

文章编号: 1001-4322(2009)10-1521-04

L 波段径向线螺旋阵列天线的优化设计

邓遥林, 刘庆想, 李相强, 张健穹

(西南交通大学 理学院, 成都 610031)

摘要: 以提高阵列天线的口径效率为目标, 对辐射单元及阵列布局进行了优化, 设计了中心频率为 1.57 GHz 的 6 元单圆环径向线螺旋阵列天线, 采用时域有限积分算法软件对阵列天线进行了数值模拟, 结果表明: 口径为 320 mm 的该天线在中心频率上可获得 14.4 dBi 的增益, 口径效率达 99%, 轴向轴比值为 1.15, 在 1.5~1.7 GHz 的频带范围内, 增益大于 13.9 dBi, 口径效率大于 97%, 轴向轴比值小于 1.35。

关键词: 阵列天线; 优化设计; 口径效率; 时域有限积分; 激励调节法

中图分类号: TN82 文献标志码: A

在某些特定应用背景下, 尤其是在低频段的应用中, 天线的口径尺寸受到一定的限制, 所以, 辐射天线小型化是辐射技术的重要研究方向之一。文献[1]结合径向线阵列天线^[2]体积小、重量轻和效率高的优点, 提出了高功率径向线螺旋阵列天线的设计思想, 设计了一 C 波段口径为 320 mm 的高功率径向线螺旋阵列天线, 成功地将阵列天线引入到高功率微波领域, 实现了辐射天线的高功率容量及轴向尺寸的小型化, 获得了 72.3% 的口径效率, 其结果还不是很理想, 因此如何提高有限的口径上天线的口径效率具有较为重要的现实意义。根据阵列天线理论知识, 要提高阵列天线的增益, 可通过提高单元天线的增益及优化阵列布局来实现^[2-3], 本文拟通过这 2 种途径来提高有限口径的阵列天线的增益, 从而实现其口径效率的提高。

短螺旋天线^[4]可以辐射圆极化波且具有轴向尺寸短的优点, 文献[1]在高功率径向线螺旋阵列天线的设计中采用了这种短螺旋天线, 然而其增益仅有 8.5 dBi。传统的提高螺旋天线增益的方法是增加螺旋圈数, 但这势必会增大天线的轴向尺寸, 导致其应用范围受到一定的限制, 鉴于此, 本文在优化螺旋单元天线的增益时, 是在保持螺旋圈数($N=1.5$)不变, 且满足一定圆极化要求的前提下进行。

1 单元天线的优化设计

优化的目标是: 单元天线轴向辐射, 具有较高的增益、良好的圆极化辐射、较好的波瓣对称性以及与馈电同轴有良好的阻抗匹配。通过理论分析和数值仿真发现: 螺旋圈数 N 一定时, 螺旋半径 r 、螺距角 α 、横杆高度 h 是影响螺旋线上电流分布的主要因素, 因此通过调节这 3 个参数可以实现其辐射特性的改善。

优化方法是: 以方向性系数、轴比及 S_{11} 为优化目标, 以螺旋半径、螺距角、横杆高度为优化变量, 利用数值仿真软件强大的参数扫描、参数优化工具以及结果后处理模板来完成优化任务。在优化过程中, 先以方向性系数和轴比为目标, 然后再通过调节同轴馈线完成对 S_{11} 的优化。

在开始优化之前, 需先给出各个参数的取值范围。为了实现轴向辐射, 同时考虑到螺旋单元天线的横向尺寸不能过大, 我们将螺旋半径的取值限制在 $0.125\lambda \leq r \leq 0.17\lambda$ (λ 为工作波长) 内; 考虑到其轴向尺寸不能太大, 同时又考虑到螺距角及横杆高度过小将降低螺旋天线的辐射效率等问题, 我们将螺距角、横杆高度的取值分别限定在 $4^\circ \leq \alpha \leq 9^\circ$, $0.03\lambda \leq h \leq 0.08\lambda$ 范围内, 在优化过程中, 对馈电同轴没有限制条件。

由于这是一个多变量、多目标的优化问题, 各个目标之间存在着相互制约的关系, 因此需在各个目标之间进行折中考虑后方可得到螺旋天线的结构参数。本文设计的阵列天线工作于 L 波段, 中心频率为 1.57 GHz, 我们将短螺旋天线的结构尺寸选取为: 螺旋半径 r 为 28.5 mm, 螺距角 α 为 8° , 横杆高度 h 为 10 mm, 螺旋导线直径 d 为 3.6 mm, 螺旋圈数 N 为 1.5。在这一结构尺寸下, 该短螺旋天线在轴向辐射, 增益为 9.9 dBi, 轴向轴比值为 1.2, 实现了良好圆极化辐射的同时提高了单元天线的增益; 图 1 示出了其在 $\phi=0^\circ$ 平面上的方向图, 可见, 该单元天线具有良好的轴对称性, 通过拟合, 可用函数来近似其在上半空间的归一化方向图

$$f_r(\theta, \phi) = -0.54\theta^4 + 2.76\theta^3 - 3.98\theta^2 + 0.06\theta + 2.78 \quad (1)$$

* 收稿日期: 2008-12-27; 修订日期: 2009-05-06
作者简介: 邓遥林(1981—), 女, 硕士生, 主要从事天线设计研究; yaolindeng168@126.com。

式中: θ 是俯仰角。

2 阵列布局的优化设计

本实验将采用激励调节法^[5]来优化阵列天线的方向性系数。所谓激励调节法,是指在单元方向性及各阵元的空间位置给定后,求出各单元的激励幅度和相位,以使该阵列天线在指定方向上获得最大的方向性系数。激励优化法是优化方向性系数最一般的方法,它对任何形式的阵列均适用,该方法的成功在于能用 2 个二次型之比来表达方向性系数,这样能够通过处理特征值来获得最佳的方向性系数。

2.1 理论分析

结合实际工程需要,阵列天线的口径半径定为 160 mm,本文仅讨论阵元沿圆环等角排列的单圆环阵之布局优化问题。对均匀单圆环阵而言,阵列布局的设计归结为对单元所在圆环半径 R ,单元数 N 及单元激励 I (幅度和相位)的设计。

螺旋单元天线的旋转半径及其导线半径分别为 28.5 mm 和 1.8 mm,由于螺旋单元天线不能超出接地板^[6],因此圆环半径 R 的最大值约为 130 mm。单元数一定时,圆环阵的方向性系数将随着圆环半径 R 的减小而降低,因此,本文计算了圆环半径 R 值在 120~130 mm 范围内的 N 元均匀单圆环阵列天线的最大方向性系数及对应的最佳激励,结果示于表 1~3 中,表中同时给出了单元的轴向间距(圆环阵列天线的主射方向为轴向)。

由表 1~3 中的数据不难得出:(1)当阵列天线主射方向为轴向,阵元沿圆周均匀分布时,阵元的最佳激励为等幅同相,这一结论与单元的方向性、圆环半径及单元数无关;(2)圆环半径一定时,阵列天线的最大方向性系数 D_{\max} 随着单元数 N 的增加而增大,当 N 增大到一定数量时, D_{\max} 保持不变,对于工作频率为 1.57 GHz 的 320 mm 口径而言, N 为 8 时 D_{\max} 达到最大值;(3) N 一定时, D_{\max} 随着 R 的增大而增大。

2.2 阵元位置及激励的确定

由于理论计算没有考虑接地板及单元间的互耦对阵列天线方向性系数的影响^[7],因此结果与实际情况之间可能存在一定的差异,为此,我们在理论分析结果的基础上进行了初步的数值模拟。综合考虑后,选定圆环半径 R 为 125 mm,单元数 N 为 6,单元沿圆周等间距排列,轴向间距为 0.69λ ,阵元为等幅同相激励,天线方向性系数的理论值为 16.03 dBi。

3 数值模拟

采用时域有限积分数值软件对阵列天线进行了数值计算,阵列天线的结构示意图如图 2 所示,取输入同轴内导体半径 70 mm,外导体半径 90 mm,径向线两平行板间距 40 mm。

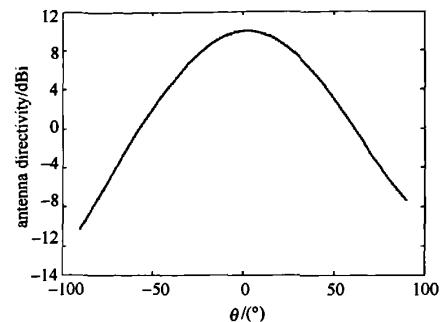


Fig. 1 Radiation pattern of the low-profile helix

图 1 短螺旋天线辐射方向图

表 1 圆环半径为 120 mm N 元圆环阵最大方向性系数及最佳激励

Table 1 Maximum directivity and corresponding element excitation of N element circular array with a radius of 120 mm

N	D_{\max}	optimal excitation $I_m e^{j\alpha_m}$	circumferential spacing/ λ
4	36.14	$I_1 = \dots = I_6 = 9.03, \alpha_1 = \dots = \alpha_6 = 0$	0.99
6	38.67	$I_1 = \dots = I_6 = 6.45, \alpha_1 = \dots = \alpha_6 = 0$	0.66
7	38.70	$I_1 = \dots = I_6 = 5.53, \alpha_1 = \dots = \alpha_6 = 0$	0.56
8	38.71	$I_1 = \dots = I_6 = 4.84, \alpha_1 = \dots = \alpha_6 = 0$	0.49
12	38.71	$I_1 = \dots = I_6 = 3.21, \alpha_1 = \dots = \alpha_6 = 0$	0.33

表 2 圆环半径为 125 mm N 元圆环阵最大方向性系数及最佳激励

Table 2 Maximum directivity and corresponding element excitation of N element circular array with a radius of 125 mm

N	D_{\max}	optimal excitation $I_m e^{j\alpha_m}$	circumferential spacing/ λ
4	36.77	$I_1 = \dots = I_6 = 9.19, \alpha_1 = \dots = \alpha_6 = 0$	1.03
6	40.10	$I_1 = \dots = I_6 = 6.68, \alpha_1 = \dots = \alpha_6 = 0$	0.69
7	40.14	$I_1 = \dots = I_6 = 5.73, \alpha_1 = \dots = \alpha_6 = 0$	0.59
8	40.15	$I_1 = \dots = I_6 = 5.02, \alpha_1 = \dots = \alpha_6 = 0$	0.51
12	40.15	$I_1 = \dots = I_6 = 3.38, \alpha_1 = \dots = \alpha_6 = 0$	0.34

表 3 圆环半径为 130 mm N 元单圆环阵最大方向性系数及最佳激励

Table 3 Maximum directivity and corresponding element excitation of N element circular array with a radius of 130 mm

N	D_{\max}	optimal excitation $I_m e^{j\alpha_m}$	circumferential spacing/ λ
4	37.20	$I_1 = \dots = I_6 = 9.30, \alpha_1 = \dots = \alpha_6 = 0$	1.08
6	41.89	$I_1 = \dots = I_6 = 6.98, \alpha_1 = \dots = \alpha_6 = 0$	0.72
7	41.97	$I_1 = \dots = I_6 = 5.99, \alpha_1 = \dots = \alpha_6 = 0$	0.62
8	41.98	$I_1 = \dots = I_6 = 5.24, \alpha_1 = \dots = \alpha_6 = 0$	0.54
12	41.98	$I_1 = \dots = I_6 = 3.52, \alpha_1 = \dots = \alpha_6 = 0$	0.36

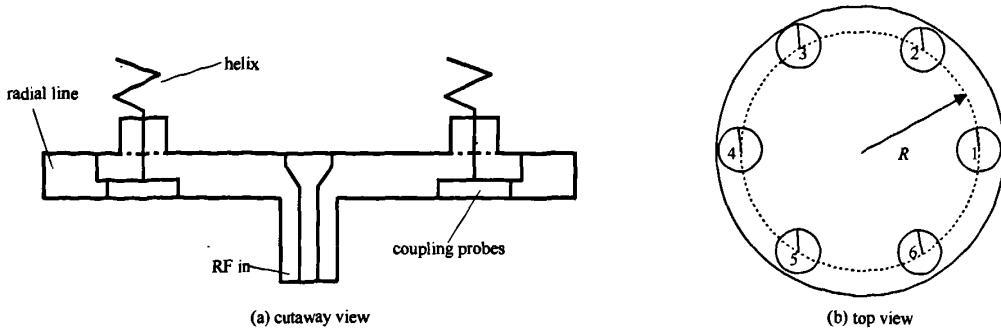


Fig. 2 Structure of helical array antenna fed from radial waveguide

图2 径向线螺旋阵列天线基本结构

3.1 耦合特性

本文采用的探针为L型电磁组合探针^[8],其结构如图3所示。通过改变探针下端圆台的半径 r 和高 h 可以实现探针耦合量的调节。

通过对耦合探针的调节,可以实现对耦合量和反射的调节^[9-11]。经过模拟计算,各耦合输出口的耦合量随频率的变化示于图4中。由图4可见:在1.45~1.70 GHz的频带范围内,各耦合口可以获得近似相等的耦合量,幅度差小于0.085 dBi,各耦合口耦合量的均匀分布可以使得阵列天线获得较高的方向性系数。

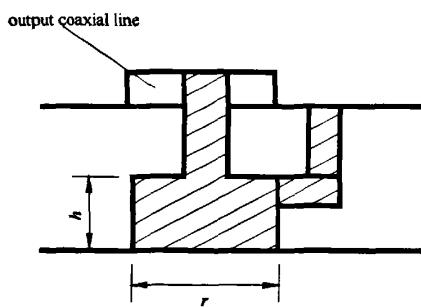


Fig. 3 Structure of L-shaped coupled probe

图3 耦合探针结构图

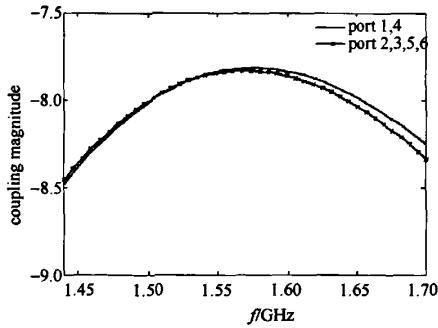


Fig. 4 Coupling magnitude vs frequency

图4 耦合量随频率的变化

3.2 辐射特性

采用时域有限积分算法软件对阵列天线进行了整体的模拟计算,计算得到的中心频率1.57 GHz下的辐射方向图($\phi=0^\circ$ 平面)如图5所示。可见,在1.57 GHz下,阵列天线的增益可达14.4 dBi,对应的口径效率为99.2%,轴向轴比值为1.15。表4还给出了阵列天线的方向性系数、轴向轴比值、口径效率随频率的变化。可以看出,在1.5~1.7 GHz的频带范围内阵列天线的增益大于13.92 dBi,口径效率大于97.6%,轴向轴比值小于1.35。最后,整个阵列天线的反射损耗示于图6中。由图可见,在1.5~1.7 GHz的频带范围内反射系数小

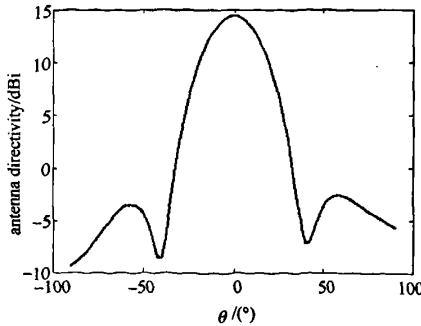


Fig. 5 Simulated directivity pattern of the array antenna

图5 中心频率下阵列天线的辐射方向图

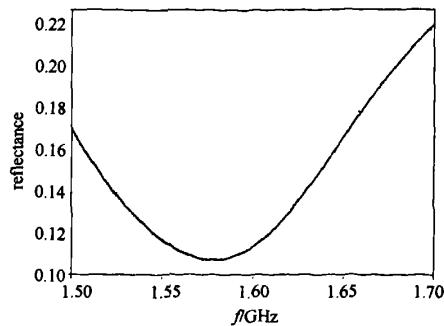


Fig. 6 Simulated reflectance vs frequency

图6 阵列天线的反射损耗随频率的变化

于 0.22, 在不考虑损耗的情况下, 辐射效率大于 94.6%。

4 结 论

本文利用数值软件的参数优化工具实现了短螺旋单元天线增益的提高, 通过激励调节法对阵列布局(单元数、单元间距及激励)进行了优化设计, 并采用数值模拟软件对阵列天线进行了数值计算, 结果表明, 天线在中心频率上的口径效率可达 99%, 在 1.5~1.7 GHz 的频率范围内, 口径效率大于 97%, 实现了口径效率的提高。已有分析结果表明, 对于 L 波段 320 mm 的口径, 当圆环阵的单元数增加为 8 个时, 阵列天线的方向性不再增强, 但对我们对 8 元圆环阵列天线进行数值仿真时发现其增益较 6 元阵有所降低, 这主要是因为理论分析时没有计及单元间的互耦, 单元间较强的互耦使得单元的波瓣图发生变化, 单元的阵中增益降低, 从而导致了阵列天线增益的恶化。为了进一步提高该口径天线的口径效率, 可利用螺旋天线间互耦的一些特性, 通过对 8 元单圆环阵列天线进行布局设计来减小单元间的互耦, 从而提高单元的阵中增益。

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 Qingxiang, Li Xiangqiang, Yuan Chengwei, et al. Theoretical analysis and numerical simulation of high power helical array antenna fed from double-layered radial waveguide. *Acta Electronica Sinica*, 2005, 33(12): 2231-2234)
- [2] Susuki Y, Hirokawa J. Development of planar antennas[J]. *IEEE Trans Commun*, 2003, 3: 909-924.
- [3] 康行健. 天线原理与设计[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1993. (Kang Xingjian. Principles and design of antennas. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1993)
- [4] Nakano H, Takeda H, Honma T, et al. Extremely low-profile helix radiating a circularly polarized wave[J]. *IEEE Trans on Antenna and Propagation*, 1991, 39(6): 754-756.
- [5] Optimization techniques for antenna arrays[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1971, 59(12): 1664-1674.
- [6] Kraus J D. *Antennas: For all applications*[M]. Beijing: Electronics Industry Press, 2004: 21-28.
- [7] Antonije. Enhancing the gain of helical antennas by shaping the ground conductor[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2006, (5): 138-140.
- [8] 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. (Zhao Liu, Zhang Jianqiong, Wu Xiaojiang, et al. Theoretical analysis and numerical simulation of 4-element rectangular helical array antenna fed from radial line. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, 19(11): 1869-1872)
- [9] 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 Xiangqiang, Liu Qingxiang, Zhao Liu, 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)
- [10] Nakano H, Takeda H, Kitamura Y, et al. Low-profile helical array antenna fed from a radial waveguide[J]. *IEEE Trans on Antennas and Propagation*, 1992, 40(3): 279-284.
- [11] Nakano H, Okuzawa S, Ohishi K, et al. A curl antenna[J]. *IEEE Trans on Antennas and Propagation*, 1993, 41(11): 1570-1575.

Optimization of L-band helical array antenna fed from radial waveguide

Deng Yaolin, Liu Qingxiang, Li Xiangqiang, Zhang Jianqiong
(College of Science, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: This paper describes a new antenna for realizing the directional radiation of helical array antenna fed from radial waveguide. The configuration parameters of the element and the layout of array antenna are optimized with the purpose of enhancing the aperture efficiency of the antenna. A circular array antenna composed of 6 elements with a frequency band of 1.5 GHz to 1.7 GHz is designed and simulated. The numerical simulation shows that at 1.57 GHz, the aperture efficiency reaches 99%, and the axial ratio at the normal direction is 1.15. In the range of 1.5 GHz to 1.7 GHz, the aperture efficiency is greater than 97%, the axial ratio is less than 1.35.

Key words: array antenna; optimization; aperture efficiency; time domain finite integral; excitation adjustment method

表 4 主要频点下阵列天线的辐射特性
Table 4 Simulated radiation characteristics at main frequency point

frequency /GHz	gain /dB	axial ratio	aperture efficiency/%
1.50	13.92	1.35	97.6
1.65	14.91	1.09	101.3
1.70	15.01	1.10	97.7

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),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>