

低相对介电常数的圆极化径向缝隙天线的研究

王宜颖¹, 肖怀宝², 逯贵祯², 吕英华¹, 林金才², 郭永坤²

(1. 北京邮电大学电子工程学院, 北京, 100876; 2. 中国传媒大学信息工程学院, 北京, 100024)

摘要: 径向缝隙天线是高增益、高效率的平面缝隙阵列天线。天线缝隙阵列按一定的规律排布在径向波导的上表面, 径向波导内部填充由慢波材料来抑制天线的栅瓣, 其中慢波材料的相对介电常数一般的选择范围是 1.5~2.5。本文设计的径向缝隙天线中填充径向波导的慢波材料的相对介电常数为 1.06。依据径向缝隙天线的设计原则, 适当调整缝隙的排布, 所设计天线并未出现栅瓣, 并且有较好的方向性。天线的仿真结果与测量结果吻合的较好。

关键词: 径向缝隙天线; 栅瓣; 慢波材料; 方向性; 仿真; 测量

中图分类号: TN821+.1 文献标识码: A 文章编号: 1004-7204 (2014) S1-0099-04

Research on the Circularly Polarized Radial Line Slot Antenna with Low Dielectric Constant

WANG Yi-ying¹, XIAO Huai-bao², LU Gui-zhen², LV Ying-hua¹, LIN Jin-cai², GUO Yong-kun²

(1. School of Electronic Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876;
2. School of Information Engineering, Communication University of China, Beijing 100024)

Abstract: The Radial Line Slot Antenna (RLSA) is a planar slotted array antenna, which possesses high gain and high efficiency. The slot pairs are arranged on the top of the radial line waveguide, the waveguide filled with the slow wave material to suppress the grating lobes, generally, the relative dielectric constant is between 1.5 and 2.5. However, this paper presents an antenna that the relative dielectric constant is 1.06. Adjusting the length of the slots, the grating lobes are not appeared, and the direction is very well. And the simulation results are consistent well with the measurement results.

Key words: RLSA; grating lobe; slow wave material; direction; simulation; measurement

引言

相对于其他直播星天线, 径向缝隙天线由于其高增益、高效率、体积小、寿命长、坚固耐用等优点受到许多国家的科研工作者的广泛关注, 并且国外已经广泛应用, 方便着人们的日常生活。

“径向波导缝隙天线”这个术语首先是由 N. Goto 和 M. Yamamoto 在 1980 年提出来的^[1]; 而最先研究这款天线的可能是 F. J. Goebels 和 K. C. Kelly^[2], 他们于 1961 年提出通过调整馈电电路设计一个能够接收圆极化、线极化或椭圆极化信号的固定形状的笔形波束的天线。Takahashi. M. 等人于 1995 提出了采用波束倾斜的办法来

消除反射^[3], Paul W. Davis 和 Marek E. Bialkowski 于 1997 年采用增加反射缝隙的方法来消除反射^[4]。进入 21 世纪, 仍然有大量的科研工作出现: 2007 年日本东京工业大学的 Masahide Undo 等人对两个不同介电常数的材料叠加一起形成慢波结构进行了研究^[6]; 2012 年, 东京工业大学的 Tung Nguyen 等人设计了椭圆波束的径向缝隙天线^[5]。

径向缝隙天线的研究大都基于相对介电常数较大的介质材料上, 因为如果相对介电常数的范围在 1.5~2.5 之间^[6-9], 那么所设计的径向缝隙天线将不会出现栅瓣。本文的研究是相对介电常数为 1.06 的发泡材料填充的径向线波导上开缝所形成的径向缝隙天线。依据径向缝隙天

基金项目: 中国传媒大学校级项目(编号: XNG1101); 国家自然科学基金资助项目(编号: 61072136)

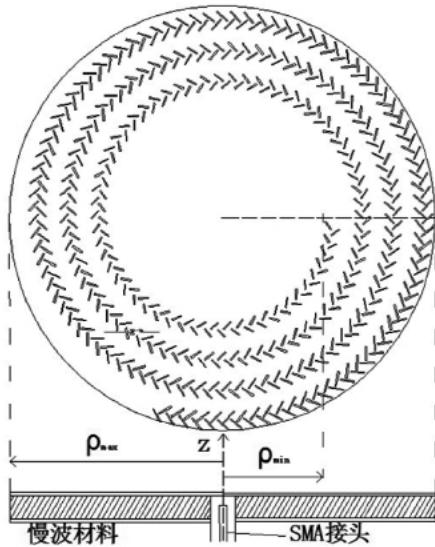


图 1 径向缝隙天线的结构图

线基本的设计原理，通过合理调整缝隙的长度和角度来抑制天线栅瓣的出现；通过对所加工的天线进行多次测量，求均值尽可能消除误差后，所得到的天线方向图与仿真所得到的方向图吻合较好。

1 天线结构

径向缝隙天线由三个部分组成，馈电网络、径向波导和缝隙阵列，其整体结构图形见图 1^[7]。图中采用 SMA 接头对径向波导进行馈电，然后能量从中间向径向波导四周流动，流动的过程中一部分能量通过缝隙向外辐射，其余的能量继续向四周流动。

径向波导部分有两种设计结构，双层径向波导结构和单层径向波导结构。在早期的研究当中都采用的是双层径向波导结构^[7-8]，这样的结构方便阵列天线缝隙的设计，因为上层径向波导中能量是由边缘向中心流动，随着缝隙的辐射到中心的能量逐渐减少，这样可以把缝隙的长度设计成一致。

但是双层波导结构所设计的天线当能量传输到中心位置后剩余能量的处理较麻烦、效率和增益都比较低，而且由于不易于加工带来了加工费用的增加，不利于商业应用。20世纪90年代后开始采用单层波导结构^[5]。

采用单层波导结构的设计方式克服了上述缺点，但同时也给天线缝隙的设计带来了很大的挑战，主要表现在缝隙长度设计不一致、最里圈和最外圈缝隙的设计等。

本文采用的是单层径向波导设计结构，采用 SMA 接头进行馈电，径向波导上下两层均采用导电性好的良导体。

2 天线设计

2.1 天线设计原理

2.1.1 缝隙的分布规律^[7]

径向缝隙天线的缝隙阵列排布一般为同心圆形状和螺旋线形状，螺旋线形状的缝隙阵列排布规律为：

$$S_\phi^2 = \rho_1^2 + \rho_3^2 - 2\rho_1\rho_3 \cos\{\arg(H_1^{(1)}(k\rho_3) - \arg(H_1^{(1)}(k\rho_1)\}) \quad (1)$$

其中， $H_1^{(1)}(x)$ 为第一类一阶汉克尔函数，用于描述径向线波导中磁场的分布函数。当满足条件 $k\rho \leq 1$ 时，式 (1) 可进一步简化为：

$$\rho_3(\psi) = \rho_1 + \psi * \lambda_g / (2\pi) \quad (2)$$

式中， ψ 表示缝隙绕起始位置绕过的角度； λ_g 表示径向线波导中的波导波长。

由于 $\rho(\psi + 2\pi) - \rho(\psi) = \lambda_g$ ，所以

$$S_\phi = \lambda_g \quad (3)$$

其中， S_ϕ 为同一条径向线上两个相邻缝隙对之间的间距，如图 1 所示的位置。

因此，如果把同一条螺旋线上相邻两个缝隙在角度 ϕ 方向的间距 S_ϕ （如图 1 所示的位置）设置为常数，那么所有的缝隙对在整个口径上的分布密度基本上是一致的。故此， S_ϕ 可以根据实际设计天线时的需要设定不同的特定值。

2.1.2 缝隙长度的确定^[6]

理想情况下，考虑某条径向线上按照 S_ϕ 的间隔不间断的分布有缝隙对，那么可以把该径向线上的缝隙等效成在矩形波导上面开缝，研究能量从端口入射流动过程中，辐射能量和剩余能量的比例关系，可以得到理想情况下的耦合因子 $\alpha(\rho)$ ：

$$\alpha(\rho) = \frac{\rho}{K - \rho^2} \quad (4)$$

$$K = \frac{\rho_{\max}^2 - \rho_{\min}^2}{1 - t} \quad (5)$$

其中, $t (< 1)$ 为耗散在波导终端的能量; ρ_{\max} 和 ρ_{\min} 分别是指径向缝隙天线中, 天线对距离中心的最大距离和最小距离, 如图 1 所示。

2.1.3 径向线波导高度^[4]

为了确保径向线波导中传输的是 TEM 模式的电磁波, 径向线波导的高度 d 需满足以下条件:

$$d < \lambda_g / 2 \quad (6)$$

2.1.4 圆极化方式的确定^[10]

径向缝隙天线的极化方式是由一对相互垂直的缝隙天线的间距来确定的, 如果一对缝隙的间距是 $\lambda_g / 4$ 那么二者的相位相差 90° , 即形成所需要的圆极化。

2.2 实际设计的天线参数

在天线设计过程中, 缝隙长度的设计是最为关键的。通过耦合因子, 并考虑要设计的天线尺寸、慢波材料等因素可以很方便地确定缝隙对的长度。本文缝隙的长度是根据低相对介电常数的材料所确定的。对于相对介电常数 $\epsilon_r = 1.06$ 的径向缝隙天线, 设计中心频率为 12 GHz 的直播星天线所相应的波导波长 $\lambda_g = 24.28\text{mm}$ 。这样就可以加大设计时缝隙的长度, 更好地增大天线的增益, 并当能量传播到最外部剩余能量较多时, 可以采用更大的缝隙以确保能量尽可能地辐射出去。

根据上述原理, 并依据实际情况, 加工制作了两款圆极化径向缝隙天线, 其中相同的参数见表 1, 其中定义慢波材料的慢波因子 $\zeta = 1/(\epsilon_r)^{1/2}$; 其余相应的参数分别见表 2 和表 3:

表 1 所加工的天线相同的参数(单位: mm)

ζ	d	ρ_{\max}	缝隙宽度	S_ϕ	S_ρ
0.97	6.35	230	1	10.32	24.28

表 2 距离中心的位置距离大于一个波导波长的天线参数

ρ_{\min}	非均匀变化缝隙长度	缝隙对数
230mm	7~10mm	1250 对

表 3 距离中心的位置距离小于一个波导波长的天线参数

ρ_{\min}	均匀变化缝隙长度	缝隙对数
230mm	7.6~11.6mm	1300 对

由于耦合因子 $\alpha(\rho)$ 的计算是在理想情况下近似成矩形波导估计的, 而径向线波导中电磁波的能量是向四周扩散的, 与理想的矩形波导有不小的差别, 所以设计时根据实际情况尝试了两种不同的设计。表 2 所示的径向缝隙天线采用了几乎所有的设计所满足 $\rho_{\min} > \lambda_g$ 的设计原则^[6], 并靠近中心位置的缝隙长度设置为较小值 7mm, 目的是尽可能少的破坏电磁场分布的均匀性, 而后采取每圈递增相同的长度增加的 10mm; 表 3 所示的加工的另外一款天线突破了 $\rho_{\min} > \lambda_g$ 的限制, 使得 $\rho_{\min} < \lambda_g$, 这样的目的是为了在相同的面积、相同缝隙间距的情况下尽可能多的增加缝隙的对数以增加天线的增益, 缝隙的长度是 7.6mm~11.6mm 均匀变化的。

3 仿真分析和测量数据分析

本文所设计的径向缝隙天线的直径为 460mm, 径向波导的高度为 6.35mm, 径向波导的下表面采用的是良导体金属铝、上表面是采用镀银的金属表面。这样的体积和结构对于仿真来说需要很大的计算量, 测量时将天线放置于转台, 以更小的角度测量天线的方向图。

仿真过程中, 采用了对整个天线进行仿真, 对于电磁场突变的部分进行了手动划分网格, 尽可能地保证了仿真的可靠性和正确性。采用 SMA 接头馈电, 这对于测量来说会不可避免的带来不少误差, 但是通过多次测量, 对于所测量结果求均值, 尽可能的消除了相应的误差。

仿真和测试结果见图 2 和图 3, 分别对应这表 2 和表 3 的参数所设计的天线。

上述两个图形是从仿真和测试的结果中抽取了同样频点的方向图, 其中距离中心大于一个波导波长的天线所对应的频率是 11.5GHz, 距离中心小于一个波导波长的天线所对应的频率是 11.7GHz。从中可以看到, 仿真结果和测量结果的变化趋势吻合地较好。同时图形中显示的仿真结果的主瓣宽度小于实际测量的主瓣宽度, 这

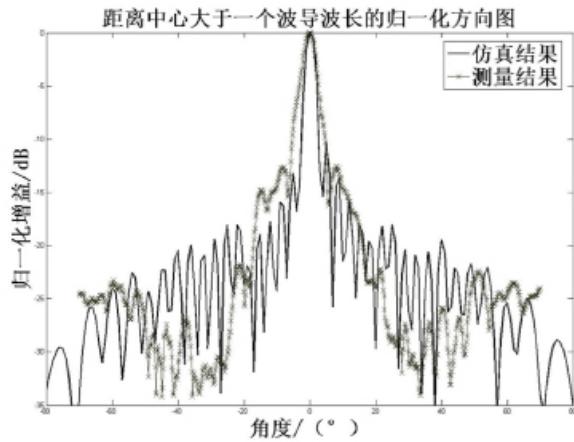


图2 距离中心大于一个波导波长的归一化方向图（仿真和测量结果）

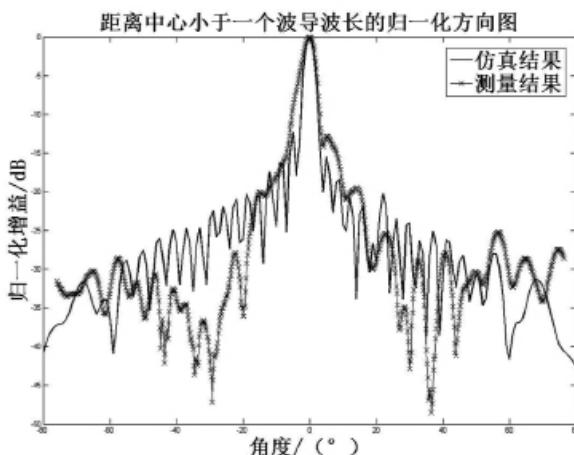


图3 距离中心小于一个波导波长的归一化方向图（仿真和测量结果）

是由于测量时方向图的每个角度间隔是 0.13° ，而在仿真时方向图的角度间隔为 1° ，这样导致了仿真的数据不够充分，在仿真过程中可以通过减少角度间隔、增加点数来改善主瓣宽度的显示。

4 结论

依据径向缝隙天线的设计理论设计了圆极化径向缝隙天线，调整缝隙的长度和角度可以改善天线的性能。通过对于所加工的两个径向缝隙天线的测量，与相应的仿真结果进行比对，发现仿真结果的方向图和实际测量所得到的方向图吻合较好，印证了天线设计的有效性和可行性。

在实际设计的天线中，测量所得到的中心频率偏移相较于仿真结果较大，这是在后续工作中需要改进的。

参考文献

- [1] N. Goto, M. Yamamoto, Circularly polarized radial-line slot antennas[C]. IECE Japan, Tech. Rep., 1980 APSO-57.
- [2] F. J. Goebels, K. C. Kelly, Arbitrary polarization from annular slot planar antennas[J]. IRE Trans. Antennas Propagat., 1961, AP-9(4):342-349..
- [3] M. Takahashi, M. Yoshiie, M. Abe, Basic Design of Beam Tilting Radial Line Slot Antennas[C]. IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, 1995. 3:1384-1387.
- [4] Paul W. Davis, Marek E. Bialkowski, "Experimental Investigations into a Linearly Polarized Radial Slot Antenna for DBS TV in Australia[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1997, 45(7): 1123-1129.
- [5] Tung Nguyen, Hideki Ueda, Jiro Hirokawa, Makoto Ando. A Radial Line Slot Antenna for an Elliptical Beam[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2012, 60(12):5531-5537
- [6] Masaharu Takahashi, Jun-ichi Takada, Makoto Ando, Naohisa Goto. A Slot Design for Uniform Aperture Field Distribution in Single-Layered Radial Line Slot Antennas[J]. IEEE Trans. Antennas Propagat., 1991, 39(7):954-959.
- [7] Makoto Ando, Kimio Sakurai, Naohisa Goto, Kunitaka Arimura, Yoshiharu Ito. A Radial Line Slot Antenna for 12 GHz Satellite TV Reception[J]. IEEE Trans. Antennas Propagat., 1985, AP-33(12):1347-1353.
- [8] Makoto Ando , Kimio Sakurai, Naohisa Goto. Characteristics of a Radial Line Slot Antenna for 12 GHz Band Satellite TV Reception[J]. IEEE Trans. Antennas Propagat., 1986, AP-34(10):1269-1272.
- [9] Paul W. Davis, Marek E. Bialkowski, Linearly Polarized Radial-Line Slot-Array Antennas with Improved Return-Loss Performance[J]. IEEE Trans. Magn., 1999, 41(1):52-61.
- [10] M. Sierra Castaner, M. Sierra Perez, M. Vera Isasa, and J. L. Fernandez Jambrina. "Design Method, Analysis and Prototypes of Radial Line Slot Antenna[C]. IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, 2001., 3:584-577.

作者简介

王宜颖（1982—），男，河南人，博士生，主要研究兴趣为通信天线、传输线和时域有限差分法等。

肖怀宝（1972—），男，湖南人，中国传媒大学通信工程系副主任，电磁场与微波技术专业硕士生导师，主要研究领域为电磁兼容、散射与逆散射、人工电磁材料等。

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>