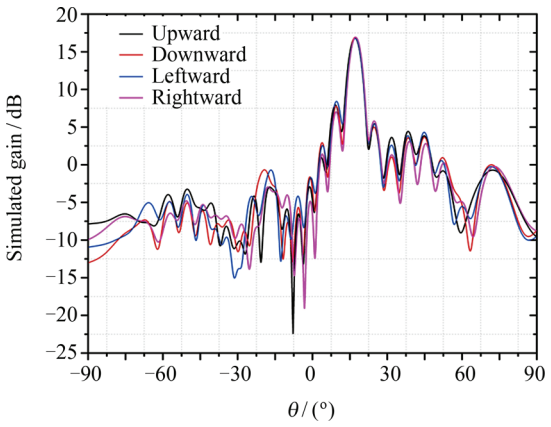



图 5 单元偏移时的天线方向图

Fig. 5 Simulated gain of antenna with different patch offset

表 1 不同单元偏移下天线性能

Table 1 Performance of antenna with different offset

| 形变情况 | 增益/dB | 副瓣/dB |
|---|---|---|
| 正常情况 | 17.13 | 7.97 |
| 向上偏移 0.5 mm | 16.79 | 7.93 |
| 向下偏移 0.5 mm | 16.91 | 7.78 |
| 向左偏移 0.5 mm | 16.71 | 8.42 |
| 向右偏移 0.5 mm | 16.99 | 7.27 |

## 3 测试结果分析

基于前述设计参数, 加工了一个采用分形结构的宽带漏波天线进行验证, 天线实物如图 7 所示. 在实际测试中, 右端口连接到 50 Ω 匹配负载. 使用矢量网络分析仪测试漏波天线的 $S$ 参数, 并完成调试工作, 天线的 $S$ 参数实测结果如图 8 所示. 在天线近场测试系统中测试天线辐射特性, 实测结果见图 9~11.

图 8 给出了漏波天线 $S_{11}$ 仿真结果与实测结果的对比. 由图 8 可以看出: 在 18~22 GHz 带宽内, 实

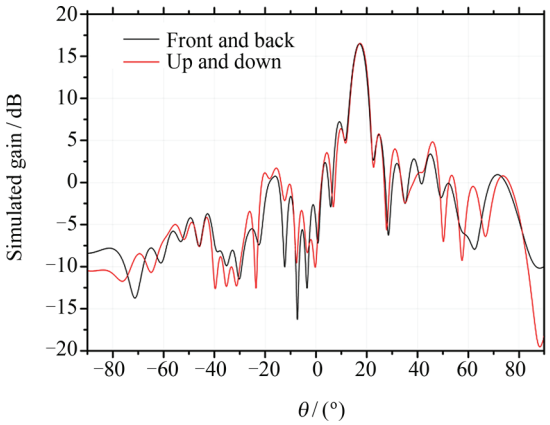



图 6 阵面错位时的天线方向图

Fig. 6 Simulated gain of antenna with dislocation

表 2 阵面错位时的天线性能

Table 2 Performance of antenna with dislocation

| 形变情况 | 增益/dB | 副瓣/dB |
|---|---|---|
| 正常情况 | 17.13 | 7.97 |
| 前后错位 | 16.46 | 7.21 |
| 上下错位 | 16.53 | 6.35 |

实测的 $S_{11}$ 均在 −10 dB 以下, 带宽为 4 GHz; 实测的 $S_{11}$ 在 18.5 GHz 和 21.5 GHz 处存在两个最低点, 这是因为分形结构在改善带宽的同时也带来了多频特性; 实测结果与仿真结果的变化趋势比较吻合, 两者存在的偏差主要是由于馈源部分同轴线的焊接以及天线材料的不均匀性等因素造成的. 天线带宽满足要求, 充分验证了该宽带设计方法的有效性.

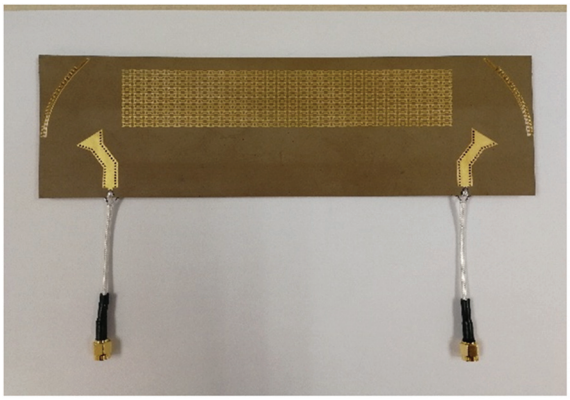


图 7 天线加工实物

Fig. 7 Photograph of fabricated antenna

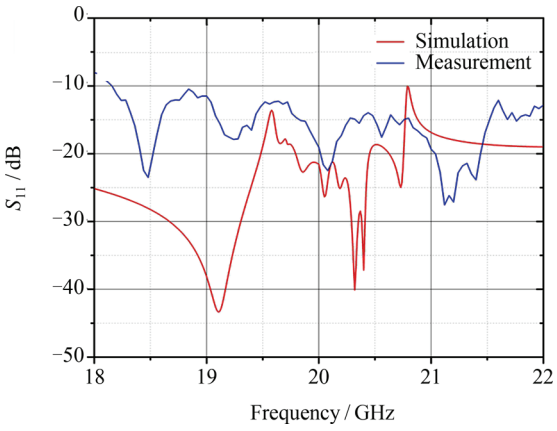



图 8 天线的 $S_{11}$ 参数测试与仿真曲线

Fig. 8 Measured and simulated $S$-parameters

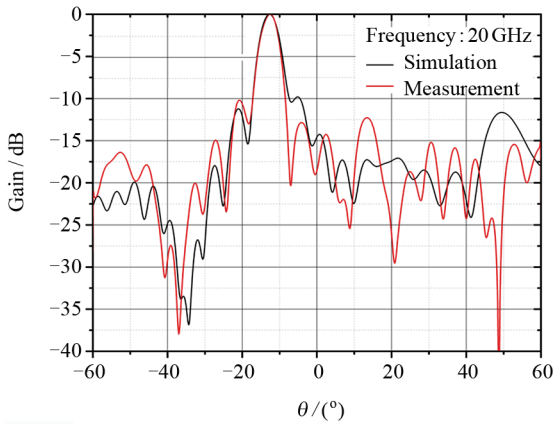



图 9 天线归一化方向图

Fig. 9 Normalized measured and simulated antenna gain

图 9 给出了归一化方向图的仿真结果与实测结果. 由图 9 可以看出, 实测天线副瓣电平为 −10 dB, 副瓣抑制较好, 同时主波束对称性表现良好, 最大增益约为 14 dB, 比仿真结果低 3 dB. 考虑实际测试误差的影响, 测试结果仍然满足实际需求. 总的来说, 实测结果和仿真结果一致.

图 10 给出了漏波天线的归一化扫描角度仿真曲

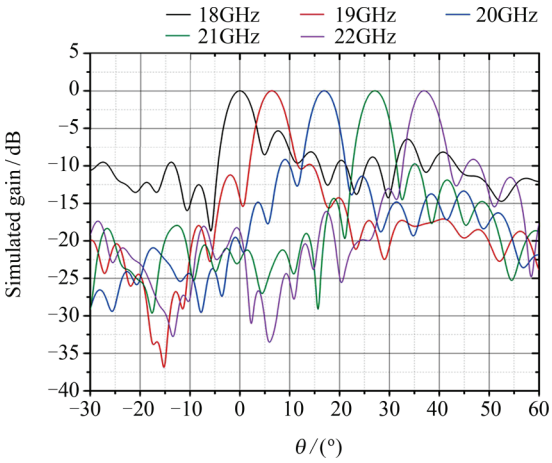



图 10 天线归一化扫描角度仿真曲线

Fig. 10 Normalized simulated forward beams in the $xz$ plane for the proposed antenna

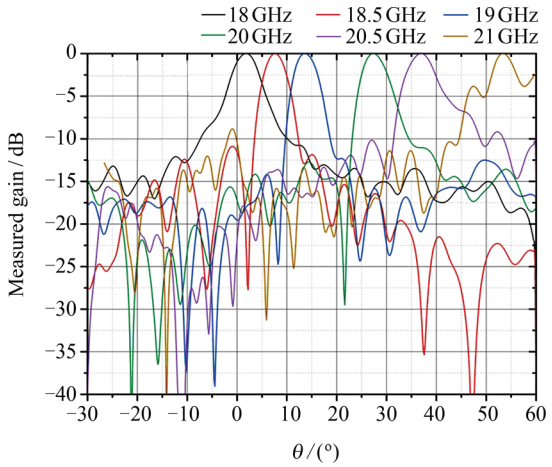



图 11 天线归一化扫描角度测试曲线

Fig. 11 Normalized measured forward beams in the $xz$ plane for the proposed antenna

线, 图 11 给出了实测曲线. 由图 10 和图 11 可以看出, 在 18~22 GHz 频率范围内, 测量得到的天线正向扫描角度范围为 0~40°, 与仿真结果一致.

测试结果说明, 加工后天线的 10 dB 带宽为 18~22 GHz, 增益达 14 dB, 副瓣电平小于 −10 dB, 实测结果和仿真结果比较符合. 仿真结果和实测结果之间差异的原因如下: 一方面, 介质材料的介电常数为 10.2, 这是相对较高的, 在实际应用中, 采用的是相同介电常数的国产材料作为替代, 材料的不均匀性和制造公差会引起结果的差异; 另一方面, 微带线馈电部分和 SMA 接头通过同轴线焊接来连接, SIW 匹配的微带线部分较窄, 焊接时的焊接工艺及高频下同轴线的损耗均对实测结果有影响.

## 4 结论

提出了一种新型基于分形的高阻抗表面漏波天线, 设计的阵列单元为 Minkowski 准分形结构. 仿真结果表明, 与引入分形结构之前相比, 天线在 18~22 GHz 工作频带内具有更宽的带宽和更高的增益, 回波损耗小于 −10 dB, 最大增益达到 17 dB, 且易于阻抗匹配和平面集成, 满足星载数传天线的未来需求. 该微带贴片漏波天线在模拟热变形分析中的仿真结果表明, 在单元偏移的情况下, 天线的增益变化量在 0.7 dB 以内, 副瓣减小量在 1.5 dB 以内, 即天线表现出较好的抗热变形能力, 适合应用于星载环境. 此外, 该微带贴片漏波天线具有 40° 的前向扫描能力和体积小、质量轻及增益较大的优点, 在要求高速传输和高覆盖率的对地探测卫星中, 尤其是小卫星平台上具有一定的应用价值.

## 参考文献


[1] YE Yunchang. New waveguide array combined antenna for remote sensing satellite data transmission [J]. *Acta Astronaut. Sin.*, 2003, **24**(6): 555-562 (叶云裳. 用于遥感卫星数传的新型波导阵列组合天线 [J]. 宇航学报, 2003, **24**(6): 555-562)

[2] YE Yunchang. Technical progress of remote sensing satellite data transmission antenna in China [C]//Proceedings of 2004 academic symposium of general professional committee of aircraft of Chinese astronautical society (Volume ii). Sanya: China academy of space technology, 2005: 973-981 (叶云裳. 我国遥感卫星数传天线的技术进展 [C]//中国宇航学会飞行器总体专业委员会 2004 年学术研讨会论文集 (下册). 三亚: 中国空间技术研究院, 2005: 973-981)

[3] JACKSON D R, CALOZ C, ITOH T. Leaky-wave antennas [J]. *Proc. IEEE*, 2012, **100**(7): 2194-2206

[4] GAN Yuchen. Design and simulation of broadband leakage antenna based on substrate integrated ridge waveguide [J]. *Vac. Electron. Technol.*, 2017, **3**: 32-36 (甘雨辰. 基于基片集成脊波导的宽带漏波天线的设计与仿真 [J]. 真空电子技术, 2017, **3**: 32-36)

[5] YAN N, MA K, ZHANG H, *et al.* A novel substrate integrated suspended line wideband leaky-wave antenna [J]. *IEEE Ant. Wireless Propag. Lett.*, 2017, **99**: 1-1

[6] LI Daotie. Research on Fractal Antenna Technology and Design [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2014 (李道铁. 分形天线技术与设计研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2014)

[7] MA Z, CHAN C H, NG K B, *et al.* A collimated surface-wave-excited high-impedance surface leaky-wave antenna [J]. *IEEE Ant. Wireless Propag. Lett.*, 2017, **99**: 1

[8] XU Xinsen. Research on New Substrate Integrated Waveguide Leakage Antenna [D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2017 (徐心森. 新型基片集成波导漏波天线的研究 [D]. 南京: 南京邮电大学, 2017)

[9] CAI Yang, ZHANG Yingsong, CAO Wenquan, *et al.* Leakage antenna fed by planar substrate integrated waveguide horn [J]. *Acta Microw. Sin.*, 2016(S1): 174-176 (蔡洋, 张颖松, 曹文权, 等. 一种平面基片集成波导喇叭馈电的漏波天线 [J]. 微波学报, 2016(S1): 174-176)

[10] FU Bing. A New Horn Antenna Based on Substrate Integrated Waveguide [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2006 (符兵. 基于衬底集成波导的新型喇叭天线 [D]. 南京: 南京理工大学, 2006)

[11] LIU Shihua, WANG Hongjian, HAO Qiyan, *et al.* Large space-borne Ku band gap array antenna — broadband design and thermal deformation analysis [J]. *J. Space Sci.*, 2013, **33**(2): 207-212 (刘世华, 王宏建, 郝齐焱, 等. 大型星载 Ku 波段波导缝隙阵列天线 — 宽频带设计及热变形分析 [J]. 空间科学学报, 2013, **33**(2): 207-212)