

4 单元矩形径向线螺旋阵列天线的 理论分析和数值模拟^{*}

赵 柳¹, 张健穹¹, 吴晓降², 刘庆想¹, 李相强¹, 张政权¹

(1. 西南交通大学 理学院, 成都 610031; 2. 中国电子科技集团 第二十九研究所, 成都 610036)

摘 要: 提出了一种便于组合的矩形径向线螺旋阵列天线。介绍了该矩形阵列天线的提出背景以及工作原理, 分析了 L 型电磁组合探针的耦合特性, 设计并数值模拟了中心频率为 4.0 GHz 的 4 单元矩形径向线螺旋阵列天线。模拟结果表明: 该天线易于实现单元天线激励幅度和相位的均匀性及其随频率变化的平坦性。该口径为 90 mm×90 mm 的天线在中心频率 4.0 GHz 下, 方向性系数为 12.57 dB, 轴向外比值 1.55; 在 3.60~4.05 GHz 的频率范围内方向性系数大于 11.6 dB, 轴比小于 1.55, 反射系数小于 0.2。

关键词: 矩形阵列天线; 螺旋天线; 径向线; L 型电磁组合探针

中图分类号: TN811; TN814

文献标识码: A

径向线螺旋阵列天线因其体积小、重量轻、效率高、易于实现高功率容量, 已被成功应用于高功率微波的定向圆极化辐射^[1-3]。然而研究发现, 由于耦合探针耦合量调节能力的限制以及微波传输不均匀性的影响, 随着这种同心圆环阵列天线圆环数和单元数的增加, 其耦合量很难实现预定分布, 因此单个圆环阵列天线很难实现高增益。使用多个阵列天线进行组合是实现阵列天线高增益的有效途径之一, 但参与组合的阵列必须具有可组合性。对于平面阵列而言, 矩形栅格阵是最普遍的一种子阵形式。本文结合径向线螺旋阵列天线的特点, 研究了一种易于组合的 4 单元矩形径向线螺旋阵列天线(子阵), 对组合式高功率高增益阵列天线进行了探索。

1 矩形径向线螺旋阵列天线的工作原理

矩形径向线螺旋阵列天线结构如图 1 所示。其工作原理是: 微波由同轴波导输入, 通过同轴-径向线模式转换器实现从同轴馈电到径向线外行波的转换; 采用耦合探针将径向线中的能量由小同轴波导耦合输出, 实现单元天线的馈电; 采用短螺旋线天线作为阵列的单元天线, 单元天线与同轴耦合波导的内导体相接从而受到激励, 在空间辐射圆极化波。上述耦合激励与螺旋线单元天线在径向线上表面呈矩形排列, 径向线外沿封口也呈矩形, 形成等间距矩形平面阵。通过调节耦合探针的耦合量和螺旋线单元天线相位, 形成均匀分布的矩形阵列天线。将多个这种矩形阵列天线组合在一起, 按照一定的相位关系, 即可形成大的矩形阵, 达到提高增益的目的。

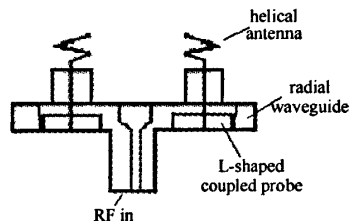


Fig. 1 Structure of helical array antenna fed from radial waveguide

图 1 径向线螺旋矩形阵列天线基本结构

2 矩形阵列天线的布局设计

取矩形阵列中心为原点, 设 x 方向和 y 方向各有 $2M$ 和 $2N$ 个等间距排列的阵元, 则其远区场函数^[4]为

$$F(\theta, \varphi) = \cos^{1.7} \theta \sum_{m=-M}^{M-1} \sum_{n=-N}^{N-1} I_{mn} \exp \{ j k \sin \theta [\frac{(2m+1)}{2} d_x \cos \varphi + \frac{(2n+1)}{2} d_y \sin \varphi] + \alpha_{mn} \} \quad (1)$$

式中: I_{mn} 和 α_{mn} 分别为第 (m, n) 单元总的激励幅度和相位; θ 为远场方位角; φ 为远场俯仰角。由 $2M \times 2N$ 个单元组成的矩形阵列天线的方向性系数定义为^[4]

$$D(\theta_0, \varphi_0) = \frac{4\pi |F(\theta_0, \varphi_0)|^2}{\int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^\pi |F(\theta, \varphi)|^2 \sin \theta d\theta} \quad (2)$$

为了避免栅瓣的出现, 要求单元间距小于工作波长。在频率 4.0 GHz 下, 结合实际工程需要, 选定的单元

^{*} 收稿日期: 2007-04-19; 修订日期: 2007-09-12

基金项目: 国家 863 计划项目资助课题

作者简介: 赵 柳(1975—), 女, 博士生, 主要从事高功率微波技术研究; qilinxiang@163.com。

间距为 $d=d_x=d_y\approx0.6\lambda=45\text{ mm}$ 。阵列天线由 4 单元组成,排列如图 2 所示。选取改进的短螺旋天线^[5]作为该矩形阵的辐射单元,该辐射单元的方向图在上半空间可用二项式拟合来近似。假设螺旋线单元天线激励幅度与激励相位均相同,所研究的矩形阵为均匀分布,将 $\alpha_{nm}=0, I_m=I_n$ 代入式(1),(2),可求得轴向上($\theta=0^\circ$)方向性系数理论值为 12.57 dB。

3 耦合探针的设计

探针在整个系统中的作用是提取径向线中的微波能量,并通过馈线向螺旋线单元天线馈电。本文所采用的探针结构如图 3 所示。这种探针可以将内导体下端与径向线底板直接固定在一起,易于加工和安装,且因其整体在径向线波导中无尖角,不易造成电场局部集中,从而有助于提高阵列天线的功率容量。

由于 4 单元矩形阵列天线各探针所在位置场强相同,要达到相同耦合系数比较容易,但要提高传输效率,探针的耦合系数必须较大。在频率为 4.0 GHz(工作波长 $\lambda=75\text{ mm}$)下,针对探针的耦合系数(耦合电场幅值与入射电场幅值之比)和反射系数(反射电场幅值与入射电场幅值之比)进行了模拟分析。将探针置于平行板波导中,同轴耦合波导输出结构尺寸为:内导体半径为 2.5 mm,外导体半径为 9.5 mm。结果列于表 1 中(入射波功率为 1 W,相位为 0°),其中 s 为径向线两平行板间距, r 为 L 型电磁组合探针下端耦合导体半径, h 为该耦合导体高度。由表 1 可以看出,该探针耦合系数较大,反射较小。其反射和耦合随频率变化的典型曲线见图 4。由图可以看出,该探针的耦合随频率变化较为平坦,可以满足布阵需要。

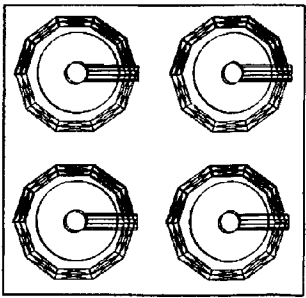


Fig. 2 Elements distribution
图 2 矩形阵列布局示意图

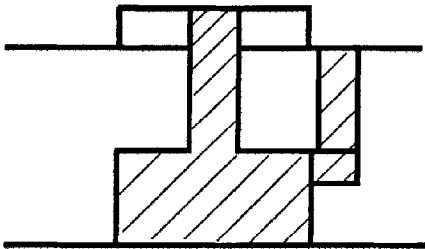


Fig. 3 Structure of L-shaped coupled probe
图 3 耦合探针结构图

表 1 L 形电磁组合探针耦合特性

Table 1 Coupling characteristics of L-shaped probe				
s/mm	r/mm	h/mm	reflecting coefficient	coupling coefficient
20	10	10	0.028	0.800 2
20	10	12	0.116	0.828 2
20	12	10	0.130	0.804 4

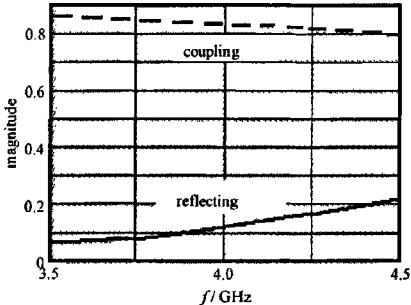


Fig. 4 Probe reflecting and coupling coefficients vs frequency
图 4 探针反射及耦合系数随频率的变化

4 数值模拟

采用有限元数值模拟软件对天线进行了数值模拟,取同轴输入口内导体半径 $a=2.5\text{ mm}$,外导体半径 $b=9.5\text{ mm}$,径向线两平行板间距为 20 mm。为便于组合,矩形阵径向线封口尺寸选取为 80 mm×80 mm,加上法兰后尺寸为 90 mm×90 mm。

4.1 耦合特性

阵列天线各阵元激励的均匀分布有利于提高天线的增益、口径效率和功率容量。4 单元耦合输出的布局方式使各螺旋线单元激励幅度和相位的一致性较好。在中心频率 4 GHz 下,各耦合探针的圆台半径 r 、圆台高度 h 、耦合波导输出口的耦合系数 I 和耦合相位 θ 列于表 2 中(入射波功率为 1 W,相位为 0°)。

图 5 给出了整个天线的耦合结果。由图可见,在 3.5~4.5 GHz 的频带范围内,各耦合单元可以获得近似相等的耦合系数,这样的耦合分布可以获得较高的方

表 2 4.0 GHz 下探针耦合结果

Table 2 Coupling results at 4.0 GHz				
port	r/mm	h/mm	I	$\theta/(^\circ)$
1	10	12.5	0.500 01	-175.436
2	10	12.5	0.500 19	-173.475
3	10	12.5	0.500 05	-173.605
4	10	12.5	0.498 55	-173.548

向性系数;耦合相位随频率呈近似的线形变化,且在较宽的范围内四圈耦合相位的斜率近似相等,表明各耦合口之间的相位差随频率变化不大,可以依据中心频率上的耦合相位来确定主射方向为轴向时螺旋线单元天线所需的旋转角度。

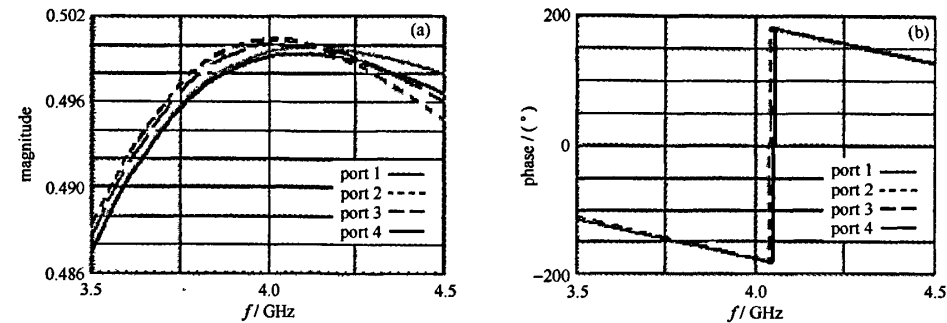


Fig. 5 Coupling magnitude and phase vs frequency
图 5 耦合量和耦合相位随频率的变化

4.2 反射特性

在设计过程中,尽量减小探针的插入反射,得到的耦合馈电系统反射系数随频率的变化如图 6 所示。在 3.8~4.3 GHz 的频带范围内,对应的传输效率大于 99%(不计损耗)。然而,用这样的馈电系统激励短螺旋单元天线^[5]时,其总的反射特性不佳,如图 7 所示。原因可能是馈电系统与螺旋线单元天线之间的匹配不佳所致;当主射方向为轴向时,各螺旋指向相同,产生的反射波会同相叠加,造成天线反射增大,辐射效率降低。在 3.60~4.05 GHz 的频带范围天线整体反射系数小于 0.2,对应的辐射效率大于 96%(不计损耗)。

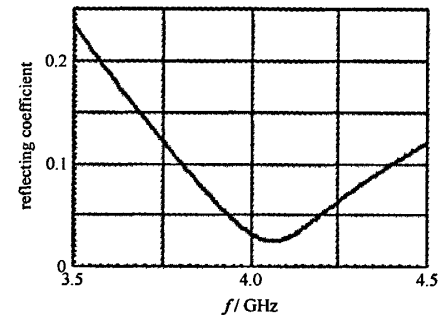


Fig. 6 Reflecting coefficient of feed system vs frequency
图 6 馈电系统反射系数随频率的变化

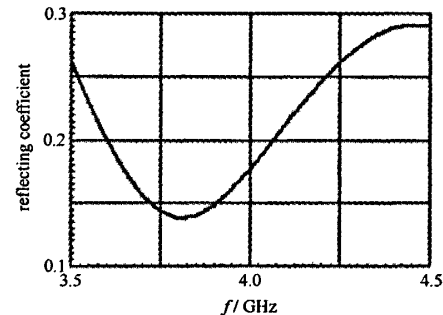


Fig. 7 Reflecting coefficient of antenna vs frequency
图 7 天线反射系数随频率的变化

4.3 辐射特性

本文研究的辐射特性仅限于辐射方向在轴向的情况。我们采用有限元软件模拟了上述 4 单元矩形径向线螺旋阵列天线,图 8 给出了模拟得到的主要频点的辐射方向图($\varphi=90^\circ$ 平面)。表 3 总结了主要频点的天线方向性系数、半功率波瓣宽度、第一副瓣电平、轴向轴比值等辐射特性。由图 8 和表 3 以看出,在 3.6~4.0 GHz 的频带范围内,阵列天线的辐射方向保持在轴向上,副瓣电平保持在 -6.9 dB 以下,半功率波瓣宽度变化不大,在 $42.8^\circ\sim 46.8^\circ$ 之间,轴向轴比值小于 1.55,天线方向性系数大于 11.6 dB。

表 3 4 单元矩形阵辐射特性总结

Table 3 Results of radiation characteristics of 4-element rectangular array antenna					
frequency/GHz	gain/dB	3 dB beam width/(°)	side lobe/dB	axis AR	aperture efficiency/%
3.6	11.601	46.8	-11.5	1.35	98.61
3.8	12.120	44.6	-9.3	1.40	99.76
4.0	12.574	42.8	-6.9	1.55	99.87

5 结 论

本文设计了一种 4 单元矩形径向线螺旋阵列天线。该天线采用同轴输入,通过同轴-径向线模式转换器实

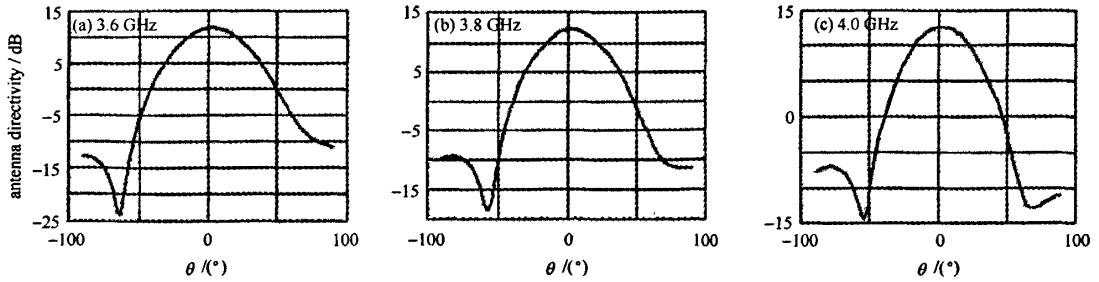


Fig. 8 Radiation patterns of 4-element rectangular antenna at main frequency point

图 8 主要频点下 4 单元矩形阵列天线辐射方向图

现径向线外行波激励,以 L 型电磁组合探针给螺旋单元天线馈电,4 个螺旋单元天线均匀排列成矩形且径向线边缘封口围合成矩形。理论分析和数值模拟结果表明:该矩形径向线螺旋阵列天线可以实现微波的圆极化定向辐射,具有结构尺寸紧凑、便于组合等优点。并且,这种结构避开了径向线高阶模的影响^[5],易于实现阵列天线激励幅度和相位的均匀性,对组合式矩形径向线螺旋阵列天线的设计具有重要的意义。

参考文献:

- [1] 刘庆想,李相强,袁成卫,等. 高功率双层径向线螺旋阵列天线理论分析与数值模拟[J]. 电子学报, 2005, 33(12):2231-2234. (Liu Q X, Li X Q, Yuan C W, et al. Theoretical analysis and numerical simulation of a high power helical array antenna fed from double-layer radial waveguide. *Acta Electronica Sinica*, 2005, 33(12):2231-2234)
- [2] 李相强,刘庆想,赵柳. 高功率单层径向线螺旋阵列天线的设计和模拟[J]. 强激光与粒子束, 2005, 17(11):1421-1424. (Li X Q, Liu Q X, Zhao L. High power helical array antenna fed from single-layered radial waveguide. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, 17(11):1421-1424)
- [3] 李相强,刘庆想,赵柳,等. 高功率双层径向线螺旋阵列天线实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2006, 18(2):265-268. (Li X Q, Liu Q X, Zhao L, et al. Experiment research of high power helical array antenna fed from double-layered radial waveguide. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, 18(2):265-268)
- [4] 吕善伟. 天线阵综合[M]. 北京:北京航空学院出版社, 1988. (Lü S W. *Antenna array synthesis*. Beijing: Beijing Aviation College Press, 1988)
- [5] 赵柳,刘庆想,李相强. 径向波导模式分析[C]//四川省电子学会高能电子学专业委员会第四届学术交流会论文集, 2005: 424-428. (Zhao L, Liu Q X, Li X Q. Theoretical analysis of mode characteristics in radial waveguide//Sichuan Eletron Academic Society High Energy Electronic Specialized Committee Fourth Session of Academic Meeting. 2005: 424-428)

Theoretical analysis and numerical simulation of 4-element rectangular helical array antenna fed from radial waveguide

ZHAO Liu¹, ZHANG Jian-qiong¹, WU Xiao-jiang², LIU Qing-xiang¹,
LI Xiang-qiang¹, ZHANG Zheng-quan¹

(1. College of Science, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. The No. 29 Research Institute of China Electronic Technology Group Corporation, Chengdu 610036, China)

Abstract: A helical rectangular array antenna of 4-element using L-shaped coupled probes is put forward, which is helical rectangular array antenna fed from radial waveguide and can be used to realized the directional radiation of microwave. Theoretical analysis and numerical simulation show that the antenna is subject to the exiting uniform of each elements and the consistency versus frequencies. The directivity is 12.57 dB and the axial ratio at the normal direction is 1.55 at 4.0 GHz. In the range of 3.60 GHz to 4.05 GHz, the directivity is upon 11.6 dB, the axial ratio is below 1.55, and the reflecting coefficient is 0.2.

Key words: Rectangular array antenna; Helical antenna; Radial waveguide; L-shaped coupled probe

如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深, 让许多工程师望而却步, 然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上, 我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识, 借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养, 推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程, 化繁为简, 直观易学, 可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛, 让天线设计不再难...



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书, 课程从基础讲起, 内容由浅入深, 理论介绍和实际操作讲解相结合, 全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程, 可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计, 让天线设计不再难...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程, 由经验丰富的专家授课, 旨在帮助您从零开始, 全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程, 边操作边讲解, 直观易学; 购买套装同时赠送 3 个月在线答疑, 帮您解答学习中遇到的问题, 让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程, 培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合, 全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作, 同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习, 可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试...

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训:

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,一直致力和专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com),现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 ADS、HFSS 等专业软件使用培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司,以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年, 10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养,更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果,又能免除您舟车劳顿的辛苦,学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲,结合实际工程案例,直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>