

高功率双层径向线螺旋阵列天线 理论分析与数值模拟

刘庆想¹, 李相强¹, 袁成卫^{1,2}, 赵柳¹, 王欣¹, 李君¹

(1. 西南交通大学理学院, 四川成都 610031; 2. 国防科技大学光电科学与技术学院, 湖南长沙 410073)

摘要: 研究了一种高功率双层径向线螺旋阵列天线. 论文首先介绍该阵列天线的工作原理, 然后从工作原理出发, 设计中心频率为 4.0 GHz 的高功率双层径向线螺旋阵列天线, 提出并研究了螺旋单元天线的磁耦合馈电, 最后用有限元算法软件对阵列天线进行了数值模拟. 模拟结果表明: 该口径为 320mm 的天线在中心频率上可获得 21.13dBi 的增益, 口径效率可达 72.3%, 在 $-12^\circ \leq \theta \leq 12^\circ$ 的范围内轴向比值小于 1.55; 在 3.8GHz~4.2GHz 的频率范围内增益大于 20.68dBi, 口径效率大于 69%, 天线轴向比值小于 1.7.

关键词: 螺旋天线; 径向线; 阵列天线; 磁探针耦合; 高功率微波

中图分类号: TN811, TN814 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2005) 12 2231-04

Theoretical Analysis and Numerical Simulation of a High Power Helical Array Antenna Fed from Double Layer Radial Waveguide

LIU Qing-xiang¹, LI Xiang-qiang¹, YUAN Cheng-wei^{1,2}, ZHAO Liu¹, WANG Xin¹, LI Jun¹

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

2. College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract: This paper describes a new antenna to realize the directional radiation of high power microwave helical array antenna fed from double layer radial waveguide. The feed wire of each helix is connected with an H coupled probe inserted into a radial waveguide, and excited by a TEM wave between the two parallel plates of the waveguide. Helices and probes are arranged on the upper plate to form a circular array. This antenna accepts directly an azimuthally symmetric output of a HPM source and radiates a high gain pattern with a boresight peak. The use of H coupled probes makes the array antenna compatible with the intense electric fields associated with high power microwave sources. In addition, the array antenna has a simple structure and can project circular polarized electric field. In this paper, the fundamental theory of function is presented; an array antenna for a frequency band of 3.8GHz to 4.2GHz is designed and simulated. At 4.0GHz, the calculated aperture efficiency shows a high value of 72.3% and the axial ratio value at the normal direction is of 1.55. In the range of 3.8GHz to 4.2GHz, the aperture efficiency is over 69% and the axial ratio is below 1.7.

Key words: helical antenna; radial waveguide; array antenna; H couple probe; high power microwave

1 引言

辐射系统是整个微波系统的终端体现, 高功率微波辐射技术的优劣直接决定了高功率微波系统的性能. 与传统的微波系统相比, 高功率微波系统有其自身的特点.

首先, 当前多数高功率微波源具有旋转轴对称结构, 它们产生的微波模式多是圆波导 TM_{0n} 模或同轴 TEM 模^[1]. 这些模式没有确定的极化方向, 其辐射最大方向不在轴线上, 而是呈不理想的空心圆锥状, 若直接激励传统天线作为输出, 将会有能量分散、增益低、旁瓣电平等高问题. 其次, 高功率微波要求其辐射天线必须能承受很高的功率, 有较高的功率容量. 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.

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^[2,3]、Vlasov 天线^[4]和模式变换天线(如 COBRA 天线^[5])等. 它们通过模式转换、末端改变形状或调节相位等方法改变了场的旋转轴对称性, 实现了高功率微波的定向辐射. 这里我们研究另一种可以实现高功率微波定向辐射的方法——径向线螺旋阵列天线的方法.

径向线螺旋阵列天线是在研究卫星电视广播信号接收过程中发展起来的^[6]. 该天线由径向行波激励, 采用短螺旋天线

作为阵列天线的辐射单元,利用电探针耦合给螺旋线单元天线馈电,螺旋线单元天线的辐射在空间进行功率合成,从而实现阵列天线轴向的圆极化辐射.然而电探针的固定必然引入介质套,导致其功率容量的降低.

基于这一背景,我们提出了一种高功率圆极化径向线螺旋阵列天线.它有两种基本结构,即高功率双层径向线螺旋阵列天线和高功率单层径向线螺旋阵列天线,这是根据馈电系统使用的径向线个数划分的.天线使用磁探针耦合代替电探针耦合,探针可以直接固定在径向线顶板上,避免了介质套的引入,从而提高了阵列天线的功率容量,使其符合高功率微波的应用要求.

2 高功率双层径向线螺旋阵列天线的基本原理

高功率双层圆极化径向线螺旋阵列天线的设计思想是:通过同轴径向线模式转换器实现从同轴馈电到径向线 TEM 模激励的转换,采用短螺旋线天线作为阵列的单元天线,利用磁耦合从径向线波导中提取能量以给螺旋线单元天线馈电,通过调节螺旋线单元天线的相位和磁耦合的耦合量使天线口径场相位与幅度分布均匀,从而提高天线口径效率和功率容量,实现微波在轴向的圆极化辐射.

阵列天线的工作原理为(见图1):高功率微波由同轴波导输入,经过具有梯形截面的导体环转换成径向线 TEM 模由内向外传播,经过径向线到大同

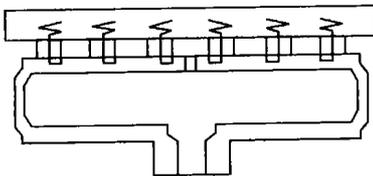


图1 高功率双层径向线螺旋阵列天线基本结构

轴波导模式转换器和大同轴波导到径向线的模式转换器来实现径向线 TEM 波由外向内传输,采用 L 型磁探针耦合由小同轴耦合波导输出,耦合波导的内导体与螺旋线单元天线相连接激励螺旋线单元天线.上述耦合激励与螺旋线单元天线沿径向线呈环状排列,形成等间距圆口径平面阵.单元天线的辐射在空间进行功率合成实现微波的轴向圆极化辐射.最后整个天线用介质罩密封,使其处于真空状态.

3 高功率双层径向线螺旋阵列天线的设计

根据上述阵列天线的工作原理,我们首先设计天线的阵元-螺旋线单元天线,然后确定等间距的阵列天线布局.根据实际工程需要,我们选定阵列天线的中心频率为 4.0GHz(工作波长 $\lambda = 75\text{mm}$),同轴波导输入口的内导体半径 $a_1 = 20\text{mm}$,外导体半径 $b_1 = 45\text{mm}$.当径向线两平行板间距离与波长相比足够小时,其间传播 TEM 波^[7],所以我们取间距 $S_m = 20\text{mm} \approx 0.27\lambda$.

3.1 螺旋线单元天线设计

早在 1947 年,美国科学家 John D Kraus 就在实验中发现螺旋天线可在轴向辐射圆极化波,但他预言短螺旋天线不能辐射理想的圆极化^[8].1991 年,日本学者 H Nakano 等人研究发现短螺旋天线同样是很好的圆极化辐射器,他们采用的方法是在螺旋线电流分布的第一个最小值点处将螺旋截断^[9].短螺旋天线轴向尺寸很短,具有较强的实用价值.因此,我们

用有限元计算方法研究了少匝数和小螺旋角相结合的短螺旋天线.

短螺旋天线结构如图 2

所示,优化后的结构尺寸为:

螺旋半径 $R = 13\text{mm}$,螺旋线导线半径 $r = 1.5\text{mm}$,螺旋圈数 $N = 1.5$,螺距 $S = 9\text{mm}$ (螺旋角约为 6.5°),弯曲处高度 $h =$



图2 短螺旋天线结构示意图

4.5mm.在这一结构尺寸下,该短螺旋天线在轴向辐射,具有较好的空间轴对称性,增益为 8.5dBi.图3示出了其在平面上的辐射特性.

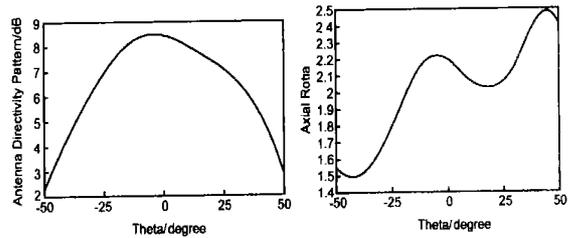


图3 短螺旋天线辐射方向图和轴比

文献[8]指出:当一个圆极化天线旋转时,天线辐射的相位变化(在整个空间),恰好正比于天线的旋转角度.基于这一原理,绕轴旋转短螺旋天线将等角度改变天线的辐射相位,而没有其它可以觉察的影响,因此可以使用这种短螺旋天线达到阵列单元辐射相位相同的目的.

3.2 阵列天线布局确定及方向性系数推导

下面我们确定一个分布均匀的阵列天线布局,包括阵列单元的数目和间距.

把圆形口面分割成若干同心圆环,相邻圆环的间距为 d ,第一圈圆环距中心距离也为 d ,则第 m 个圆环半径为:

$$a_m = md \quad (1)$$

同一圆环上相邻单元沿圆环的间距也为 d ,则

$$2\pi a_m = 2\pi md = N_m d \quad (2)$$

式中 N_m 为第 m 个圆环上的单元数目.为了避免栅瓣的出现,要求单元间距小于工作波长,综合考虑后我们选取单元间距 $d \approx 0.6\lambda = 45\text{mm}$.通过式(1)、(2)计算,阵列天线可由三圈组成,各圈距中心位置分别为 40mm、85mm 和 130mm,单元个数分别为 6、12、18.

由 M 个圆环组成的圆形阵列天线的方向性系数定义为^[10]:

$$D(\theta_0, \phi_0) = \frac{4\pi |F(\theta_0, \phi_0)|^2}{\int_0^\pi \int_0^{2\pi} |F(\theta, \phi)|^2 \sin\theta d\theta d\phi} \quad (3)$$

$F(\theta, \phi)$ 是阵列天线的方向图,可以由下式给出:

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

其中 $\delta_{mn} = -k \rho_m \sin\theta \cos(\phi_0 - 2\pi n/N_m)$

其中 $E_0(\theta, \phi)$ 是单元的方向图,对于上述短螺旋天线,我们用 $\cos^{1.7}$ 来近似; ρ_m 是从中心到第 m 圈的距离; k 为波数; I_{mn} 和 δ_{mn} 分别是第 m 圈第 n 个单元的激励幅度和相位,我们假设螺

旋线单元天线激励幅度相同与激励相位均相同. 则由式(3)可计算出天线方向性系数为 22.36dBi.

4 磁探针耦合特性分析

采用磁探针代替电探针耦合是高功率圆极化径向线螺旋阵列天线的一大特点. 磁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. 在形式上采用磁探针可以使之与径向线顶板固定在一起, 省去了使用电探针时的介质支撑, 因而提高了阵列天线的功率容量.

为了验证磁探针代替电探针的可行性, 在 4.0GHz 下我们对两者的耦合特性进行了分析比较. 磁探针结构如图 4(a), 电探针结构如图 4(b).

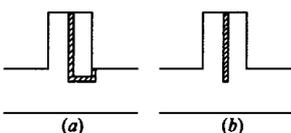


图 4 磁探针与电探针示意图

为了和前面设计的螺旋线单元天线相匹配, 取同轴耦合器的内导体半径 $c = 1.5\text{mm}$, 外导体半径 $d = 15\text{mm}$. 电探针内导体半径为 1.5mm; 磁探针内导体半径也为 1.5mm, 与径向线的连接环采用长方体结构, 宽为 5mm, 高为 3mm.

我们选取一固定的耦合系数(耦合电场幅值与入射电场幅值之比), 模拟比较两个探针达到该耦合系数所需的探入深度、造成的反射系数(反射电场幅值与入射电场幅值之比)、系统中内最大电场幅值, 比较结果总结于表 1 中. 从表中分析可以看出: 达到相同的耦合系数时, 磁探针引起的反射系数小于电探针; 同时使用电探针耦合时的最大电场幅值远大于使用磁探针耦合时的情况, 前者存在电场的局部集中, 导致功率容量不高, 因而使用磁探针可以提高系统的功率容量. 所以利用磁探针代替电探针进行耦合不仅可以解决固定问题, 还有其它许多优点, 是可行的.

表 1 磁探针与电探针耦合特性比较

	磁探针	电探针
Coupling factor	0.45	0.45
Insert length/mm	2	14.5
Reflectance	0.119	0.151
Max. electric field/ $\text{V}\cdot\text{m}^{-1}$	1400	3400

5 阵列天线数值模拟

5.1 磁探针探入深度的确定

所设计的阵列天线要求天线口径场分布均匀, 所以每个磁探针从径向线中提取的能量应该相同. 我们用整个天线的 1/6 进行了模拟, 各耦合探针的探入深度 h 、耦合波导输出出口的耦合量 I 和耦合相位 θ 总结于表 2 中, 其中入射波功率为 1W, 相位 0°.

表 2 磁耦合探针耦合结果

h/mm	外圈			中圈		内圈
	6			11.5		12
I	0.40500	0.40042	0.39771	0.40402	0.40066	0.42986
$\theta/(\text{°})$	-24.296	-25.342	-25.811	133.688	133.403	-68.972

模拟结果说明: 在同一圆环上, 相同的探针探入深度可以

获得大致相等的耦合量和耦合相位. 但由于各圈所在位置场强不同, 达到相同耦合量所需的探针探入深度不同.

5.2 阵列天线辐射特性

根据上述模拟优化, 通过对天线系统反射的消减, 我们完成了高功率圆极化径向线螺旋阵列天线的设计, 阵列天线口径直径定为 320mm. 整个天线结构紧凑, 轴向尺寸很小, 实现了天线的小型化.

根据磁探针耦合后各圈的耦合相位, 绕轴旋转螺旋线单元天线即可实现阵元辐射相位的一致, 具体操作方法为: 若耦合单元的耦合相位为 θ , 需将螺旋绕轴沿其旋转方向旋转 $-\theta$. 单元天线旋转后的角度位置示于图 5 中, 图中以内圈和外圈中心单元的连线为基准线, 三圈从外向内依次旋转了 $\theta_1 = 25^\circ$, $\theta_2 = -133.5^\circ$, $\theta_3 = 69^\circ$ (螺旋天线旋转方向为右手螺旋, 箭头表示短螺旋天线横杆指向). 在螺旋旋转过程中, 阵元的激励幅度基本保持不变, 所以不需要调整磁探针的探入深度.

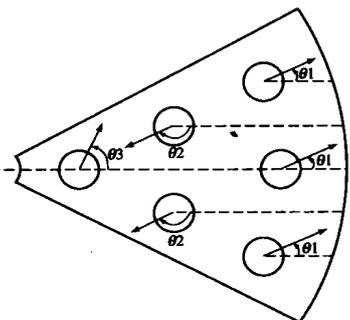


图 5 单元天线旋转后的角度位置位置

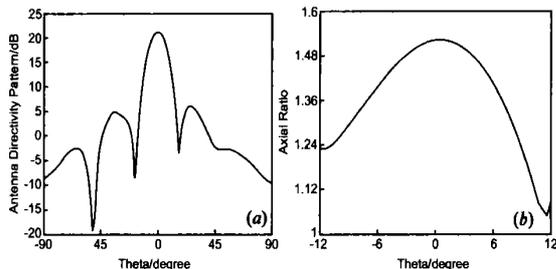


图 6 中心频率下阵列天线的辐射方向图和圆极化特性

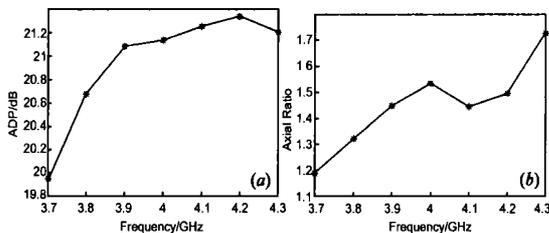


图 7 阵列天线增益和轴比与频率的关系

我们用有限元方法模拟计算了上述完整的高功率双层径向线螺旋阵列天线, 计算得到的中心频率下的辐射方向图和圆极化特性($\varphi = 0^\circ$ 平面)如图 6 所示. 可见, 在 4.0GHz 下, 阵列天线增益可达 21.13dBi, 对应的口径效率为 72.3%, 在 $-12^\circ \leq \theta \leq 12^\circ$ 的范围内轴比值小于 1.55. 我们还研究了该天线的增益和轴向轴比随频率的变化关系, 结果示于图

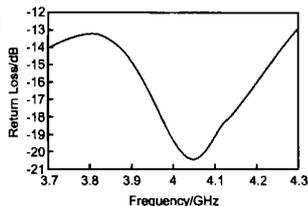


图 8 阵列天线的反射损耗与频率的关系

7 中,可以看出在 3.8GHz~4.2GHz 的频率范围内阵列天线增益大于 20.68dBi,口径效率大于 65.2%,天线轴向轴比值小于 1.7。最后,整个阵列天线的反射损耗示于图 8 中,在 3.8GHz~4.2GHz 的频率范围总损耗小于 -13dBi,实现了绝大部分微波的辐射。

6 结论

本文探讨了用阵列天线实现高功率微波定向辐射的可行性,设计了一种可承受高功率的双层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现径向线 TEM 波激励,使用磁探针给螺旋天线单元天线馈电。理论分析和数值模拟结果表明:采用螺旋线单元天线,以磁探针沿径向线分布耦合给单元天线馈电实现高功率微波的定向辐射是可行的;并且具有结构尺寸小、口径效率高等优点。高功率圆极化阵列天线的设计较为复杂,有很多问题还有待进一步深入,如单元天线间的互耦、磁耦合之间的相互影响等。

参考文献:

- [1] James Benford, John Swgle. High Power Microwave[M]. Norwood: Artech House Inc, 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] Eisenhart R L. A novel wideband TM₀₁ TE₁₁ mode converter [J]. IEEE Trans on Microwave Theory and Techniques, 1988, 1(11): 249- 252.
- [4] Vlasov S N, Orlova I M. Quasioptical transformer which trans-

forms the waves in a waveguide having a circular cross section into highly directional wave beam[J]. Radiofizika, 1974, 17 (1): 148- 154.

- [5] 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.
- [6] H Nakano, H Takeda, Y Kitamura, et al. Low profile helical array antenna fed from a radial waveguide[J]. IEEE Trans on Antennas and Propagation, 1992, 40(3): 279- 284.
- [7] N Marcuvitz. Waveguide Handbook[M]. New York: McGraw-Hill, 1951.
- [8] J D Kraus. Antenna[M]. New York: McGraw Hill, 1947.
- [9] H Nakano, H Takeda, T Honma, et al. Extremely low profile helix radiating a circularly polarized wave[J]. IEEE Trans on Antennas and Propagation, 1991, 39(6): 754- 756.
- [10] 吕善伟. 天线阵综合[M]. 北京: 北京航空学院出版社, 1988.

作者简介:

刘庆想 男, 1964 年 6 月生于山东菏泽市, 1989 年中物院电子工程研究所获物理电子学专业硕士学位, 1996 年 1 月在西南交通大学获博士学位, 1994 年以来任中物院应用电子学研究所研究室主任、副总工程师、副所长等职, 2003 年 4 月调入西南交通大学, 已在国内外重要期刊发表学术论文 40 余篇。

李相强 男, 1982 年 10 月生于山东济宁, 现为西南交通大学博士研究生。E-mail: xiangqiang-li@163.com.