

# Design of a Dual-Frequency and Dual-Mode Vortex Microstrip Array Antenna

Pengrong Mao\*, Canguan Gao#

College of Electronics and Information Engineering, Yili Normal University, Yining Xinjiang  
Email: 1316861633@qq.com, #1514513050@qq.com

Received: Jul. 28<sup>th</sup>, 2019; accepted: Aug. 19<sup>th</sup>, 2019; published: Aug. 26<sup>th</sup>, 2019

---

## Abstract

In order to improve communication capacity and spectrum utilization, a design scheme of dual-frequency and dual-mode vortex microstrip array antenna is proposed based on frequency division multiplexing theory. The antenna is composed of circular microstrip patches with rectangular grooves, and 8 arrays with the same structure are distributed in a concentric circle through the feed network. The optimal structure of the antenna is determined and a real object is made by combining 3D electromagnetic field simulation software modeling, optimization unit patch and feed size. The results show that the microstrip array antenna has good impedance matching when the center frequency is 7.3 GHz and 8.5 GHz respectively. At the same time, it is found that the spiral electromagnetic waves generated by the array antenna at different resonance points rotate in opposite directions. This design provides a design idea for dual-frequency microstrip array antenna to generate different modes of vortex electromagnetic waves.

## Keywords

Orbital Angular Momentum, Circular Patch, Microstrip Array Antenna, Slot, Dual Frequency, Dual Mode

---

# 一种双频双模式涡旋微带阵列天线的设计

毛鹏荣\*, 郜参观#

伊犁师范大学, 电子与信息工程学院, 新疆 伊宁  
Email: 1316861633@qq.com, #1514513050@qq.com

收稿日期: 2019年7月28日; 录用日期: 2019年8月19日; 发布日期: 2019年8月26日

---

\*第一作者。

#通讯作者。

## 摘要

为进一步提升通信容量和频谱利用率, 以频分复用理论为基础提出了一种双频双模式涡旋微带阵列天线的设计方案。天线以矩形开槽的圆形微带贴片为单元, 将8个结构相同的阵元通过馈电网络连接分布在一个同心圆面上。结合三维电磁场仿真软件建模、优化单元贴片及馈线尺寸确定了天线最优结构并制作了实物。结果表明, 在中心频率分别为7.3 GHz和8.5 GHz时, 微带阵列天线获得了良好的阻抗匹配。同时发现, 阵列天线在不同谐振点处产生的螺旋状电磁波旋向相反。该设计为实现双频微带阵列天线产生不同模式的涡旋电磁波提供了设计思路。

## 关键词

轨道角动量, 圆形贴片, 微带阵列天线, 开槽, 双频, 双模式

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

## 1. 引言

随着通信技术的迅速发展, 更高通信速率的需求与频谱资源日益紧缺的现状亟需新的技术来增加无线通信信道容量。轨道角动量(Orbital Angular Momentum, OAM)作为一种新的复用方式可以在不增加带宽的情况下, 极大地扩充系统容量进而提高频谱利用率[1] [2]。2007年, Thide 等人首次证实了利用 OAM 技术可以在无线电磁波传输领域开发频谱资源丰富的雷达通信和无线通信的方法[3], 这也使得利用 OAM 涡旋电磁波天线进行无线电通信的方式成为当下国内外专家学者研究的热点。

迄今为止, 在微波频段产生携带 OAM 涡旋电磁波束的方法主要有螺旋抛物面结构[4] [5]和圆形阵列天线[6] [7]。为了产生高质量的涡旋电磁波, 文献[8]采用一种螺母型辐射贴片, 通过控制馈电点位置实现了一种单频双模式的涡旋电磁波, 但是由于贴片馈电点的位置相对于对称轴不对称, 天线的增益结果不太理想。文献[9]利用电磁仿真软件设计了一种以矩形贴片为天线单元的圆形天线阵列, 比较了不同阵元数目对阵列天线辐射出的电磁波涡旋性能的影响, 但未对天线如何实现不同的馈电相位激励提出具体的实物设计方案。文献[10]采用小尺寸的半圆型开槽贴片单元, 实现了在特定频率中心产生 OAM 波束的电磁阵列天线, 而并未结合馈电网络对多模式涡旋电磁波阵列天线进行分析设计。因此, 在微波传输领域结合馈电网络构造技术设计出携带不同 OAM 模式涡旋电磁波并同时工作于不同频段的微带阵列天线具有一定的意义和参考价值。

本文以矩形开槽的圆形微带贴片为单元, 将 8 个结构相同的阵元通过馈电网络连接分布在一个同心圆面上, 结合曲流法和馈电网络构造技术使各个贴片阵元同时获得不同的相位激励。通过三维电磁场仿真软件建模、优化单元贴片及馈线尺寸很好地解决了微带天线带宽较窄的问题。该天线能够同时在 C 波段和 X 波段工作并在中心频率分别为 7.3 GHz 和 8.5 GHz 处产生两种不同模式的涡旋电磁波。

## 2. 天线结构设计

本文从圆形单元贴片入手研究其微带阵列天线的辐射特性,  $TM_{nm}$  模的圆形微带贴片半径由下式计算[11]

$$a = \frac{K_{nm} C}{2\pi f_r \sqrt{\epsilon_r}} \quad (1)$$

式中,  $K_{nm}$  是  $n$  阶 Bessel 函数的倒数第  $m$  个零点, 当天线工作于  $TM_{11}$  模式时,  $K_{nm} = 1.841$ 。  $C$  为电磁波在自由空间中传播的速度,  $\epsilon_r$  为介质板相对介电常数,  $f_r$  为天线工作频率。当天线工作于较高频段时, 介质板厚度对天线性能会产生较大的影响, 贴片的半径等效为

$$a_e = a \left[ 1 + \frac{2h}{\pi a \epsilon_r} \left( \ln \frac{\pi a}{2h} + 1.7726 \right) \right]^{1/2} \quad (2)$$

式中  $h$  为介质板厚度, 设计中选用材质为玻璃纤维环氧树脂的基板, 稳定性较高, 成本较低。

图 1 为本设计的单元贴片天线,  $r$  表示贴片单元半径。图中在圆形微带贴片表面开出矩形槽,  $d$  表示开槽深度,  $w$  表示开槽宽度, 通过优化槽的位置和开槽尺寸等参数使得天线产生不同频段的谐振频率, 当不同谐振频率和各频段中心频率相接近时就扩展了微带天线的带宽[12]。

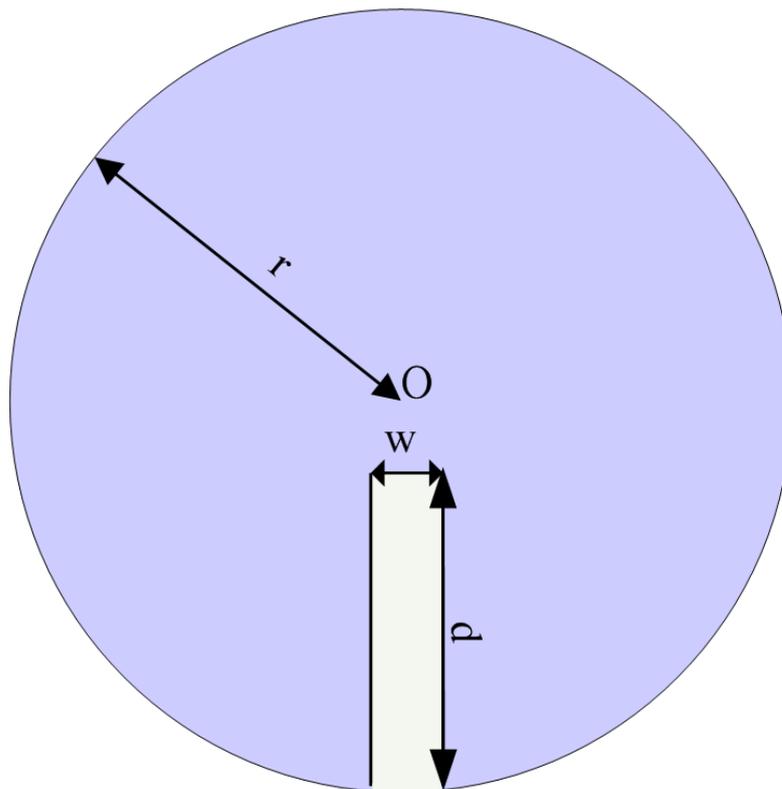
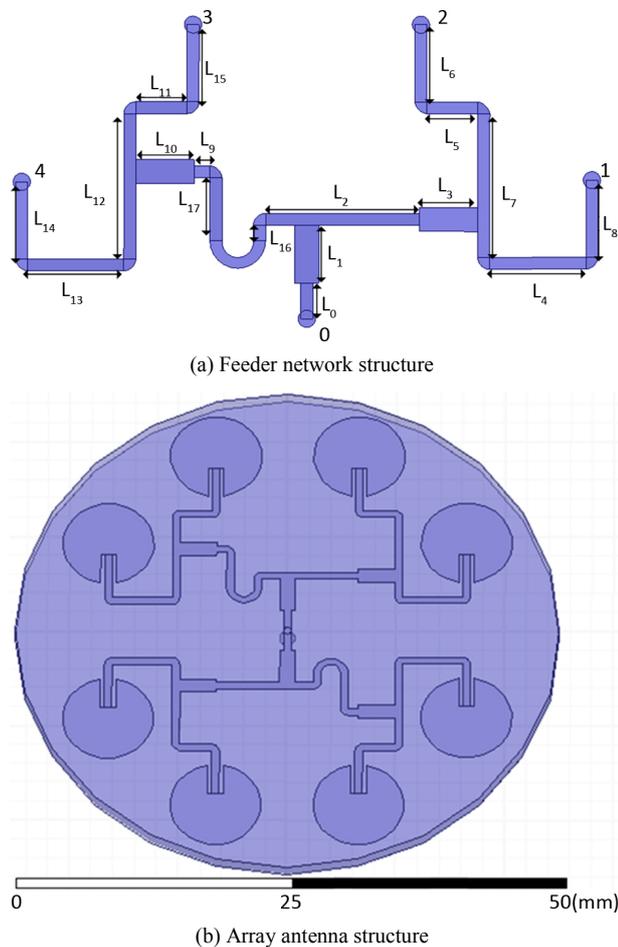


Figure 1. Unit patch structure  
图 1. 单元天线结构

阵列天线馈电网络结构设计如图 2(a)所示, 由于各相邻端口距中心馈电点有约天线工作波长 1/8 倍的长度差异, 因此各端口的相移步进量为  $45^\circ$ , 通过馈电网络馈电一圈, 信号的相移增量为  $360^\circ$ , 将馈电网络上半部分进行中心旋转复制可以得到整个馈电网络。电磁波在介质中传播的等效工作波长可由式(3)计算

$$\lambda_e = \frac{\lambda}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (3)$$

式中  $\lambda$  表示电磁波在自由空间中传播的波长。阵列天线采用 50 欧姆同轴背馈方式, 馈电点位于基板圆心处。阵列天线结构模型如图 2(b)所示。



**Figure 2.** Structure of microstrip array antenna  
**图 2.** 微带阵列天线结构

优化后的天线结构参数如表 1 所示。表中： $L_0 - L_{17}$  为馈电网络尺寸参数。

**Table 1.** Design parameters of circular microstrip array antenna (unit: mm)  
**表 1.** 圆形微带阵列天线设计参数(单位: mm)

$r$	$d$	$w$	$L_0$	$L_1$	$L_2$	$L_3$
4.2	2.94	1.4	2.1	3.36	8.89	3.36
$L_4$	$L_5$	$L_6$	$L_7$	$L_8$	$L_9$	$L_{10}$
5.54	2.94	4.5	8.4	4.51	0.89	4.51
$L_{11}$	$L_{12}$	$L_{13}$	$L_{14}$	$L_{15}$	$L_{16}$	$L_{17}$
2.94	8.49	5.54	5.21	4.51	0.905	3.69

### 3. 天线工作机理分析

贴片的几何形状很大程度上影响着微带天线表面的电流分布。“曲流”是指在贴片表面开槽使电流流向和电流有效路径长度发生改变[13]。槽的形状和位置非常重要,因为槽可以被视为天线辐射表面上无限薄的横向磁壁,电流可以从切口中流出,使得天线的谐振频率降低。设计中单元天线上表面开出的矩形槽可以使天线产生不同的模式,有主模和沿槽边沿分布电流的其他模式,当边缘电流激励起的模式与

相对应的谐振频率接近时天线将工作于较宽的频段, 而天线体积会得到有效缩减[14]。图 3 为贴片单元表面开出的矩形槽对电流流向改变的形象说明。

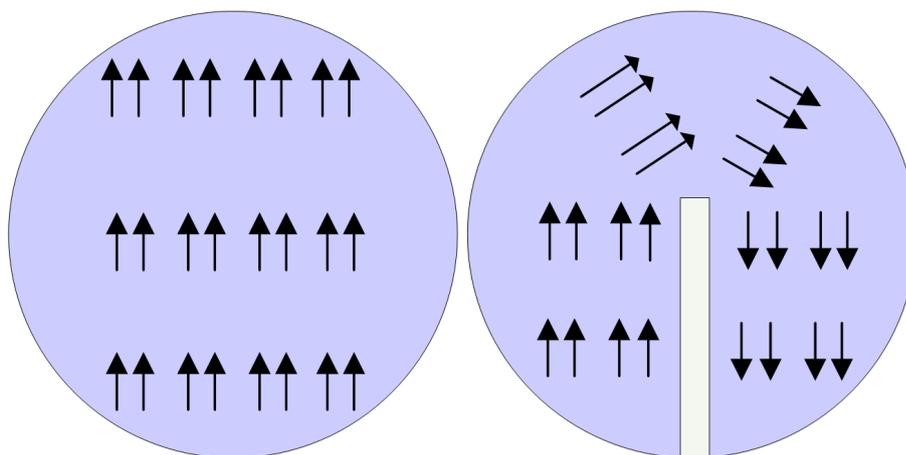


Figure 3. Influence of meander on current flow direction

图 3. 曲流对电流流向的影响

贴片单元表面的电流分布是影响阵列天线工作性能的主要因素, 电流流向会随天线工作频率而变化。采用矩形开槽的方法使圆形微带贴片天线结构有所不同, 在不同谐振点处开槽的圆形贴片表面电流得到弯曲, 固定尺寸的圆形贴片上电流路径的有效长度发生改变。对于 OAM 涡旋微带阵列天线, 最明显的特征是辐射的电磁波具有螺旋相位的波前结构。设计采用的馈电网络物理结构形态固定, 理论上只能实现一种模态的涡旋电磁波。由于阵列天线在谐振点 7.3 GHz 和 8.5 GHz 处, 天线工作波长相差仅为 2.8 mm, 而双频阵列天线工作频率各异, 在不同谐振点处电流的方向和有效路径长度会发生改变[15] [16], 因此阵列天线各阵元相邻馈电端口距中心馈电点均有约天线工作波长 1/8 倍的长度差异, 各端口的相移步进量为 45°, 通过馈电网络馈电一圈, 信号的相移增量为 360°。天线可以同时 C 波段和 X 波段工作并产生具有不同旋向的螺旋状电磁波束。

#### 4. 仿真结果与测试分析

利用电磁仿真软件对图 2(b)所示的阵列天线进行仿真优化, 得到天线的回波损耗如图 4 所示。在阵列天线中心频率 7.3 GHz 和 8.5 GHz 处, 回波损耗分别为 -23.03 dB 和 -37.5 dB。开槽是实现天线双频工作并能保证一定的带宽和增益的主要技术方法。同时, 辐射单元的尺寸决定天线的谐振频率, 通过优化贴片尺寸, 满足了较理想的阻抗匹配及带宽要求。

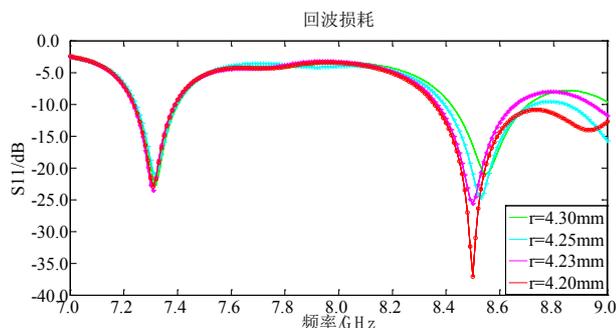


Figure 4. Optimization of array antenna return loss

图 4. 阵列天线回波损耗优化

由于各相邻阵元的馈电端口与中心馈电点之间有近天线工作波长 1/8 倍的长度差异, 所以每个阵元之间存在着相等的相位差, 在阵列天线的轴线上形成一个中空, 周围有螺旋能量辐射。图 5(a), 图 5(b) 分别为阵列天线在谐振点 7.3 GHz 和 8.5 GHz 处的电场矢量图。当阵列天线在谐振点 8.5GHz 处电磁波呈现明显的顺时针分布, 表示 OAM 模式  $l = -1$ ; 当阵列天线在谐振点 7.3 GHz 处电磁波束呈现明显的逆时针分布, 表示 OAM 模式  $l = +1$ 。两种不同旋向的螺旋状电磁波说明曲流改变了天线表面的电流方向和实际路径的长度。由于微带阵列天线阵元之间存在着干扰现象, 天线方向增益与电磁波前结构有所差异。在谐振点 8.5 GHz 处的涡旋电磁波比 7.3 GHz 处的分布更集中, 并且螺旋相位波前结构更明显。两个谐振频点处电磁波的中央空洞表明该天线产生了两种模式的具有螺旋相位结构的 OAM 电磁波。

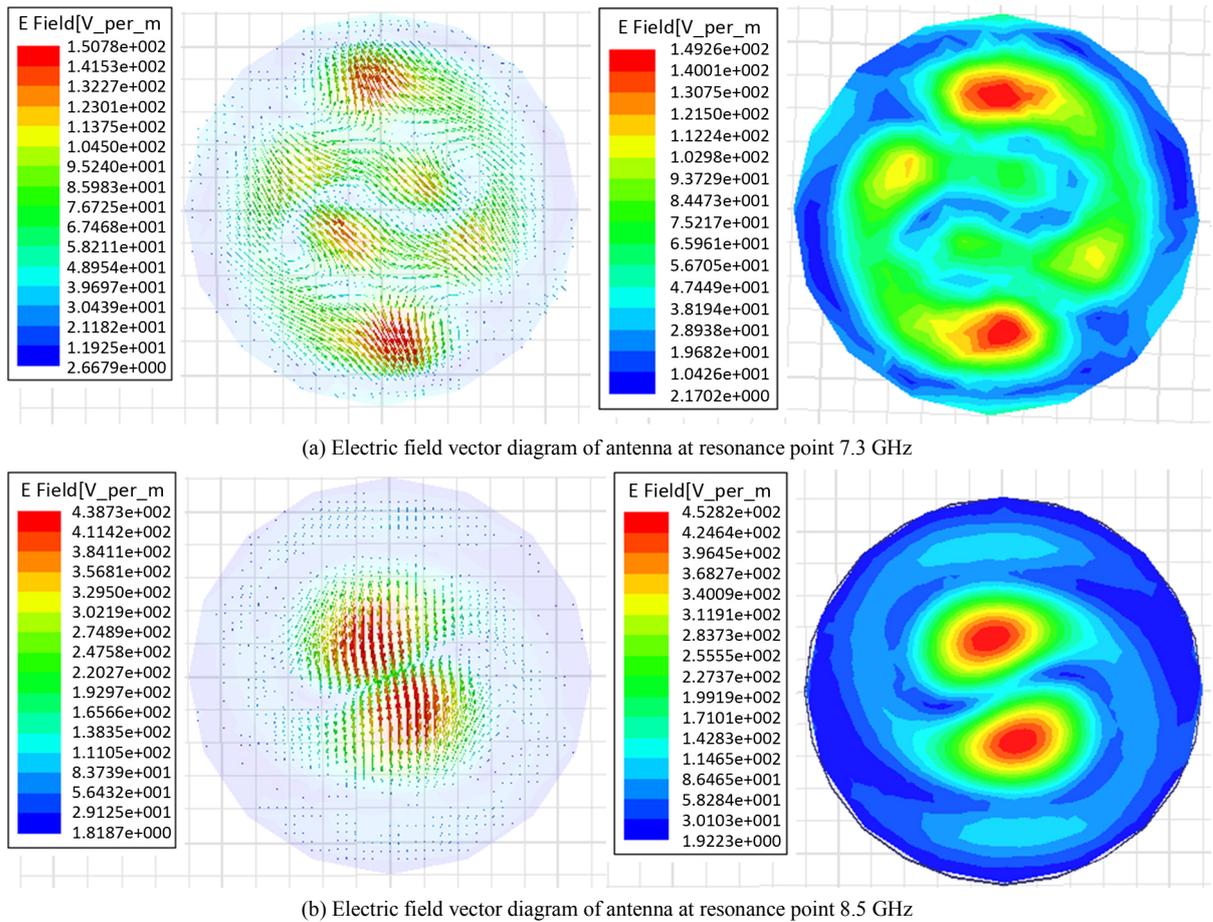


Figure 5. Electric field vector diagram of antenna at different resonance points

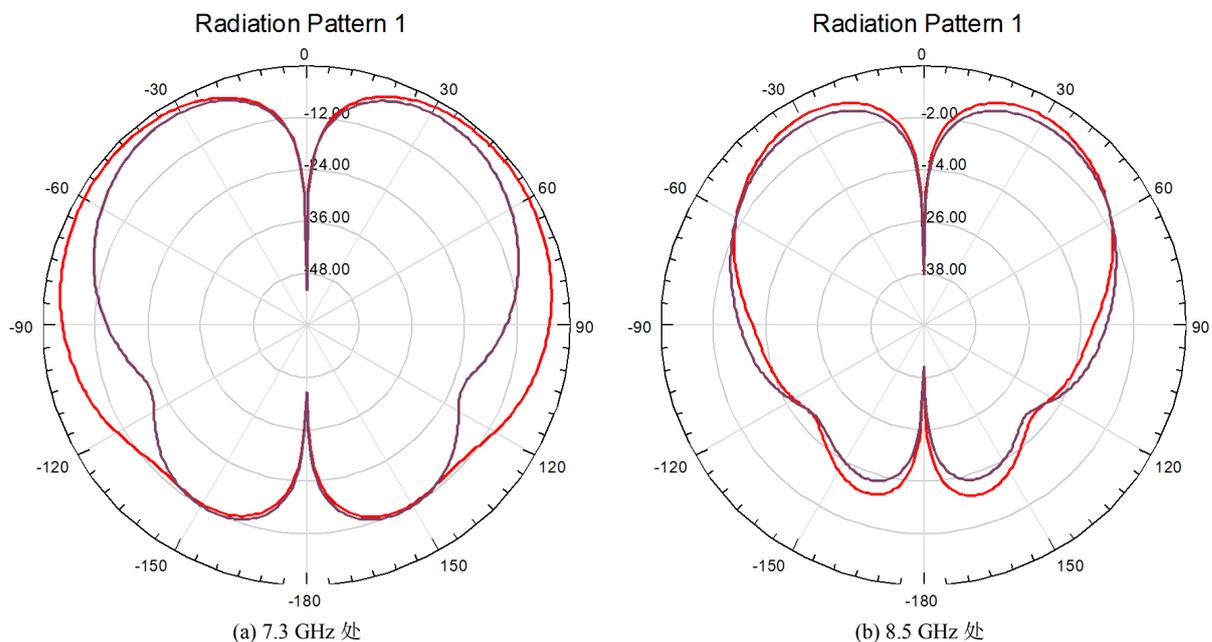
图 5. 不同谐振点处天线的电场矢量图

对于 OAM 模式分别为  $l = -1$  和  $l = +1$  的微带阵列天线, 各相邻阵元需要有不同的旋向的  $360^\circ$  相位差。图 6(a), 图 6(b) 分别为阵列天线在谐振点 7.3 GHz 和 8.5 GHz 处的 EH 面方向图。在辐射方向上  $\theta = \theta'$  两侧的曲线对称, 轴线中心出现中央空洞现象, 能量主要集中在束轴方向, 两种不同旋向的电磁波沿着信号传输方向辐射能量, 进一步说明了 OAM 螺旋波存在中空波束。

为了进一步验证天线的性能, 对设计提出的阵列天线进行了加工制作, 天线实物如图 7 所示。

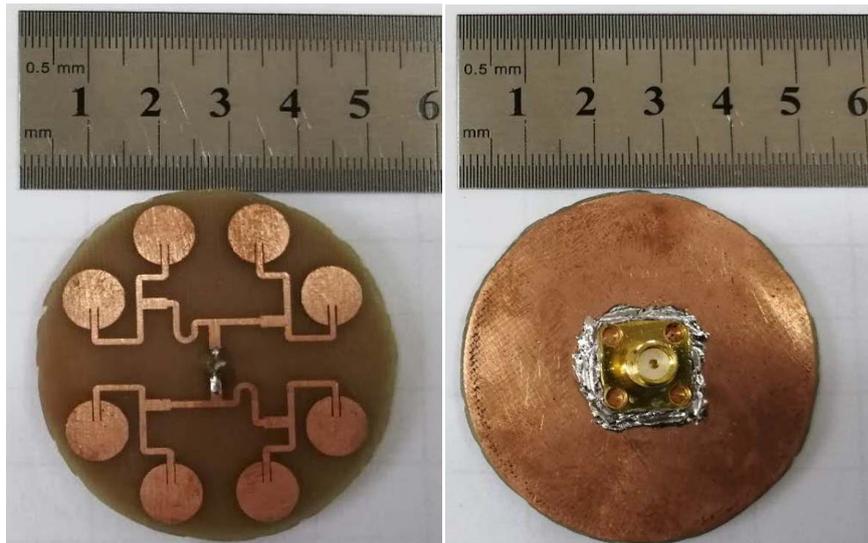
利用矢量网络分析仪 AV3672C-S 测试该双频微带阵列天线回波损耗并与电磁仿真软件结果比对, 曲

线如图 8 所示。天线的回波损耗测试结果与电磁仿真软件结果基本一致。设计的天线实现了双频, 阵列天线在中心频率 7.3 GHz 和 8.5 GHz 处达到了阻抗匹配的要求, 回波损耗分别为 $-37.5$  dB 和 $-32.5$  dB。



**Figure 6.** EH plane directions of antennas at different resonance points

**图 6.** 不同谐振点处天线的 EH 面方向图

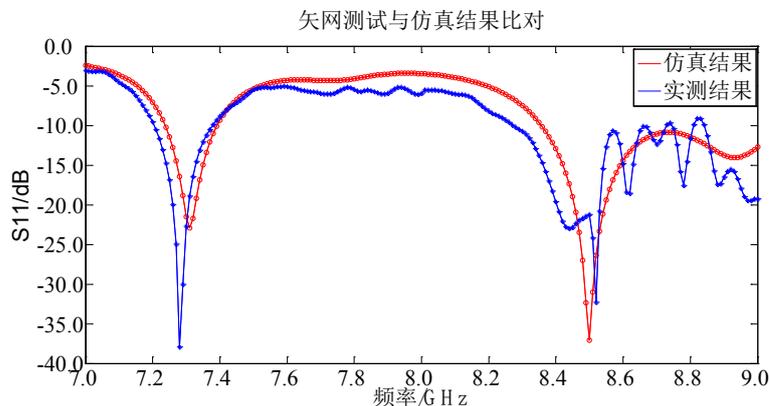


**Figure 7.** Real antenna

**图 7.** 天线实物

## 5. 结束语

本文主要结合曲流法和馈电网络构造技术, 设计了一种以矩形开槽的圆形贴片为单元的微带阵列天线, 采用同轴馈电的方式使分布于同一同心圆面上的各天线阵元被馈送不同相位的激励。通过三维电磁场仿真软件建模、优化单元贴片及馈线尺寸确定了天线最优结构并制作了实物。设计的涡旋微带阵列天



**Figure 8.** Comparison results of echo loss simulation and actual measurement  
**图 8.** 回波损耗仿真与实测对比结果

线扩展了工作频带, 同时发现在谐振点 7.3 GHz 与 8.5 GHz 处产生的 OAM 涡旋电磁波束旋向相反。这款天线对设计出更多模式、更多频带的轨道角动量微带阵列天线具有一定的参考价值。

## 基金项目

新疆维吾尔自治区青年科技创新人才培养项目; 项目编号: (2017Q037)。

## 参考文献

- [1] 孙学宏, 李强, 庞丹旭, 等. 轨道角动量在无线通信中的研究新进展综述[J]. 电子学报, 2015, 43(11): 2305-2314.
- [2] 党唯菓, 朱永忠, 余阳, 等. 无线通信中的轨道角动量天线综述[J]. 电子技术应用, 2017, 43(6): 33-36, 44.
- [3] Thide, B., Then, H., Sjöholm, J., *et al.* (2007) Utilization of Photon Orbital Angular Momentum in the Low-Frequency Radio Domain. *Physical Review Letters*, **99**, Article ID: 087701. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.99.087701>
- [4] Hui, X., Zheng, S., Chen, Y., *et al.* (2015) Multiplexed Millimeter Wave Communication with Dual Orbital Angular Momentum (OAM) Mode Antennas. *Scientific Reports*, **5**, Article No. 10148. <https://doi.org/10.1038/srep10148>
- [5] Zhang, Z., Zheng, S., Jin, X., *et al.* (2017) Generation of Plane Spiral OAM Waves Using Traveling-Wave Circular Slot Antenna. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, **16**, 8-11. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2016.2552227>
- [6] Yuan, T., Qin, Y., Cheng, Y., *et al.* (2016) Generation of OAM Radio Beams with Modified Uniform Circular Array Antenna. *Electronics Letters*, **52**, 896-898. <https://doi.org/10.1049/el.2016.0269>
- [7] Guo, Z.G. and Yang, G.M. (2016) Radial Uniform Circular Antenna Array for Dual-Mode OAM Communication. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, **16**, 404-407. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2016.2581204>
- [8] 陈思宇, 熊丽, 黄铭. 生成轨道角动量的圆极化螺母型贴片天线[J]. 计算机工程, 2019, 45(6): 254-258.
- [9] 顾磊, 顾易帆, 熊德平, 等. X 波段下产生涡旋电磁波的阵列天线设计[J]. 无线电工程, 2019, 49(3): 238-243.
- [10] 方路平, 马誉尧, 林珏伟, 等. Ku/K 波段双频涡旋电磁阵列天线设计[J]. 强激光与粒子束, 2018(1): 93-97.
- [11] 丁毅, 王光明, 苏文然. 一种新型单层单贴片宽带圆形微带天线[J]. 弹箭与制导学报, 2007, 27(5): 274-276.
- [12] 姜铭鑫. 基于开槽技术的小型多频微带天线的研究与设计[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京邮电大学, 2018.
- [13] Shen, W., Zhou, X. and Shan, Z. (2005) Dual Frequency Planar Inverted-L Bow-Tie Patch Antenna. *Microwave & Optical Technology Letters*, **46**, 367-369. <https://doi.org/10.1002/mop.20988>
- [14] Li, W., Wang, J.J., Sun, Y.C., *et al.* (2013) A Compact Ultra-Wideband Monopole Antenna with Dual Bandstop Characteristics. *Applied Mechanics and Materials*, **347-350**, 1695-1698. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.347-350.1695>
- [15] Huynh, M.C. and Stutzman, W. (2003) Ground Plane Effects on Planar Inverted-F Antenna (PIFA) Performance. *IEEE Proceedings Microwaves Antennas and Propagation*, **150**, 209-210. <https://doi.org/10.1049/ip-map:20030551>
- [16] 杨梅. 天线加载技术的研究与应用[D]: [博士学位论文]. 南京: 东南大学, 2015.

**知网检索的两种方式：**

1. 打开知网首页：<http://cnki.net/>，点击页面中“外文资源总库 CNKI SCHOLAR”，跳转至：<http://scholar.cnki.net/new>，搜索框内直接输入文章标题，即可查询；  
或点击“高级检索”，下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2163-3983，即可查询。
2. 通过知网首页 <http://cnki.net/>顶部“旧版入口”进入知网旧版：<http://www.cnki.net/old/>，左侧选择“国际文献总库”进入，搜索框直接输入文章标题，即可查询。

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：[hjwc@hanspub.org](mailto:hjwc@hanspub.org)