新型的曲线内壁多台阶馈源喇叭设计

张勇芳 苗俊刚 姜景山

(北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100191) (中国科学院 国家空间科学中心, 北京 100190)

摘 要: 介绍了一种新型的曲线内壁多台阶馈源喇叭,这种喇叭结构简单,易于加工且通过优化内壁曲线可以获得良好的电气性能.喇叭的内壁曲线由两段简单的连续曲线组成,一段为正弦曲线,另一段为高斯型曲线.在 75 ~ 110 GHz 频带内,设计了一个多台阶喇叭并优化了喇叭的内壁曲线.优化后的喇叭具有优良的电气特性,在全频带内电压驻波比小于 1.1,约为 1.5:1 的工作频带以及良好的波束轴对称特性.实际测试了多台阶喇叭的远场方向图,测试结果与理论计算结果有很好的一致性.

关 键 词: 馈源喇叭; 毫米波; 模式匹配; 多台阶; 曲线内壁

中图分类号: TN 822^{+}.4

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2013)10-1286-06

Design of a novel curved wall profile multi-step feed horn

Zhang Yongfang Miao Jungang

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

Jiang Jingshan

(National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: A novel multi-step feed horn with a curved inner wall was introduced. The curve profile of its inner wall is composed of the sine profile and the Gaussian profile. This feed horn can be easily manufactured due to its simplified structure, and its radiation performance can be improved by optimizing the inner wall curve profile. A multi-step horn with an optimized inner wall curve profile was designed in the spectrum between 75 GHz and 110 GHz. The optimized feed horn has excellent electrical performance and beam symmetry characteristics, with voltage standing wave ratio (VSWR) less than 1.1 at the established waveband, a bandwidth ratio of about 1.5:1. In addition, the measured radiation pattern of the designed feed horn is in good consistency with calculation results.

Key words: feed horn; millimeter waves; mode matching; multi-step; curved wall

馈源喇叭是反射面天线和多反射面准光系统中的重要部件,要求具有低电压驻波比,宽频带以及良好的波束轴对称性等辐射特性[1].波纹喇叭具有优良的电气性能,是一种理想的馈源喇叭.然而复杂的内部结构使得波纹喇叭不易加工且价格昂贵,特别是在毫米波段,波纹喇叭的加工尤为困难.

内壁呈阶梯状的曲线多台阶喇叭[2]具有简单的结构形式,易于加工,且通过优化内壁曲线能够获得优良的电气性能,是一种较为理想的波纹喇叭替代形式.多台阶喇叭可视为由多段长度相同,半径不同的圆波导级联而成,且圆波导的半径从喇叭喉部到口面处单调递增.

文献[3]设计了一种可作为波纹喇叭替代形式的曲线内壁多台阶喇叭,并给出了优化内壁曲线的方法.然而,这种方法较为复杂,需要较多的

收稿日期: 2012-11-28; **网络出版时间**: 2013-03-14 15: 56

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20130314.1556.006.html

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41105007)

作者简介: 张勇芳(1984-),男,山西太原人,博士生,buaazyf@163.com.

优化参数增加了喇叭的设计难度. 本文以一种曲线内壁波纹喇叭[4]的内壁曲线为基础,并对曲线形式做出适当修正. 介绍了一种内壁曲线由正弦 p 次曲线(p<1)和高斯型曲线组成的多台阶喇叭,且优化内壁曲线时只需较少的参数,降低喇叭的设计难度. 作为验证,在 75 ~ 110 GHz 内,设计并加工了一个曲线内壁多台阶喇叭,且测试了喇叭的电气性能.

1　曲线内壁多台阶喇叭

1.1　喇叭内壁曲线

曲线内壁多台阶喇叭具有曲线型的内壁轮廓,如图 1 所示,图中 R_i 表示喇叭的输入圆波导半径,R_s 表示喇叭某段圆波导的半径,R_a 表示喇叭的口面半径,l 表示台阶长度.

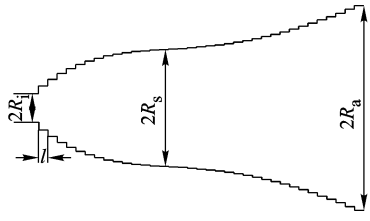


图 1　曲线内壁多台阶喇叭的内壁轮廓

通过优化内壁曲线可以调节多台阶喇叭口面处的电磁场分布,进而获得良好的喇叭辐射特性. 文献[3]介绍了一种优化喇叭内壁曲线的方法,并应用于样条曲线内壁喇叭[5-6]的设计. 然而,这种方法需要对内壁曲线上的多个特征节点进行优化,过多的优化参数降低了内壁曲线的优化效率,增加了喇叭的设计难度.

为了提高内壁曲线的优化效率,降低喇叭的设计难度,借鉴一种波纹喇叭[4]的内壁曲线形式,这里设计了一种由两段简单连续曲线组成内壁曲线的多台阶喇叭. 在文献[4]中,波纹喇叭的内壁曲线包含一段正弦平方曲线和一段指数曲线,其内壁曲线示意如图 2 所示.

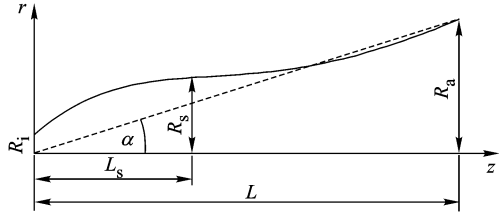


图 2　两段简单的连续曲线

图 2 中,L_s 表示喇叭正弦平方曲线段的长度,L 表示喇叭内壁曲线段的总长度. R_i,R_s 和 R_a 分别表示喇叭的输入圆波导半径,正弦曲线段的最大半径以及喇叭的口面半径. 另外,角度 α 近似表示喇叭的半张角.

1.2　内壁曲线的修正

在设计曲线内壁多台阶喇叭时,发现直接将文献[4]中曲线作为喇叭的内壁曲线并不能获得良好的电气性能,引起喇叭性能下降有两个主要原因.

首先,在曲线内壁多台阶喇叭中,喇叭喉部的正弦曲线段台阶用于实现模式转换功能. 然而,由于正弦平方曲线的曲线斜率较小,这使得喇叭喉部的台阶半径变化不大,不能很好地实现模式转换. 为了实现良好的模式转换功能,正弦段中的台阶半径,尤其是喇叭喉部附近的几个台阶,其台阶半径应当具有较大的变化,这需要一段斜率较大的曲线. 因此,将原有的正弦平方曲线修正为正弦 p 次方曲线,且 p<1.

其次,图 2 中正弦平方曲线与指数曲线在曲线连接处导数不相等,这表明图中的整条曲线不是一条连续曲线. 内壁曲线的不连续性会恶化多台阶喇叭的电压驻波比. 为获得优良的电压驻波比,内壁曲线应当是一条连续曲线. 因此,将原有的指数曲线修改为高斯型曲线,这种曲线形式来源于高斯波束传输过程中波束半径的变化规律[7-8].

经修正后,多台阶喇叭内壁曲线的数学表达式由下式给出:

$$r=\begin{cases}R_i+(R_s-R_i)\sin^p\left(\dfrac{\pi}{2}\dfrac{z}{L_s}\right) & 0\leqslant z\leqslant L_s\\ R_s\sqrt{1+K(z-L_s)^2} & L_s\leqslant z\leqslant L\end{cases} \tag{1}$$

其中,$K=\dfrac{R_a^2-R_s^2}{(L-L_s)^2R_s^2}$. 优化喇叭内壁曲线时,式(1)中的 3 个参数:正弦段顶点 R_s,正弦段长度 L_s 以及正弦次数 p,作为优化参数. 通过调节这 3 个参数优化喇叭的内壁曲线,与文献[3]中需要更多的优化参数相比,较少的优化参数可提高喇叭的优化效率,降低了喇叭的设计难度.

1.3　目标优化函数

模式匹配法[9]是一种半解析算法,具有较快的计算速度和较高的计算精度,特别适合于通过编写快速算法[10]计算并优化多台阶喇叭的性能.

优化喇叭内壁曲线时,为了评估多台阶喇叭电气性能,需要设置一个目标优化函数 P,也称为“惩罚函数”[3-11]. 通过优化内壁曲线使得 P 的值尽可能最大或最小,表明优化结果已满足设计要求. 需要说明的是,喇叭的电气性能与目标优化函数 P 的设置有密切的联系. 文献[11]介绍了一种

低交叉极化的光壁喇叭,目标优化函数用于评估喇叭的交叉极化性能. 这种喇叭具有极低的交叉极化电平,然而其辐射波束的轴对称性较差. 事实上,极低的交叉极化性能以牺牲波束的轴对称特性为代价.

本文在优化多台阶喇叭时,主要考察喇叭在全频带内的波束轴对称特性. 目标优化函数设置为

$$P = \sum_{i=1}^{N} w_i \Delta_i$$

其中 $\Delta_i = \sum_{j=1}^{n} |P_{Ej} - P_{Hj}|^2$. 在上式中,$N$ 表示观察频带内的频点总数;w_i 表示每一频点在 P 中所占的比重;Δ_i 表示在第 i 个频点处,某一选定的方位角范围内喇叭 E 面归一化方向图和 H 面归一化方向图之间的累积差异;n 表示方位角的总数;P_{Ej} 和 P_{Hj} 分别表示在第 j 个方位角时 E 面和 H 面的相对电平,单位为 dB. 通过优化喇叭的内壁曲线,使得 P 的取值最小.

2 W 波段多台阶喇叭

2.1 多台阶喇叭设计参数

在 75 ~ 110 GHz 频带内,设计了一个内壁曲线由正弦 p 次曲线与高斯型曲线构成的多台阶馈源喇叭. 喇叭口面半径设计为 11 mm,约 3.4λ,λ 为中心频率处的波长. 通常,馈源喇叭具有较小的张角,半张角小于 10°[1]. 因此,设计 W 波段多台阶喇叭的半张角 α 为 9°,喇叭长度 L 等于 70 mm.

另外,选取输入圆波导半径 R_i 为 1.53 mm. 喇叭内壁曲线 3 个优化参数的初始值分别设定为 $R_s = 5.5$ mm,$p = 0.8$,$L_s = 30$ mm.

2.2 台阶长度的选取

台阶长度 l 是多台阶喇叭的一个重要设计参数,合适的长度有助于获得优良的电气性能. 虽然,在研究光壁馈源喇叭时,文献[11]和文献[12]指出当台阶长度 $l<\lambda/20$ 时,喇叭的电气性能将与台阶长度无关. 然而,随着频率的提高,制造长度小于 $\lambda/20$ 的台阶是困难的,也是不必要的.

在内壁曲线的 3 个优化参数取初始值的情况下,即 $R_s = 5.5$ mm,$p = 0.8$,$L_s = 30$ mm 时,计算了不同台阶长度下多台阶喇叭的反射系数 S11,计算结果如图 3 所示.

由图 3 中曲线可知,当 $l = 1$ mm(约 $\lambda/3$)时,多台阶喇叭在全频带内都具有低的反射系数. 另外,对比图中 $l = 1$ mm 和 $l = 0.15$ mm(此时多台阶喇叭可近似为光壁喇叭)时的反射系数可知,多台阶喇叭具有比光壁喇叭更低的反射系数.

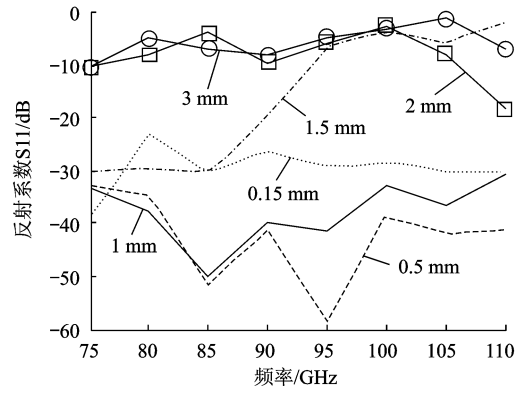


图 3 不同台阶长度时的喇叭反射系数 S11

事实上,不同的内壁曲线也会影响喇叭的反射系数. 然而,对许多不同的内壁曲线进行数值实验后,发现当 $l = 1$ mm 时,多台阶喇叭在全频带内总能获得较低的反射系数. 同时考虑到这样的事实:在设计波纹喇叭时,通常要求波纹周期不大于 $\lambda/3$[13]. 于是,可以得到一个合理的推测:设计多台阶喇叭时,为了获得良好的电气性能,合适的台阶长度可选取为 $\lambda/3$.

2.3 优化后的多台阶喇叭

确定台阶长度 $l = 1$ mm,并以 $R_s = 5.5$ mm,$p = 0.8$,$L_s = 30$ mm 为初值,优化喇叭的内壁曲线.

通常,作为反射面天线的馈源喇叭要求在相对电平 −20 dB 以上具有较好的波束轴对称特性[1]. 一般而言,方位角小于 20°时,馈源喇叭远场方向图的相对电平即可小于−20 dB. 因此,在设置目标优化函数 P 时,选取方位角范围为 0 ~ 20°,且以 0.2°为间隔,则方位角总数 $n = 101$. 另外,频率间隔为 1 GHz,则 $N = 36$. 同时,假设每一频点对目标优化函数的贡献占有相同的比重,因而 w_i 是一个常数.

最终,优化后多台阶喇叭的设计参数在表 1 中列出. 同时,优化后喇叭的电气性能分别如图 4 和图 5 所示.

表 1 W 波段多台阶馈源喇叭的设计参数

参数	l/mm	R_i/mm	R_a/mm	L/mm	R_s/mm	L_s/mm	p
数值	1	1.53	11	70	5.27	26	0.75

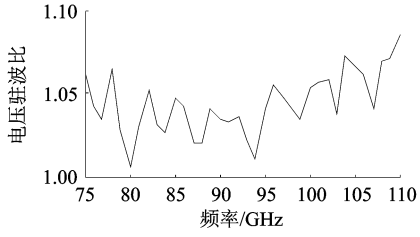
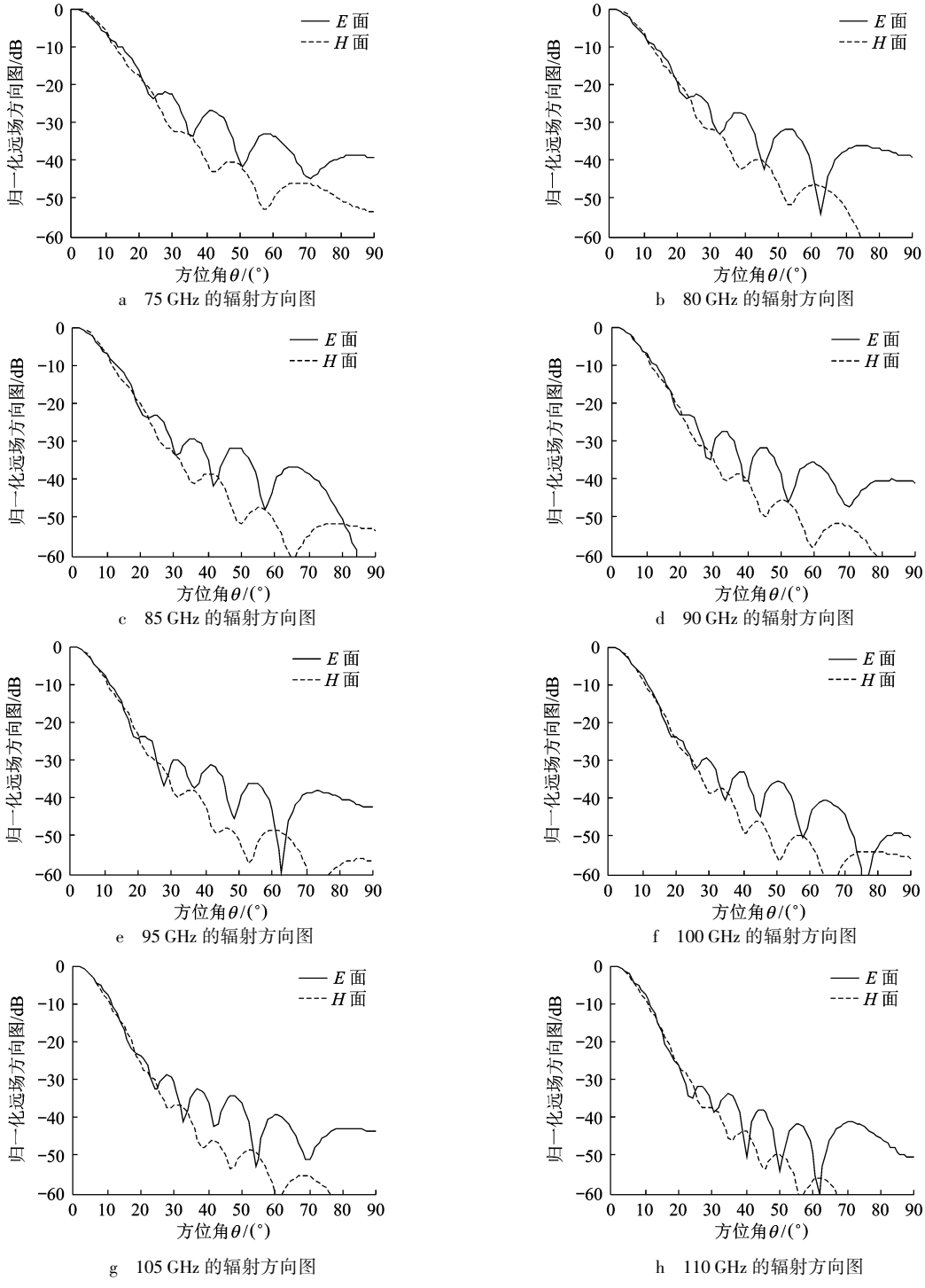


图 4 多台阶喇叭的电压驻波比



a　75 GHz 的辐射方向图　　b　80 GHz 的辐射方向图

c　85 GHz 的辐射方向图　　d　90 GHz 的辐射方向图

e　95 GHz 的辐射方向图　　f　100 GHz 的辐射方向图

g　105 GHz 的辐射方向图　　h　110 GHz 的辐射方向图

图 5　不同频率处的远场方向图,频率间隔 5 GHz

图 4 中曲线为喇叭的电压驻波比,且全频带内 VSWR<1.1. 在图 5 中,以 5 GHz 为间隔给出了喇叭在 W 波段内不同频点处的远场方向图. 由图中曲线可知,喇叭具有良好的波束轴对称特性.

若以电压驻波比和波束轴对称特性来衡量喇叭的工作带宽,则多台阶喇叭带宽约为 1.5:1,具有与波纹喇叭相近的宽度,明显优于双模喇叭.

3　多台阶喇叭测试

采用电铸工艺[14]加工了优化后的多台阶喇叭,工艺流程中所需的铝制电铸内芯由数控车床加工,如图 6 所示. 图 7 所示为最终得到的曲线内壁多台阶喇叭实物(铜表面未镀金).



图 6　W 波段多台阶喇叭的铝制电铸内芯

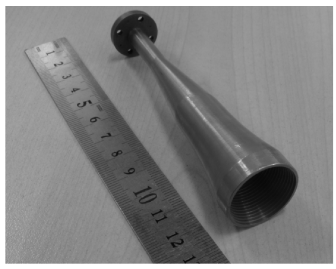
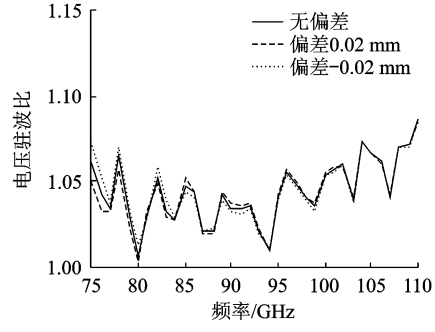


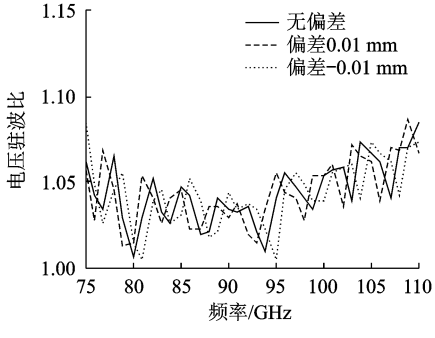
图 7 W 波段多台阶喇叭实物,材料为铜

3.1 加工误差检测

检测了多台阶喇叭台阶半径和台阶长度的实际加工尺寸,结果表明台阶半径的最大偏差小于 0.02 mm,台阶长度的最大偏差小于 0.01 mm. 计算了最大加工偏差对电压驻波比的影响,结果如图 8 所示. 由图 8 中曲线可知,加工误差对喇叭的电压驻波比几乎没有影响.



a 台阶半径偏差对电压驻波比的影响



b 台阶长度偏差对电压驻波比的影响

图 8 最大加工偏差对多台阶喇叭电压驻波比的影响

3.2 电气性能测试

最后,实际测试了多台阶喇叭的电压驻波比和远场方向图,测试结果如图 9 和图 10 所示.

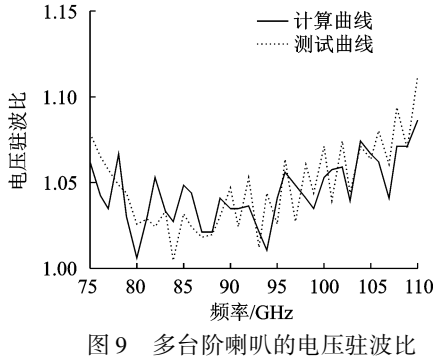
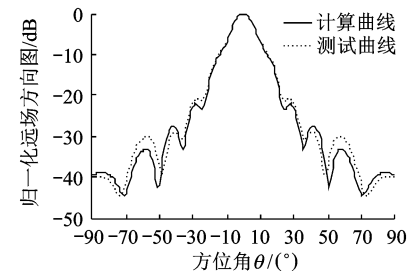
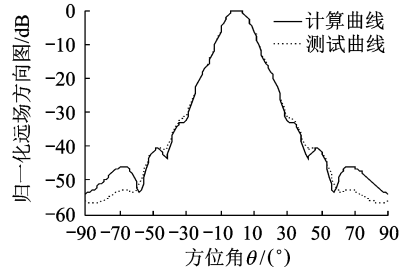


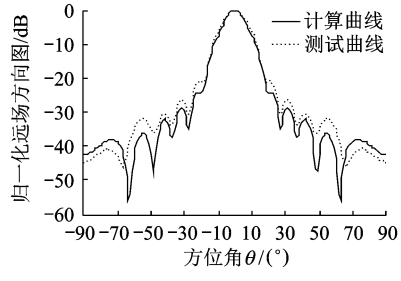
图 9 多台阶喇叭的电压驻波比



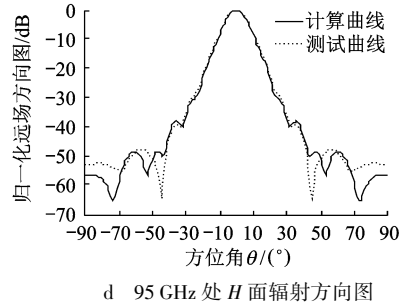
a 75 GHz 处 *E* 面辐射方向图



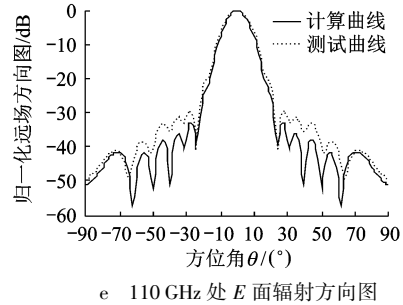
b 75 GHz 处 *H* 面辐射方向图



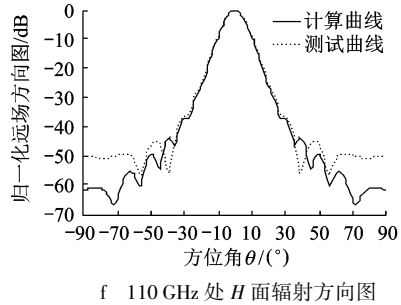
c 95 GHz 处 *E* 面辐射方向图



d 95 GHz 处 *H* 面辐射方向图



e 110 GHz 处 *E* 面辐射方向图



f 110 GHz 处 *H* 面辐射方向图

图 10 多台阶喇叭在不同频点处的远场方向图

利用近场平面扫描法[15]在全频带内测试了多台阶喇叭的远场方向图. 为忽略扫描平面截断效应引入的误差,平面边缘电平选取为-35 dB. 扫描得到喇叭口面近场处的电场幅度以及相位分布,继而依据惠更斯原理获得远场方向图. 图 10 分别给出了 75 GHz,95 GHz 和 110 GHz 处喇叭 E 面、H 面的方向图.

由图9 和图10 中的曲线可知,W 波段多台阶喇叭电压驻波比和归一化方向图的实测结果和理论计算结果具有良好的一致性.

4　结　论

介绍了一种新型的曲线内壁多台阶馈源喇叭,其内壁曲线包括一段正弦曲线和一段高斯型曲线. 通过优化内壁曲线可以获得优良的电气性能. 这种形式的多台阶喇叭具有较少的优化参数,优化效率高,降低了喇叭的设计难度.

在 W 波段内,设计并优化了一个曲线内壁多台阶喇叭. 通过分析不同台阶长度对喇叭反射系数的影响,得知为获得良好的电气性能台阶长度可选取为 $\lambda/3$. 在 W 波段,台阶长度为 1 mm.

采用电铸工艺加工了喇叭实物,且最大加工偏差小于 0.02 mm. 分析了加工误差对喇叭电压驻波比的影响,结果表明加工误差的影响可以忽略. 最后,测试了多台阶喇叭的电压驻波比和远场方向图,实测结果与理论计算结果具有良好的一致性. 设计并加工得到的 W 波段曲线内壁多台阶喇叭具有优良的电气性能.

致谢　作者十分感谢北航微波工程实验室加工车间的工程师在制作曲线内壁多台阶喇叭方面给予的大力帮助.

参考文献(References)

[1] Stutzman W L, Thiele G A. Antenna theory and design [M]. 2nd ed. New York: Wiley Publishing, 1997: 325-331

[2] Skobelev S P, Ku B J, Shishlov A V, et al. Optimum geometry and performance of a dual mode horn modification [J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2001, 43(1): 90-93

[3] Granet C, James G L, Bolton R, et al. A smooth-walled spline-profile horn as an alternative to the corrugated horn for wide band millimeter-wave applications [J]. IEEE Trans on AP, 2004, 52(3): 848-854

[4] Gentilig G G, Martini E, Nesti R, et al. Performance analysis of dual profile corrugated circular waveguide horns for radio astronomy applications [J]. IEE Proceedings Microwave Antennas & Propagation, 2001, 148(2): 119-122

[5] Granet C, James G L. Spline-profile smooth-walled C-band horn [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2007 (6): 415-417

[6] Granet C, James G L. Optimized spline profile smooth walled triband 20/30/44-GHz horns [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2007(6): 492-494

[7] Carlos R, Gonzalo R, Sorolla M. High purity Gaussian beam excitation by optimal horn antenna[C]// Proc ISAP'96. Chiba, Japan: IEEE, 1996: 1133-1136

[8] Goldsmith P F. Quasi-optical systems: Gaussian beam quasi optical propagation and applications [M]. New York: Wiley-IEEE Press, 1998: 13-17

[9] James G L. Analysis and design of TE11-to-HE11 corrugated cylindrical waveguide mode converters [J]. IEEE Trans MTT, 1981, MTT-29: 1059-1066

[10] 白冰,苗俊刚,崔延军. 短毫米波段波纹喇叭天线的新工艺[J]. 北京航空航天大学学报,2008,34(9):1109-1112
Bai Bing, Miao Jungang, Cui Yanjun. Novel technique to manufacture short millimeter wave band corrugated horn antenna [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2008, 34(9): 1109-1112 (in Chinese)

[11] Zeng Lingzhen, Bennett C L, Chuss D T, et al. A low cross-polarization smooth-walled horn with improved bandwidth [J]. IEEE Trans on AP, 2010, 58(4): 1383-1387

[12] Kittara P, Yassin G, Withington S. Theoretical analysis of the pickett potter horn-reflector antenna for sub-millimeter wave applications [C]//1999 High Frequency Postgraduate Student Colloquium. University of Leeds, UK: IEEE, 1999: 139-144

[13] Goldsmith P F. Quasi-optical systems: Gaussian beam quasi optical propagation and applications [M]. New York: Wiley-IEEE Press, 1998: 170-173

[14] Ellison B N, Oldfield M L, Matheson D N, et al. Corrugated feed-horn at terahertz frequencies—preliminary results [C]// Proceedings of Fifth International Symposium on Space Terahertz Technology. Michigan, USA: National Radio Astronomy Observatory Library, 1994: 851-860

[15] 毛乃宏,俱新德. 天线测量手册[M]. 北京:国防工业出版,1987:229-238
Mao Naihong, Ju Xinde. Antenna measurement handbook [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1987: 229-238 (in Chinese)

(编　辑:娄　嘉)