

文章编号 1005-0388(2009)04-0583-05

## 三角形栅格矩形径向线 螺旋阵列天线的设计

张健穹 刘庆想 李相强 赵柳 张政权

(西南交通大学物理科学与技术学院, 四川成都 610031)

**摘要** 为了提高矩形径向线螺旋阵列天线的极化和匹配性能, 将顺序旋转相位技术应用于天线的设计中, 提出了一种 12 单元三角形栅格矩形径向线螺旋阵列天线(子阵)。螺旋天线作为单元天线。设计结果表明: 天线具有较高的口径效率和良好的匹配特性, 能在一定频带内实现微波的圆极化定向辐射, 将多个子阵组合就可以构成高增益的大型阵列。同时, 通过对子阵的特殊设计, 使其具有较高的功率容量, 为高功率微波的定向辐射提供了新的技术手段。

**关键词** 矩形阵列天线; 螺旋天线; 径向线; 三角形栅格; 顺序旋转阵列

中图分类号 TN82 文献标志码 A

### Triangle grid radial line helix rectangular array antenna

ZHANG Jian-qiong LIU Qing-xiang LI Xiang-qiang

ZHAO Liu ZHANG Zheng-quan

(College of Physics Science and Technology, Southwest Jiaotong University,  
Sichuan Chengdu 610031, China)

**Abstract** In order to improve the performance of CP and matching condition, a new type of twelve elements triangle grid radial line helix rectangular array antenna using the sequential-rotation array technology is proposed. This antenna adopts coaxial waveguide as input port, uses short helix as its element antenna that radiates circularly polarized (CP) microwave, and its feeding network is composed of radial line waveguide and electromagnetic probes. Results indicate that: the antenna has high aperture efficiency and good matching condition, and can realize the directional radiation of CP microwave in definite frequency band, especially it can be simply assembled a number of subarray to a high gain array antenna. Also, the antenna has high power capacity by good design in the subarray, which provides a new technique to radiate high-power microwave directionally.

**Key words** rectangular array antenna; helical antenna; radial line; triangle grid; SRA

### 引言

随着高功率微波<sup>[1]</sup>技术的不断发展, 高功率微波辐射技术越来越成为人们研究的重点。高功率径

向线螺旋阵列天线<sup>[2~5]</sup>是近年来提出的一种新型高功率微波辐射天线。此类天线实现高增益的途径之一是使用多个矩形子阵进行组合, 文献[6]~[8]对此进行了研究, 设计了矩形栅格形式的径向线螺旋

阵列天线。然后,在之前矩形栅格形式阵列的基础上,文献[9]进一步提出了三角形栅格形式的径向线螺旋阵列天线,并对其完成了设计和实验研究。文献[9]中提出的阵列天线虽然首次实现了矩形径向线的三角形栅格布局,但设计和实验研究结果表明天线的圆极化性能和匹配特性不理想。为了提高阵列天线的圆极化性能和匹配特性,人们已做过大量研究。过去的研究成果表明,在阵列天线中采用顺序旋转单元技术(The Sequential Rotation of elements),可以有效地提高阵列天线的极化特性和匹配特性,并且不会过多的增加系统成本。顺序旋转单元技术最早由 TESHIROGI T 等人提出<sup>[10]</sup>,应用于微带天线阵列。随后,扩展到用线极化单元产生圆极化波束<sup>[11]</sup>。此后根据不同的馈电形式,做过许多相关研究,设计并实现了多种馈电形式的微带天线阵列<sup>[12,13]</sup>,均在一定程度上改善了微带阵列天线的极化特性和带宽。通常,顺序旋转阵列(Sequential-Rotated Array, SRA)由一系列独立单元组成,每个独立单元自身旋转一定的角度,而激励相位弥补了单元自身的转角大小。将顺序旋转单元技术引入到径向线螺旋阵列天线的设计中,通过馈电路径长度的不同,实现馈电相位的差异,再通过螺旋单元天线自身转动,以满足顺序旋转单元技术对单元转角和馈电相位的要求。

首先介绍了三角形栅格矩形径向线螺旋阵列天线(子阵)的工作原理,然后基于顺序旋转单元技术的原理设计了以径向线和电磁组合探针<sup>[2]</sup>组成的三角形栅格形式的12单元子阵馈电系统,并得到了馈电系统的匹配和耦合特性,最后对此子阵的辐射特性和匹配特性进行了模拟研究。

## 1 工作原理

径向线螺旋阵列天线(子阵)的结构示意如图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;采用不同的耦合探针将径向线中的能量由各个小同轴波导耦合输出,各同轴输出口加载短螺旋线天线<sup>[2]</sup>。为了形成三角形栅格形式的阵列布局,上述同轴输出口和短螺旋线单元天线在径向线上表面呈三角形栅格排列,径向线外沿结构呈矩形,形成三角形栅格矩形平面阵。

基于上述原理,同时为了满足顺序旋转单元技术中对馈电相位差异的要求,以径向线为基础的馈

电系统宜采用串联馈电<sup>[14]</sup>形式。同时,依据过去对径向线的设计经验,提出了一种12单元三角形栅格矩形径向线阵列天线(子阵),其结构如图1所示。

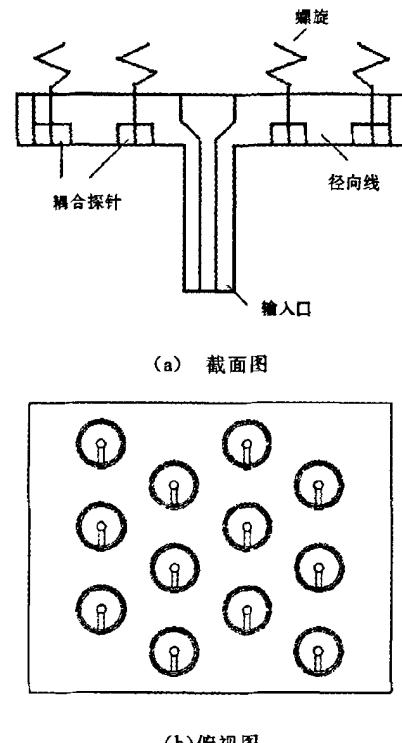


图1 子阵结构示意图

## 2 子阵馈电系统的设计

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。馈电系统通过耦合探针的调节,可为阵列天线各螺旋线单元提供幅度均匀的激励。由于阵列天线采用串联馈电,各个输出口相对输入口的位置不同,且对称性差,这使得三角形栅格形式的径向线阵列实现等幅激励较矩形栅格形式更为困难。为了提高阵列天线的各个输出口的幅度一致性,采用幅度耦合调节能力大,且不产生场强集中电磁组合探针<sup>[2]</sup>,并通过有限元数值模拟软件对阵列天线进行了设计。在设计过程中,尽量减小探针的插入反射,并且通过加入销钉等方法降低馈电系统的反射,同时保证耦合探针与螺旋线单元天线之间的良好匹配。下面给出阵列天线各主要部分的设计结果。

为了使设计出的子阵可以组合成均匀的平面大阵,矩形口径阵列尺寸为168.8 mm×146.4 mm。耦合输出口在径向线上表呈三角形栅格排列,间距

约为 0.6 个波长。输出口位置及标识见图 2 所示。

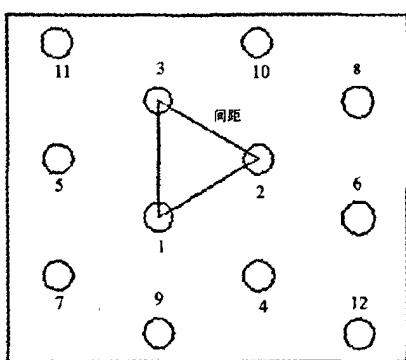


图 2 12 单元阵列天线馈电输出口位置

图 3 给出了该馈电系统的反射随频率的变化。各输出口的耦合量  $I$  和耦合相位  $\theta$  总结于表 1 中 (入射波功率为 1W, 相位为  $0^\circ$ )。

由图 3 和表 1 可以得到, 在  $3.5 \sim 4.2$  GHz 的频带范围内, 馈电系统的反射系数小于 0.1; 馈电系统在中心频率附近可以提供 12 路的近似等幅馈电, 且各个输出口的相位具有明显的差异性。

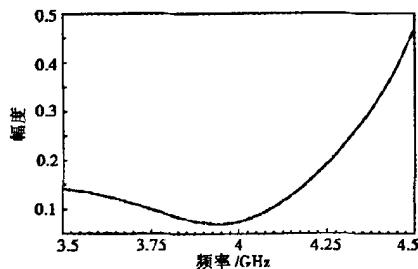


图 3 馈电系统的反射特性曲线

表 1 12 单元子阵馈电系统耦合结果(中心频率)

端口	幅度	相位/度
1	0.31	109
2	0.31	109
3	0.29	95
4	0.29	95
5	0.28	-44
6	0.28	-44
7	0.28	14
8	0.28	14
9	0.29	46
10	0.29	46
11	0.27	-76
12	0.26	-77

### 3 子阵的匹配和辐射特性

馈电系统加载单元天线后, 得到的顺序旋转阵列的单元天线角度如图 4 所示。

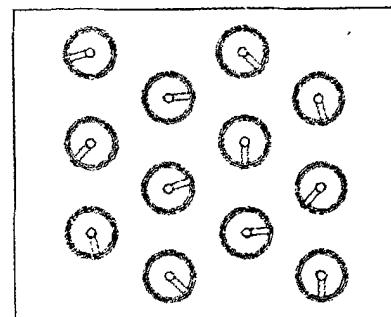


图 4 顺序旋转阵列单元角度图

通过模拟计算得到 12 单元子阵的反射系数随频率的变化如图 5 所示。由图可见, 在  $3.7 \sim 4.15$  GHz 的频带范围内, 天线反射系数小于 0.1, 对应驻波系数小于 1.25。

图 6 和图 7 分别给出了阵列天线在中心频率下的方向图和极化图。图 8 给出了主要频点的轴向辐射方向图 ( $\varphi = 90^\circ$  平面), 表 2 总结了主要频点的轴向辐射特性。

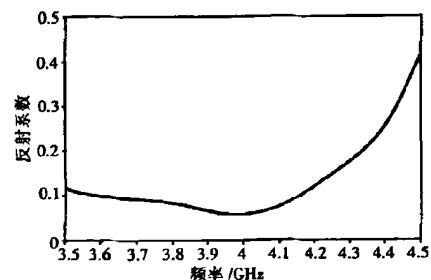
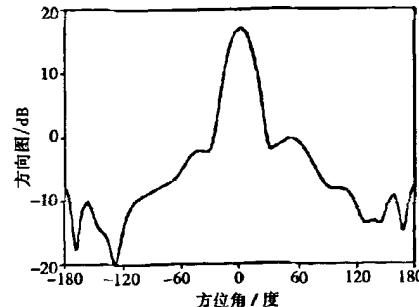
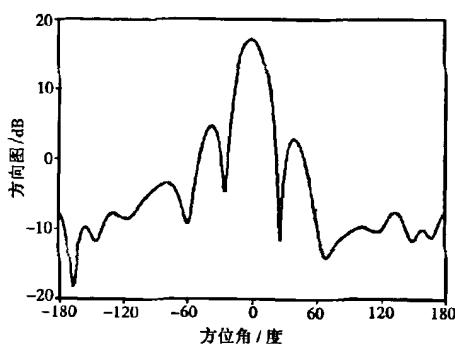


图 5 天线反射系数随频率的变化曲线

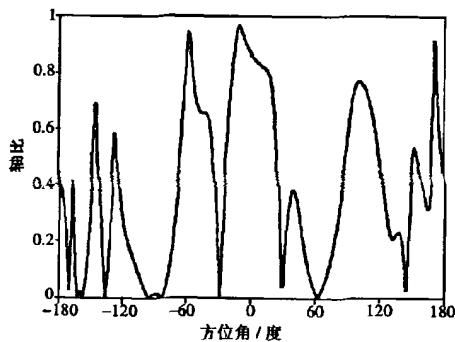


(a)  $45^\circ$  平面

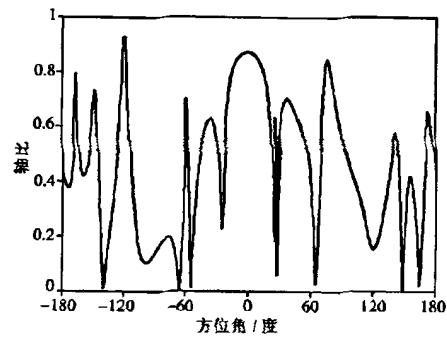


(b) 90°平面

图 6 12 单元子阵方向图

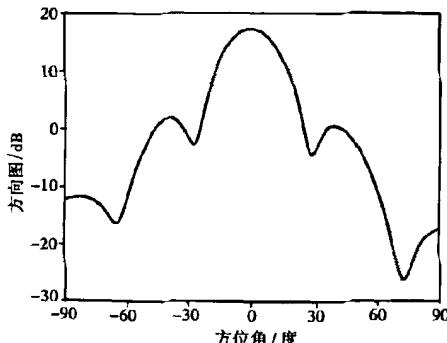


(a) 45°平面

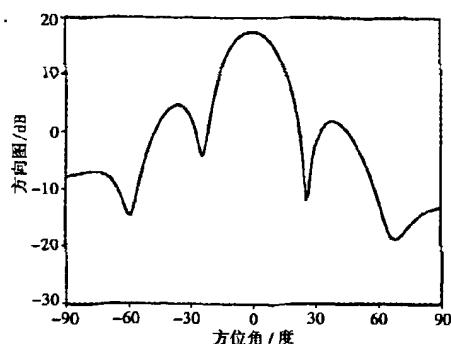


(b) 90°平面

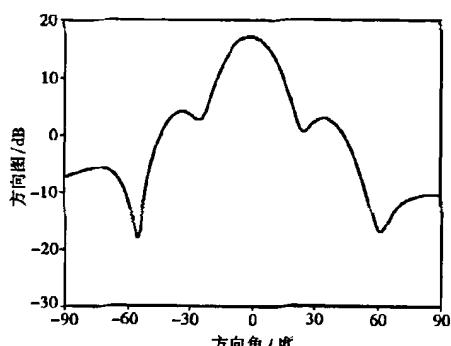
图 7 12 单元子阵极化图



(a) 3.8 GHz



(b) 4.0 GHz



(c) 4.2 GHz

图 8 12 单元子阵辐射方向图

表 2 12 单元子阵辐射特性

频率/GHz	增益/dB	副瓣电平/dB	轴比
3.8	17.26	-15.231	0.9687
4.0	17.65	-12.871	0.8537
4.2	17.21	-13.009	0.831

由图 6、图 7、图 8 及表 2 可以得到, 在 3.8~4.2 GHz 的频带范围内, 子阵可实现轴向辐射, 这说明在这一频带内单元相位差随频率的变化不会影响阵列天线的轴向辐射, 轴向轴比值大于 0.83(即小于 1.2), 天线增益大于 17.2 dB, 口径效率大于 94%。

## 4 结论

为了提高矩形径向线螺旋阵列天线的圆极化性能和匹配特性, 以顺序旋转单元技术为基础, 提出了一种 12 单元三角形栅格矩形径向线螺旋阵列天线, 设计并数值模拟了中心频率为 4.0 GHz 的 12 单元三角形栅格径向线螺旋阵列天线。设计结果表明: 12 单元阵列天线在中心频率下, 增益为 17.65 dB, 轴向轴比值为 1.2, 驻波系数约为 1.13; 在 3.8~4.2 GHz 的频率范围内可实现圆极化定向辐射, 增

益大于 17.2 dB, 轴向轴比值小于 1.2, 驻波小于 1.25, 口径效率大于 94%。同时, 由于天线内部结构为全金属构成, 未使用任何介质, 而且天线内部的耦合探针<sup>[4~6]</sup>经特殊设计, 使天线整体具有较高的功率容量, 关于功率容量的详细情况将在后续研究中进行阐述。

### 参考文献

- [1] NAKANO H, TAKADA H, KITAMURA Y, et al. Low-profile helical array antenna fed from a radial waveguide[J]. IEEE Trans. on Antennas Propagation, 1992, 40(3): 279-284.
- [2] 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.
- [3] LIU Qing-xiang, LI Xiang-qiang, YUAN Cheng-wei, et al. Theoretical analysis and numerical simulation of a high power helical array antenna fed from double-layer radial waveguide[J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 33(12): 2231-2234. (in Chinese)
- [4] 李相强, 刘庆想, 赵柳, 等. 高功率单层径向线螺旋阵列天线的设计与模拟[J]. 强激光与粒子束, 2005, 17(11): 1712-1716.
- [5] LI Xiang-qiang, LIU Qing-xiang, ZHAO Liu. High power helical array antenna fed from single-layered radial waveguide[J]. High Power Laser & Particle Beams, 2005, 17(11): 1712-1716. (in Chinese)
- [6] 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.
- [7] LI Xiang-qiang, LIU Qing-xiang, ZHAO Liu, et al. Experiment research of high power helical array antenna fed from double-layered radial waveguide[J]. High Power Laser & Particle Beams, 2006, 18(2): 265-268. (in Chinese)
- [8] 李相强, 赵柳, 刘庆想, 等. 双边立柱探针耦合的高功率径向线螺旋阵列天线[J]. 电波科学学报, 2008, 23(4): 781-785.
- [9] LI Xiang-qiang, ZHAO Liu, LIU Qing-xiang, et al. High-power radial line helical array antenna using double-pillar coupled probes[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2008, 23(4): 781-785. (in Chinese)
- [10] 赵柳, 张健穹, 吴晓降, 等. 4 单元矩形径向线螺旋阵列天线的理论分析和数值模拟[J]. 强激光与粒子束, 2007, 19(11): 1869-1872.
- [11] ZHAO Liu, ZHANG Jian-qiong, WU Xiao-jiang, et al. Theoretical analysis and numerical simulation of 4-element rectangular helical array antenna fed from radial waveguide[J]. High Power Laser & Particle Beams, 2007, 19(11): 1869-1872. (in Chinese)
- [12] 赵柳, 李相强, 刘庆想, 等. 16 单元矩形径向线螺旋阵列天线的理论分析和数值模拟[J]. 强激光与粒子束, 2008, 20(3): 431-434.
- [13] ZHAO Liu, LI Xiang-qiang, LIU Qing-xian, et al. Theoretical analysis and numerical simulation of 16-element radial line helical rectangular array antenna[J]. High Power Laser & Particle Beams, 2008, 20(3): 431-434. (in Chinese)
- [14] 赵柳, 李相强, 陈晓波, 等. 16 单元组合式矩形径向线螺旋阵列天线的设计[J]. 电波科学学报, 2008, 23(4): 640-644.
- [15] ZHAO Liu, LI Xiang-qiang, CHEN Xiao-bo, et al. Design of 16-element assembled rectangular radial line helical array antenna[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2008, 23(4): 640-644. (in Chinese)
- [16] TESHIROGI T, TANAKA M, CHUJO W. Wideband circularly polarized array antenna with sequential rotations and phase shift of elements[C]/Int. Symp. on Ant and Prop., 1985: 117-120.
- [17] HUANG J. A technique for an array to generate circular polarization with linear polarized elements[J]. IEEE Trans. on Antennas Propagation, 1986, 34(9): 1113-1124.
- [18] HALL P S, HALL C M. Coplanar corporate feed effects in microstrip patch array design[J]. Microwaves, Antennas and Propagation, IEE Proceedings H, 1988, 135(3): 180-186.
- [19] EVANS H, GALE P, SAMBELL A. Performance of 4x4 sequentially rotated patch antenna array using series feed[J]. Electronics Letters, March 2003, 39(6): 493-494.
- [20] MERRILL I S. Radar Handbook[M]. New York: Mraw-Hill, 1990.

张健穹 (1983—), 男, 四川人, 现为西南交通大学博士生, 主要从事高功率微波技术研究。



刘庆想 (1964—), 男, 山东人, 西南交通大学教授, 博士生导师, 从事高功率微波技术研究, 已在国内外重要期刊发表学术论文四十多篇。



李相强 (1982—), 男, 山东人, 现为西南交通大学博士生, 主要从事高功率微波技术研究。

## 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](http://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](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,一直致力于专注于微波、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](http://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>