短毫米波段波纹喇叭天线的新工艺

白 冰 苗俊刚 崔延军

(北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100191)

摘 要: 由于传统的机械加工精度的限制,在短毫米波段准光网络中,用作高斯馈源的波纹喇叭天线的设计加工成为难题.根据用户对高斯波束的参数要求提出了波纹喇叭天线的尺寸设计方案,采用了一种节约计算资源的模式匹配算法对包含大量波纹周期的波纹喇叭天线进行数值预测.针对短毫米波段波纹喇叭天线物理尺寸小、加工难度大的问题,提出了"迭片套装"法的加工工艺,即通过加工一系列圆环状波纹片和合理的工装结构而组装成完整的波纹喇叭天线.采用此工艺分别加工了工作在5 mm和3 mm波段的波纹喇叭天线,对其电性能进行了测试,并与数值计算结果进行了对比.

关 键 词: 毫米波; 喇叭天线; 数值方法; 加工工艺

中图分类号: TN 822^{+}.4

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2008)09-1109-04

Novel technique to manufacture short millimeter wave band corrugated horn antenna

Bai Bing Miao Jungang Cui Yanjun

(School of Electronics and Information Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: In short-millimeter band quasi-optical network, it is a difficult problem to design and manufacture corrugated horn antennas acting as Gaussian feeds because of the accuracy of classical manufacture methods. The dimension design methods for corrugated horns were presented in term of the expected Gaussian beam parameters. The mode-matching (MM) method was carried out to numerically predict the performance of corrugated horns comprising large numbers of corrugation ridges and slots. A novel method was proposed to overcome the manufacture difficulties in short millimeter-wave band. The solution is to make the horn in a number of separate sections (either slot or ridge ring) and join them together with appropriate configuration. Two corrugated horns working respectively at 5mm and 3mm bands were realized in this technique. Finally, the performance of the two antennas was measured and the results were compared with the numerical data.

Key words: millimeter waves; horn antennas; numerical methods; manufacture

波纹喇叭天线辐射出的波束具备方向图圆周对称、旁瓣低、交叉极化低等特点,是自由空间中传输的高斯模与金属波导内的传输模之间的高效率模式耦合器.目前,国外在射电天文、卫星通信等领域已经广泛采用波纹喇叭天线作为面天线的初级馈源,用以改善面天线的效率和交叉极化分量.在我国,由于加工工艺水平等方面的原因,波纹喇叭天线的应用常局限在分米波、厘米波系统中.由于尺寸精度的提高和加工难度的加大,毫米波段尤其是短毫米波段波纹喇叭天线的设计和加工遇到了很大的困难.本文采用模式匹配法对设计的波纹喇叭天线进行数值预测和尺寸优化,并提出了"迭片套装"的加工工艺,解决了这个波段的波纹喇叭天线加工难度大的问题,成功研制出

收稿日期: 2007-09-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40476061);教育部"新世纪优秀人才支持计划"资助项目

作者简介: 白 冰(1982—),男,山东泰安人,硕士生,baibing_2005@163.com.

应用于准光网络系统的5 mm和3 mm波段的波纹喇叭天线.

1 波纹喇叭天线的设计

本文所设计的波纹喇叭应用于5 mm波段和3 mm波段准光网络系统,设计工作要结合准光系统对高斯波束的参数要求.

1.1 天线张角的确定

工作于平衡混合模式 HE_{11} 下的波纹喇叭天线的口面场的分布规律可用下式来描述:

$$\boldsymbol{E}_{ap}(r)=J_0\left(\frac{2.405r}{a}\right)\exp\left(\frac{-\mathrm{j}\pi r^2}{\lambda R_h}\right)\boldsymbol{y}$$

其中,J_0 是零阶贝塞尔函数;a 是喇叭天线的口面半径;R_h 是口面场相位分布的曲率半径,可从高斯波束的表达式中得到[1]. 对于图1所示的半张角为 α 的圆锥波纹喇叭天线而言,R_h 与天线的口径存在如下几何关系:

$$R_h=\frac{a}{\sin\alpha}$$

据此,可由口面场相位分布规律及天线的口径尺寸确定喇叭张角.

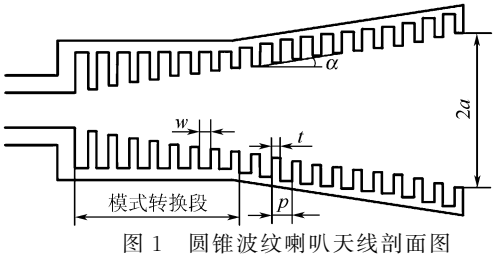


图1 圆锥波纹喇叭天线剖面图

1.2 模式转换段

一般情况下,天线输入端连接的是传输 H_{11}^0 模式的圆波导,其表面电纳为

$$Y=H_\phi/E_z=\infty$$

为得到良好的阻抗匹配,与之相连的波纹喇叭的输入端也要有相同的边界条件,故首个槽的深度为半波长;为在波纹喇叭口面上获得平衡混合模,要求靠近口面的喇叭段的表面电纳满足 $Y=0$,此处槽的深度近似取1/4波长. 二者之间的一段就称为模式转换段,或者过渡段,这一段槽深由半波长均匀过渡到1/4波长,一方面电磁波在这里激励起高次模,并最终形成特征值为2.405的混合模 HE_{11} 模[2],另外它还起着阻抗匹配的作用. 为了避免槽深变化太剧烈以致引起大的反射,这一段的长度一般要求不小于两个波长.

1.3 波纹尺寸的确定

尽管有些文献中提到的波纹周期满足 $P\leqslant\lambda_0/2$ 即可,但是如果对带宽、回波损耗和波束质量要求很高,则波纹喇叭天线内壁的波纹要足够密集. 具体说,波纹尺寸以满足下述条件为佳:

$$P\leqslant 0.15\lambda_0 \qquad t\leqslant 0.5P$$

2 波纹喇叭天线的数值计算

如果所设计的波纹喇叭天线的波纹足够密集,则采用基于网格剖分的商用电磁仿真软件HFSS、CST等进行计算会导致很大的计算量,并且不容易得到收敛解. 为了精确地预测所设计天线的性能,本文采用模式匹配法计算电磁波在波纹喇叭天线中的传输特性[3-4]. 其基本过程如下:

将波纹喇叭视为一系列图2所示的阶梯状半径突变圆波导(称为基本单元)的组合. 由于天线被 H_{11}^0 模激励且基本单元的不连续性发生在圆波导的径向,故由这种不连续性激励起的高次模中只含有 H_{1m}^0 和 H_{1n}^0 模(m, n = 1, 2, 3…). 据此,可用这些模式的线性组合来描述1区和2区中的横向场. 如果1区和2区中分别只考虑前 M 个和前 N 个模式,则满足 $N=\frac{a_2}{a_1}M$(就近取整)的情况下解的收敛速度最快[4]. 根据分界面处的场匹配条件列出方程,就可得出基本单元的广义散射矩阵[4].

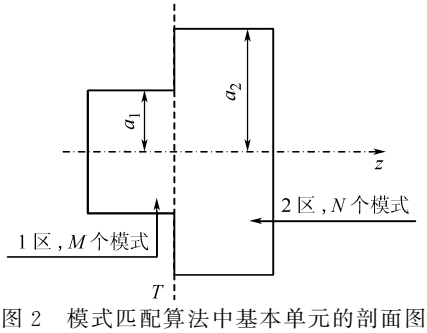


图2 模式匹配算法中基本单元的剖面图

波纹喇叭天线可视为若干个基本单元的级联. 据此可由每个基本单元的散射矩阵计算出整个天线的散射矩阵,进而可得到天线的反射系数、口面场分布和辐射方向图.

采用上述算法编写程序并对5 mm和3 mm波段的天线进行数值计算和尺寸优化,最终确定的天线的尺寸如表1所示.

表1 天线尺寸参数

参数	天线波段	
	5 mm	3 mm
槽宽 w/mm	0.3	0.2
齿宽 t/mm	0.1	0.1
半张角 α/(°)	21.3	9.2
口径 a/mm	10.8	13

喇叭高度 H/mm	23.6	70.2

3　波纹喇叭天线的加工

目前国内外比较常见的波纹喇叭天线的加工方法有机械加工法和电铸法.机械加工法适合加工 X 波段或更低频率的波纹喇叭,对于表 1 所示的短毫米波段波纹喇叭(尤其是在小张角的情况下)很难保证其加工精度.电铸法就是首先按照波纹喇叭天线的内腔尺寸加工出铝芯,然后表面电铸铜到一定的厚度,再腐蚀去铝芯后即成[5].该方法加工毫米波段波纹喇叭可以保证加工精度,但是它工序复杂,代价过高,铝芯一次性使用,尤其不适合批量生产.本文采用"迭片套装"的方法进行波纹喇叭天线的加工,就是通过加工若干个一定尺寸的波纹片和合理的工装结构而组装成完整的波纹喇叭天线,其工艺流程如下所述.

3.1　波纹片的加工

波纹片(图 3)为圆环状,又可分为槽片和齿片,其厚度分别对应波纹喇叭的槽宽 w 和齿宽 t,内径则取决于波纹喇叭的内腔尺寸,外径则可根据实际情况统一取值.其材料可选择紫铜或者不锈钢,不锈钢的机械强度好,但是其表面阻抗大,建议在加工成形的波纹片表面电镀一层金以降低热损耗.其加工方法有三氯化铁腐蚀法和线切割法,前者适合加工厚度不大于 0.3 mm 的波纹片,其精度可达到 0.01 mm～0.02 mm,后者可加工厚度大于 0.3 mm 的波纹片,即使采用快走丝工艺,也可保证上述尺寸精度(图 4),这对于短毫米波段的波纹喇叭天线来说是足够的.迭片套装法最大的特点是将波纹喇叭化整为零,转为离散的波纹片的加工,这样就可保证槽和齿的尺寸精度,并极大地降低了加工难度.

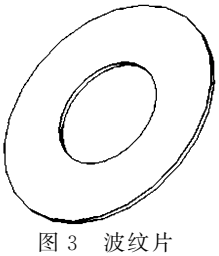


图 3　波纹片

3.2　工装结构的设计

为了将分散的波纹片组装在一起,还要进行适当的工装结构设计.如图 5 所示,波纹喇叭天线的工装结构包括导向槽、连接盘和活动挡板三部分.这些组件可选用黄铜或者硬铝做材料,通过机械加工的手段完成.导向槽 1 为一圆柱形腔,其内

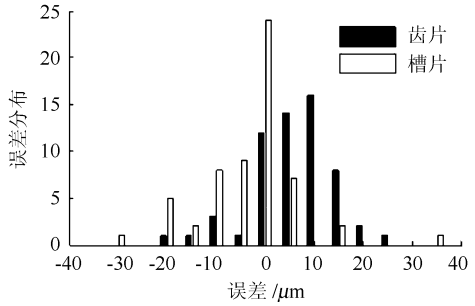
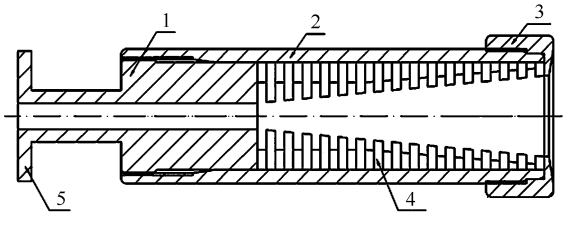


图 4　5 mm 波段波纹片线切割的尺寸误差分布,该天线共有 59 个波纹周期

径等于波纹片的外径,内壁要保证 1.6 μm 的光洁度.导向槽内壁的末端及外壁的顶端都配有螺纹,作为其与连接盘和活动挡板的连接机构.活动挡板 3 通过螺丝与导向槽连接,固定在导向槽的顶端,其作用是卡住导向槽里面的波纹片.将波纹片顺次置入导向槽后,即可将连接盘 2 固定在导向槽的末端,然后借助导向槽和连接盘之间的螺丝将其紧固,这样即可将导向槽内的波纹片压紧,尽可能减小彼此之间的空隙.连接盘顶端为一带有螺丝的金属塞,起着固定压紧波纹片的作用,中轴处为圆波导,可传输相应波段的微波信号,其末端为波导法兰盘.



1—导向槽;2—连接盘;3—活动挡板;4—波纹片;5—法兰盘

图 5　波纹喇叭天线组装示意图

4　测试结果及与数值计算的比较

采用这种工艺加工制作了 5 mm 和 3 mm 波段的波纹喇叭天线,进行了相关电性能的测试,并与模式匹配算法得到的计算曲线进行了对比,结果如下.

4.1　驻 波 比

从图 6 和图 7 中的驻波比曲线中可看出,数

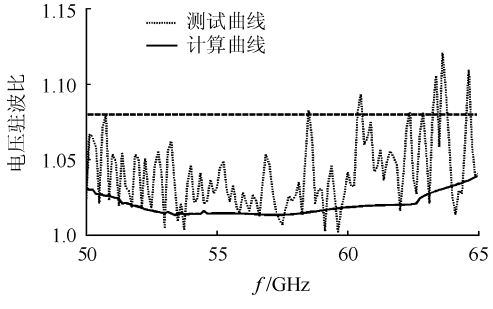


图 6　5 mm 波段波纹喇叭天线测试和计算的驻波比曲线

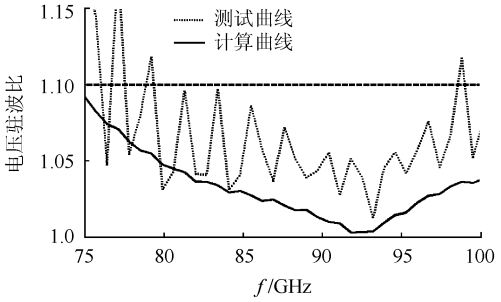


图7 3 mm波段波纹喇叭天线测试和计算的驻波比曲线

值计算的结果能反映测试驻波比的趋势，测试曲线中随频率变化的剧烈起伏是由于实际加工波纹片的过程中引入了尺寸上的随机误差而产生的. 从测试曲线上可得到，两天线在20%的相对带宽上分别达到驻波比小于1.08和1.1.

4.2 辐射方向图

通过对波纹喇叭天线进行平面近场扫描测试(边缘场在−35 dB以下)得到天线的口面场分布，然后对口面场做Fourier变换就可得到天线的辐射方向图[6]. 图8为采用这种方法测得的3 mm波段天线的方向图与模式匹配算法计算所得结果

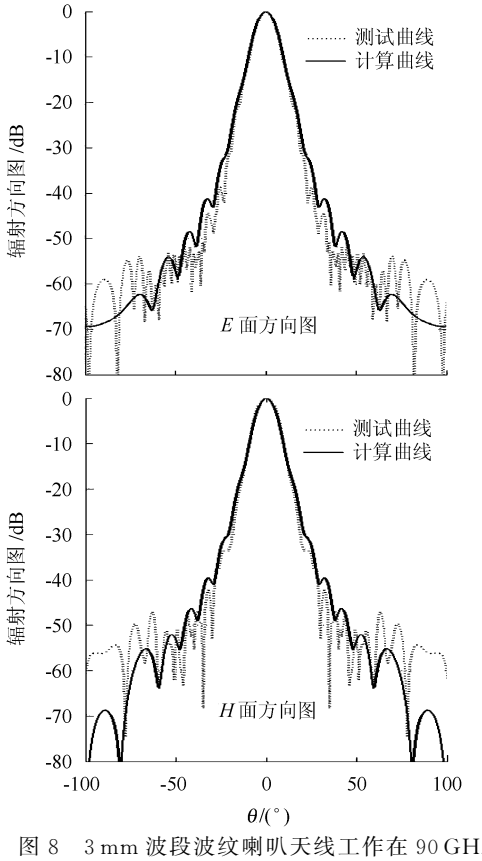


图8 3 mm波段波纹喇叭天线工作在90 GHz频点上的辐射方向图

的对比. 从图中可见，测试结果与数值计算具有很好的一致性，另外，由于在喇叭口面处形成了纯度比较高的平衡混合模式HE_{11}模，在测试方向图上表现为E面和H面方向图等化良好，且在−40 dB以内未见明显旁瓣. 表2为该天线的波束宽度列表.

表2 3 mm波段天线的波束宽度 (°)

波束宽度	E面		H面	
	测试值	计算值	测试值	计算值
$2\theta_{3dB}$	9.9	10.3	11.0	10.1
$2\theta_{10dB}$	17.7	18.9	18.9	18.5
$2\theta_{15dB}$	24.5	24.5	23.3	23.8
$2\theta_{20dB}$	28.4	31.7	29.1	31.5

5 结 论

迭片套装法的加工工艺虽然造成了天线体积和重量的增加，但是这对于大多数应用场合来说是无关紧要的，相反它很好地解决了短毫米波段波纹喇叭天线由于内壁尺寸过于精密而不容易加工制作的难题，并且其成本低，操作简单. 从测试结果上看，采用这种工艺加工的5 mm，3 mm波段波纹喇叭天线性能优良，可满足微波测试、通信及遥感等领域的系统对高性能高斯馈源的要求.

参考文献(References)

[1] Goldsmith P F. Quasioptical systems [M]. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, 1998: 170−176

[2] Clarricoats P J B, Olver A D. Corrugated horns for microwave antennas [M]. London: Peter Peregrinus Ltd., 1984: 22−28

[3] James G L. On the problem of applying mode-matching techniques in analyzing conical waveguide discontinuities [J]. IEEE Trans Microwave Theory Tech, 1983, 31 (9): 718−723

[4] James G L. Analysis and design of TE_{11}-to-HE_{11} corrugated cylindrical waveguide mode converters [J]. IEEE Trans Microwave Theory Tech, 1981, 29 (10): 1059−1066

[5] Beniguel Y, Berthon A, Klooster C, et al. Design realization and measurements of a high performance wide-band corrugated horn [J]. IEEE Trans Antennas Propag, 2005, 53 (11): 3450−3456

[6] 林昌禄. 天线工程手册 [M]. 北京:电子工业出版社, 2002: 1229−1231
Lin Changlu. Handbook of antenna engineering [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002: 1229−1231(in Chinese)

(责任编辑:娄 嘉)