

# Ku波段波导混合缝隙阵列全向天线的设计与实现

王莉莉, 李迎松, 杨晓冬, 杨祁

(哈尔滨工程大学 信息与通信工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:** 研究并设计了一个工作在 Ku 波段的波导混合缝隙阵列全向天线。利用电磁仿真软件 CST 进行仿真设计, 采用边馈形式, 通过同时对波导的宽边和窄边开缝进行缝隙天线阵列设计, 使设计的 Ku 波段的波导混合缝隙阵列全向天线具有良好的匹配、较高的增益和较好的不圆度, 并对设计的天线进行实际加工制造、调试, 最终仿真与实测结果能够较好地吻合。

**关键词:** 波导缝隙阵列天线; 全向天线; 不圆度

中图分类号: TN820. 1

文献标识码: A

文章编号: 1009-671X(2010)03-0030-03

## Design and implementation of a waveguide hybrid slot array omni-directional antenna at Ku-band

WANG Li-li, LI Ying-song, YANG Xiao-dong, YANG Qi

(College of Information and Communications Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

**Abstract:** A waveguide hybrid slot array omnidirectional antenna which works at the Ku-band was researched and realized by electromagnetic simulation software CST. The antenna is fed at edge and designed with waveguide broad and narrow brimmed slots array antenna, so as to have good matching characteristic, high gain and good un-roundness. At last, the designed antenna was fabricated and debugged. The experimental result was in good agreement with simulation data.

**Keywords:** waveguide slot array antenna; omnidirectional antenna; un-roundness

全向天线发展至今, 目前从结构形式上产生了多样化的成果, 从最初的单极子、偶极子、双锥、螺旋天线到对数周期天线、微带、智能天线等<sup>[1]</sup>, 对一些自身很难达到全向辐射的单元天线, 可将其组成阵列, 就能形成全向辐射的方向图。

波导缝隙天线由于其结构紧凑、馈电损耗小、辐射效率高和口径分布容易控制, 便于实现低副瓣和易于机械制造等优点, 且矩形波导缝隙的全向天线其波导可以直接接地而不影响天线的辐射, 所以抗雷击性能非常好, 这在高雷击发生地区非常重要。在雷达、微波通信系统以及电视广播系统中细缝和窄边开倾斜缝 2 种已广泛应用<sup>[2]</sup>。用做辐射单元的波导缝隙有多种形式, 其中应用最多的是波导宽边纵向, 其优点是天线效率高, 当然频带较窄些。非谐振

式天线的频带虽宽, 但效率较低。只要天线的垂直方向图较宽, 裂缝的数目不多, 则谐振式天线的频带还是可以满足要求的。文中采用 BJ140 非标波导, 根据波导内表面电流分布特性, 设计出在波导宽边和窄边同时进行开缝的谐振式全向天线天线。

## 1 理论分析

### 1.1 宽边单个纵缝理论分析

矩形波导工作在  $TE_{10}$  模时, 在波导宽边沿纵向开缝, 所开裂缝切断波导传导电流, 在裂缝上产生电场, 从而辐射高频能量。裂缝的几何尺寸、其在波导上的位置以及在波导中传送的能量确定裂缝辐射能量的幅度和相位<sup>[3]</sup>。

收稿日期: 2009-06-30。

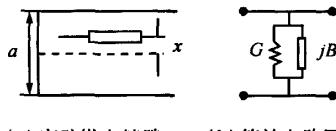
基金项目: 黑龙江省科技攻关基金资助项目(GC05A119)。

作者简介: 王莉莉(1982-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向: 现代天线新技术, E-mail: wanglili@hrbeu.edu.cn。

假定缝隙为窄缝,缝隙上的电场分布近似于半个正弦函数,窄波导中仅传输  $TE_{10}$  模,波导壁厚近似为零,波导壁为良导体,则可根据 A. F. Stevenson 计算公式,得到宽边纵向缝隙的等效电路如图 1 所示,其归一化电导值为

$$g = 2.09 \left( \frac{a}{b} \right) \left( \frac{\lambda_s}{\lambda} \right) \cos^2 \left( \frac{\lambda \pi}{2\lambda_s} \right) \sin^2 \left( \frac{x\pi}{a} \right).$$

式中: $a$  为波导宽边长, $b$  为波导窄边长, $\lambda_s$  为波导波长, $\lambda$  为自由空间中的波长, $x$  为缝隙中心轴线偏离波导宽边轴线的距离.



(a) 宽壁纵向缝隙 (b) 等效电路图

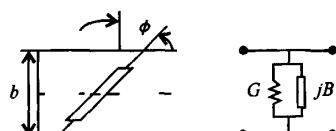
图 1 宽壁纵向缝隙及其等效电路图

## 1.2 窄边单个倾斜缝隙理论分析

波导窄边裂缝结构和边界条件复杂,其分析设计要比宽边裂缝天线困难. 目前在理论上进行精确的计算还有很大难度,但在实验的基础上,通过简化物理模型进行近似计算和必要的修正,在工程上仍可获得满意的结果. 矩形波导工作在  $TE_{10}$  模时,在波导窄边倾斜开缝,所开裂缝切断波导传导电流,在裂缝上产生电场,从而辐射高频能量. 在上述假设条件下得到窄边倾斜缝隙的等效电路如图 2 所示,其归一化电导值为

$$g = \frac{30\lambda^3\lambda_s}{73\pi a^3 b} \left[ \frac{\sin\varphi \cos(\pi\lambda \sin\varphi/2\lambda_s)}{1 - (\lambda \sin\varphi/\lambda_s)^2} \right].$$

式中: $\varphi$  为缝隙倾斜角度.



(a) 窄边倾斜缝隙 (b) 等效电路图

图 2 窄边倾斜缝隙及其等效电路图

## 1.3 缝隙阵列天线设计分析

缝隙阵列天线由许多缝隙按照一定的规律排列构成,临近缝隙之间的间距往往不满足远大于波长的条件,所以它们之间的相互影响是设计中不可忽略的. 当 2 个缝隙距离很近时,缝隙的场分布会相互影响,形成耦合,使各自的阻抗改变,并使电流的大小方向变化,从而影响到方向性,这是设计天线阵列时必须考虑的. 一个长阵中的窄边裂缝之间存在很

强的互耦,孤立缝电导与阵中裂缝电导差别很大,将破坏裂缝原有的谐振状态,会增加一项附加的电纳. 设计中不能简单地利用单缝电导公式,必须考虑裂缝互耦的影响. 需测量出其增量电导并应用所得增量电导和新的谐振长度进行阵列设计<sup>[4]</sup>.

当天线阵列中元的振幅确定以后,可得出每个缝隙的归一化电导值:

$$g_n = ka_n^2, \quad k \sum_{n=1}^N a_n^2 = 1.$$

式中: $g_n$  为第  $n$  个缝隙的归一化电导值; $a_n$  为第  $n$  个缝隙的相对激励电平; $k$  为常数.

而对于本设计属于小于 10 个波长的小型阵列缝隙间互耦在设计初期可适当忽略,在调试过程中改变缝隙,使其达到最佳匹配状态<sup>[5,9]</sup>.

## 2 仿真与实测结果比较

本设计通过对波导宽边窄边同时开缝设计出工作在 12.75 ~ 13.25 GHz 的全向天线,宽边缝隙中心间距均为  $d$ ,其值大约为  $\lambda_s/2$ ;宽边缝隙偏置为  $D_1$ 、 $D_2$ 、 $D_3$ 、 $D_4$ 、 $D_5$ . 窄边缝隙采取三角分布,缝隙间隔约为  $\lambda_s/2$ ;各缝隙倾角分别为  $\beta_1$ 、 $\beta_2$ 、 $\beta_3$ 、 $\beta_4$ 、 $\beta_5$ ;入宽边深度分别为  $\delta_1$ 、 $\delta_2$ 、 $\delta_3$ 、 $\delta_4$ 、 $\delta_5$ . 采用电磁仿真软件 CST 对模型进行仿真、优化. 设计出如图 3 所示的全向天线. 仿真得到天线方向图特性如图 4.5 所示. 从仿真结果中可以得到天线  $H$  面 3 dB 波束宽度为  $17^\circ$ ,  $E$  面不圆度  $\leq 2$  dB, 天线增益  $G \geq 9$  dBi.



图 3 缝隙天线结构图

从图 3 可以看出,通过电磁仿真软件 CST 优化设计的 Ku 波段的波导混合缝隙阵列全向天线由宽边和窄边斜缝组成,宽边纵向缝隙中心的间距为  $\lambda_s/2$ ,缝隙与矩形波导中心的偏移量符合泰勒分布;窄边缝隙采取三角分布.

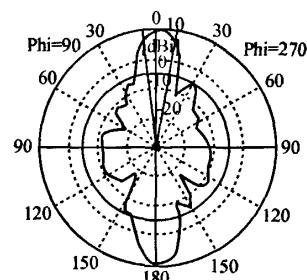


图 4 天线  $H$  面仿真方向图

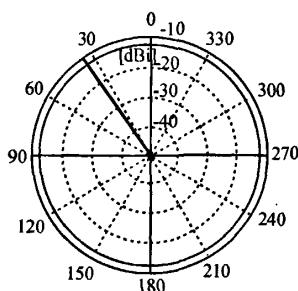


图5 天线E面仿真方向图

按照上述设计制作缝隙天线,做实测实验。由于加工精度不高,总会产生制造误差引起电性能的变化。另外理论处理所假定的条件与实际不完全一致,也会引起误差,使得天线最终实测结果与仿真存在很大的偏差,但通过调试仍能达到预期效果。采用Agilent8753ES矢量网络分析仪测得天线的驻波曲线如图6所示,能够满足相应带宽内小于1.5。采用远场测量法得方向图测试曲线如图7、8所示。由于实际需求,  $H$ 面仅测试 $-60^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 。

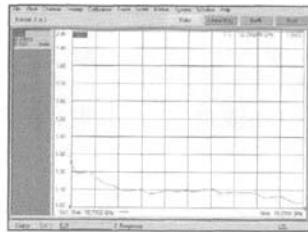


图6 天线实测驻波曲线

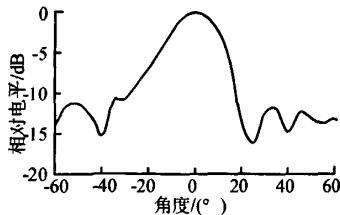


图7 天线H面实测归方向图

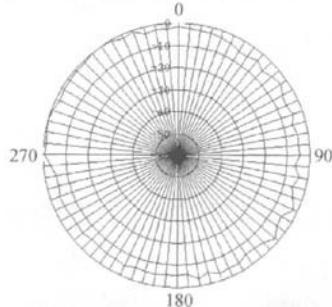


图8 天线E面实测方向图

### 3 结束语

从天线测试的结果来看,缝隙加工误差导致实测与仿真结果有所不同,另外缝隙天线匹配带宽较窄,很小的缝隙加工误差会导致测试结果变坏,甚至会谐振偏移;但从最终结果来看,这种天线能够达到很好的技术指标,而且加工简单,调试方便。只要旋转短路活塞,就能很快使天线达到匹配。本全向天线的不圆度小于6 dB。如果将波导窄边再压缩,可以使其不圆度再进一步减小,另外提高加工精度也可使其不圆度进一步优化,理论上最佳不圆度可小于2 dB。由此可见,该方案在工程中有很大的实用性。

### 参考文献:

- [1] KRAUS J D, MARHEFKA R J. 天线[M]. 章文勋,译. 北京:电子工业出版社,2004.
- [2] 林昌录. 天线工程手册[M]. 北京:电子工业出版社, 2002.
- [3] 薄瓦 H T. 超高频天线[M]. 北京:人民教育出版社, 1959.
- [4] KAMINOW P, STEGEN R J. Waveguide slot array design [M]. New York: ACM Press, 1954.
- [5] 刘学观,郭辉萍. 微波技术与天线[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2001.
- [6] 吕善伟,任济时. 波导缝隙天线耦合特性的研究[J]. 电子学报,1985(05):92-101.
- [7] 李建瀛,张多英. 矩形波导纵缝阵列的理论计算[J]. 现代雷达,1999,21(6):77-81.
- [8] 哀 宁,聂小春,梁昌洪. 有限厚导电平板上任意缝隙的耦合特性分析[J]. 电波科学学报,1999,14 (3):261-267.
- [9] 张祖稷,金 林,束咸荣. 雷达天线技术[M]. 北京:电子工业出版社,2005.

[责任编辑:张晓京]

## 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>