

高功率圆极化径向线螺旋阵列天线研究

李相强 刘庆想 赵柳 王欣

(西南交通大学理学院)

摘要 从理论、模拟和实验等角度详细研究了高功率圆极化径向线螺旋阵列天线。从该阵列天线的设计思想出发，设计了中心频率为 4.0 GHz 的阵列天线，特别提出了螺旋单元天线的电磁组合耦合馈电，并对阵列天线进行了模拟和实验两方面的验证。结果表明使用阵列天线实现高功率微波定向辐射是可行的。

关键词 阵列天线 螺旋天线 径向线 圆极化 高功率微波

一、引言

辐射系统是整个微波系统的终端体现，随着高功率微波技术的迅速发展，高功率微波辐射技术日益成为一项重要的研究课题。

与传统的微波系统相比，高功率微波系统有其自身的特点。比如微波源产生的高功率微波多为旋转轴对称模^[1]，不能直接辐射；高功率微波要求其辐射天线必须能承受很高的功率；同时，高功率微波一般使用大尺寸输出，系统内部应处于真空状态且不能有介质的存在等。高功率微波的这些特点要求我们研究与之相适应的高功率微波辐射技术。各国学者在这方面已做过许多工作，归纳起来有波导模式转换器加辐射喇叭^[2]、Vlasov 天线^[3]、COBRA 天线^[4]等。然而，辐射效率不高、辐射特性不理想、口径效率低、功率容量不高、系统笨重等其中的一些缺点限制了它们的应用。

阵列天线是一种特殊的天线型式，它易于实现高增益、高效率和高功率容量，采用恰当的馈电波导可以实现天线轴向尺寸的小型化，另外使用相控阵技术还可以实现波束在空间的扫描。可见，阵列天线可以满足高功率微波的许多要求，将阵列天线应用于高功率微波领域具有重要的意义。

基于这一背景，我们在日本学者研究的基础上^[5]提出了一种高功率圆极化径向线螺旋阵列天线。本文阐述该阵列天线的设计思想与工作原理，设计一个中心频率为 4.0GHz 的天线模型，同时从模拟和实验两个角度对该阵列天线进行验证。

二、阵列天线设计思想

根据引言中的分析和实际需要可知，我们的设计目的是探索一种可以实现高效率、高功率容量、小型化的圆极化阵列天线。为此，我们确定了如下的阵列天线设计思想：采用轴向模工作的短螺旋天线作为阵列天线的辐射单元，以使天线在轴向辐射圆极化波；采用径向线作为馈电波导，将辐射单元按一定的方式排列在顶板上，实现全部单元的单波导馈电，从而简化馈电网络，同时径向线与短螺旋天线配合，可以显著地降低整个天线的轴向尺寸；从径向线到螺旋天线的馈电通过电磁组合耦合来实现，耦合探针直接固定在径向线上，避免探针固定时介质的引入，提高天线功率容量；通过调节电磁耦合的耦合量和转动短螺旋单元天线实现辐射单元激励幅度和激励相位的改变；采用天线罩将阵列天线密封，并使其处于真空状态，进一步提高功率容量。

图 1 为我们将要设计的高功率圆极化径向线螺旋阵列天线示意图。高功率微波由同轴波导输入，经过三个不同的梯形截面模式变换器转换成径向线内行波；L型电磁组合耦合探针从径向线中提取能量激励短螺旋天线；上述耦合激励与螺旋线单元天线沿径向线呈环状排列，形成同心圆环阵列天线。顶部采用介质罩进行真空密封，实现高功率微波的圆极化辐射。

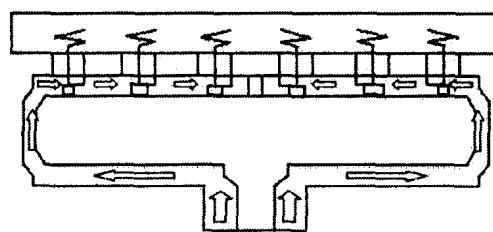


图 1 高功率圆极化径向线螺旋阵列天线

三、阵列天线设计

根据上述阵列天线的设计思想，我们设计中心频率为 4.0GHz 的阵列天线。天线设计涉及内容较多，为突出重点，本文主要介绍单元天线设计、电磁组合耦合探针设计和阵列布局确定三个主要方面。径向线两平行板间距取为 20mm (0.27λ)。

1. 单元天线设计

高功率圆极化径向线螺旋阵列天线采用短螺旋天线作为辐射单元，短螺旋天线是指少匝数和小螺距角相结合的螺旋天线。日本学者在研究中发现，只要设计合理，这种天线是很好的圆极化辐射器^[6]。

基于上述原理并结合工程加工要求，我们采用有限元方法模拟设计了如图 2 所示的短螺旋天线。天线结构尺寸为：螺旋半径 R = 13mm，螺旋圈数 N = 1.5，螺距 S = 8.2mm，螺旋导线半径 r = 1.5mm，弯曲处高度 h = 4.5mm。此短螺旋天线在不同方位平面的方向图和轴比示于图 3 中。可见，天线轴对称性良好，圆极化程度很高，可以作为阵列天线的单元。天线方向性系数为 9.6dB，方向图在上半空间可用 $\cos^{1.7} \theta$ 来近似。

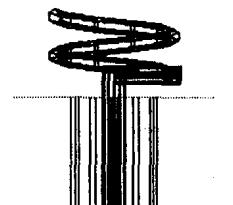


图 2 短螺旋天线示意图

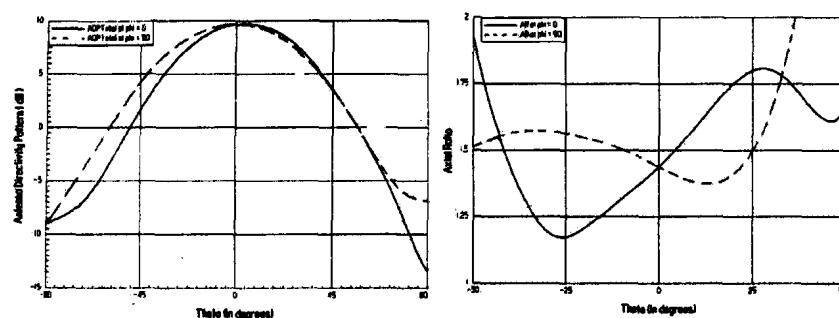


图 3 短螺旋天线方向图和轴比

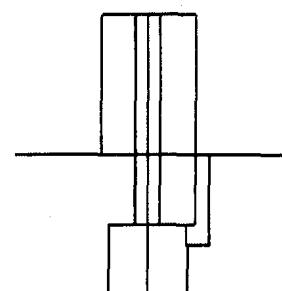


图 4 L 型电磁组合探针

2. 电磁组合耦合探针设计

日本学者研究的径向线螺旋线阵列天线采用电探针从径向线波导中提取能量，电探针的固定必然引入介质套，导致其功率容量的降低，因而它不能应用与高功率微波领域。

为解决这一问题，我们特别提出使用电磁组合耦合探针代替电探针，L 型电磁组合

耦合探针结构如图 4 所示。可以看出，这种探针可以直接固定在径向线上，避免了介质套的引入，从而提高了阵列天线的功率容量。通过改变探针下端的圆柱和 L 型连接环的尺寸可以实现探针耦合量的调节，该探针典型的反射和耦合特性示于如图 5 中。

3. 阵列布局的确定

由 M 个圆环组成的圆形阵列天线的方向性系数定义为^[8]：

$$D(\theta_0, \phi_0) = \frac{4\pi |F(\theta_0, \phi_0)|^2}{\int_0^{2\pi} d\phi \int_0^\pi |F(\theta, \phi)|^2 \sin \theta d\theta} \quad (1)$$

$F(\theta, \phi)$ 是阵列天线的方向图，可以由下式给出：

$$F(\theta, \phi) = E_0(\theta, \phi) \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^{N_m} I_{mn} e^{j[k\rho_m \sin \theta \cos(\phi - \frac{2\pi n}{N_m}) + \delta_{mn}]} \quad (2)$$

其中 $\delta_{mn} = -k\rho_m \sin \theta_0 \cos(\phi_0 - \frac{2\pi n}{N_m})$ ， $E_0(\theta, \phi)$ 是单元的方向

图， ρ_m 是从中心到第 m 圈的距离， N_m 是第 m 圈的单元个数，

I_{mn} 和 δ_{mn} 分别是第 m 圈第 n 个单元的激励幅度和相位。这里我们只研究阵列天线辐射方向为轴向的情况，故各单元激励相位相同，这一点可以通过机械旋转螺旋线单元天线来实现，不需要引入新的相移器。

通过对不同阵列布局形式的理论计算和数值模拟，我们选定阵列天线由三圈圆环组成，各圈半径分别为 59mm、118mm 和 177mm，螺旋个数分别为 8、16 和 24，天线口径为 460mm，阵列布局如图 6 所示。若各单元激励幅度与相位均相同，由式 (1) 可以计算出天线方向性系数为 24.7dB。

四、阵列天线模拟和实验验证

根据上述设计，我们得到了一个高功率圆极化径向线螺旋阵列天线模型。为了验证这一天线的可行性，我们对它进行了数值模拟和实验研究。数字模拟使用的是有限元模拟软件；天线反射特性的测量使用 HP8093 网络分析仪，天线辐射特性的测量是在 $22 \times 15 \times 8m^3$ 的微波暗室中进行的，天线测试仪为 HP8530c。

1. 天线反射特性

高功率圆极化径向线螺旋阵列天线反射损耗的消减，是一项重要的工作，主要包括同轴—径向线模式转化器的设计、探针插入所引起反射的消除、探针和单元天线的匹配等，本文由于篇幅所限为作

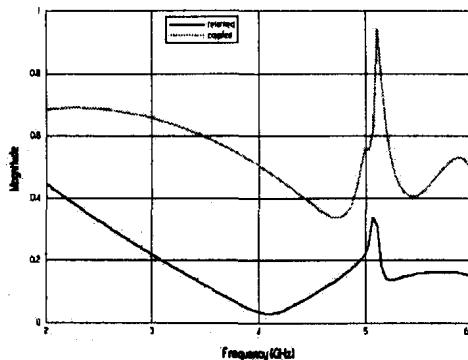


图 5 圆柱型电磁组合探针典型反射和耦合特性

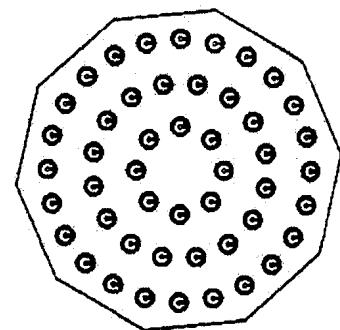


图 6 阵列天线布局

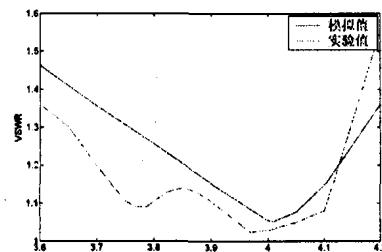


图 7 阵列天线驻波比

详细阐述。设计好的阵列天线驻波比示于图 7 中。

由图可见，模拟值与实验值吻合良好，在 3.6~4.2GHz 的频带范围内模拟的天线驻波比小于 1.5，实验中驻波比小于 1.55。

2. 天线辐射特性

天线辐射特性是我们关注的重点，包括方向图、增益、轴比、口径效率等，实验测量采用的是标准线极化天线比较法^[9]。图 8 示出了 4.0GHz 下天线的辐射方向图，图 9 总结了天线增益、口径效率和轴比随频率的变化。

结果表明：在 4.0GHz，模拟与实验得到的半功率波瓣宽度分别 10.3° 和 9.6°，副瓣电平分别为 -15.3dB 和 -13.0dB，模拟与实验吻合较好；在 3.6~4.2GHz 的频带范围内，模拟得到的天线口径效率大于 75%，实验测量口径效率在 57.2%~77.5% 之间，天线轴比值均在 1.65dB 以下。

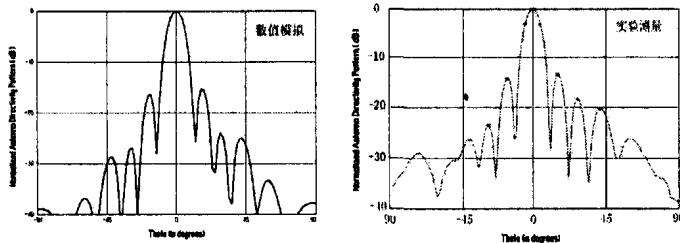


图 8 4.0GHz 下天线辐射方向图

表 1 天线增益、口径效率和轴比随频率的变化

频率 (GHz)		3.6	3.7	3.8	3.9	4.0	4.1	4.2
数值	增益 (dB)	23.60	23.89	24.12	24.32	24.49	24.67	24.86
模拟	口径效率 (%)	76.3	77.2	77.1	76.7	75.8	75.2	74.9
实验	增益 (dB)	23.67	23.64	23.42	23.68	24.12	24.14	23.69
	口径效率 (%)	77.5	72.9	65.6	66.3	69.6	66.6	57.2
测量	轴比 (dB)	1.27	1.60	1.64	1.50	1.40	1.48	1.48

五、结论

采用理论分析、数值模拟和实验验证的方法设计并验证了一个高功率圆极化径向线螺旋阵列天线。数值模拟与实验测量结果比较吻合，表明：使用阵列天线实现高功率微波定向辐射是可行的，并且具有尺寸小、效率高等优点。该天线设计较为复杂，许多问题有待进一步研究，特别是天线的功率容量有待进一步分析。

参考文献

- [1] James Benford and John Swigle. High power microwave [M], Artech House, Inc., Norwood, 1992.
- [2] Yang S W, Li H F. Numerical modeling of 8mm TM₀₁-TE₁₁ mode converter [J]. Int. J. Infrared and Millimeter waves, 1996, 17(11):1935-1943.
- [3] Vlasov S N and Orlova I M. Quasioptical transformer which transforms the waves in a waveguide having a circular cross section into highly directional wave beam [J]. Radiofizika, 1974, 17(1): 148-154.
- [4] Courtney C C, Baum C E. The coaxial beam-rotating antenna (COBRA): Theory of operation and measures performance [J]. IEEE Trans. on antenna and propagation 2000, 48(2), 299-309.
- [5] H. Nakano, H. Takeda, Y. Kitamura, et al. Low-profile helical array antenna fed from a radial waveguide. IEEE Trans. On Antennas and Propagation, 1992, 40(3): 279-284.
- [6] H. Nakano, H. Takeda, T. Honma, et al. Extremely Low-profile Helix Radiating a Circularly Polarized Wave. IEEE Trans. On Antennas and Propagation, 1991, 39(6): 754-756.

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>