

Ka 频段脊波导过渡的仿真与工程应用*

吴秋生 延波 薛良金

(电子科技大学应用物理研究所, 四川, 成都, 610054)

摘要 在分析各种过渡结构的基础上, 用高频分析软件 HFSS 仿真设计了 Ka 频段直线型脊波导过渡和曲线型脊波导过渡结构, 在 31~38 GHz 的宽带范围内, 插入损耗小于 0.35 dB。实测结果与仿真结果基本符合, 直线型脊波导结构简单, 适合工程应用。

关键词 直线型脊波导, 曲线型脊波导, HFSS 仿真。

SIMULATION AND PROJECT APPLICATION OF Ka-BAND RIDGE WAVEGUIDE TRANSITIONS*

WU Qiu-Sheng YAN Bo XUE Liang-Jin

(Institute of Applied Physics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China)

Abstract Ka-band rectilinear and curvilinear ridge waveguides were designed and simulated by HFSS based on the analysis of kinds of transitions. The insertion loss is below 0.35dB in the range of 31~38 GHz. The simulated results coincide with that of tests essentially. Rectilinear ridge waveguide is suitable for project application because of its simple structure.

Key words rectilinear ridge waveguide, curvilinear ridge waveguide, HFSS simulation.

引言

当前微波毫米波系统, 比如军用与民用中的收发系统要求更为紧凑的过渡, 目前常用的过渡结构有: 阶梯脊波导过渡^[1]、对极鳍线过渡、耦合探针过渡^[2,3]等。这些过渡结构带宽较宽(在 10~20% 内回波损耗在 15dB 以下), 插入损耗不到 0.7dB, 它们加工复杂, 一些过渡尺寸长, 工艺要求高, 并且还要考虑元件气密性问题, 因此增加了设计的费用和加工的难度, 使得成本相应提高。本文所介绍的直线脊波导与曲线脊波导加工简单(尤其是直线脊线), 性能虽比前面提到的略差一些, 尤其是平坦度, 但更能适合工程应用。

1 HFSS 仿真原理

脊波导设计仿真利用 HFSS 进行, HP-HFSS 采用有限元法解决电磁场问题, 求出 S 参数。有限元法一般是把对象空间划分为许多小区域, 而每一个

小区域用一个函数表示。HP-HFSS 中是把几何模型自动划分为许多四面体, 四面体由四个正三角形组成, 这些四面体组成了有限元网格。四面体中点的矢量场是在顶点之间插入, 以三维亥姆霍兹方程有限元分析为例^[4], 设亥姆霍兹方程为

$$\nabla^2 \Phi + k^2 \Phi = g, \quad (1)$$

对于四面体元, 元内函数 Φ 可表示为

$$\Phi_e = a + bx + cy + dz, \quad (2)$$

表达式同样适用于函数 g 。四面体元的四个结点上

$$\Phi_{ei} = a + bx_i + cy_i + dz_i, (i = 1, 2, 3, 4) \quad (3)$$

因此有四个联立方程, 从中求得系数 a, b, c, d 。方程组的行列式为

$$\det = \begin{vmatrix} 1 & x_1 & y_1 & z_1 \\ 1 & x_2 & y_2 & z_2 \\ 1 & x_3 & y_3 & z_3 \\ 1 & x_4 & y_4 & z_4 \end{vmatrix} = 6V, \quad (4)$$

式(4)中 \det 为行列式的值, V 是四面体体积, 求出

* 国家科技预研基金(批准号 8.3.5.10)资助项目
稿件收到日期 2001-11-15, 修改稿收到日期 2002-02-16

* The project supported by the Science and Technology Preliminary Research Foundation of National Defense of China(No. 8.3.5.10)
Received 2000-11-15, revised 2002-02-16

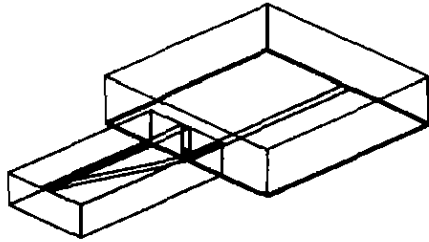


图 1 直线型脊波导过渡模型
Fig. 1 Rectilinear-ridge-waveguide model

a, b, c, d . 可以写出

$$\Phi_e = \sum_{i=1}^4 a_i(x, y) \Phi_{ei}, \quad (5)$$

$$\text{式(5)中 } a_1 = \frac{1}{6V} \begin{vmatrix} 1 & x & y & z \\ 1 & x_2 & y_2 & z_2 \\ 1 & x_3 & y_3 & z_3 \\ 1 & x_4 & y_4 & z_4 \end{vmatrix}.$$

a_2, a_3, a_4 有类似的表达式.

HP-HFSS 保存了顶点的三个平行于邻边的分量,还保存了平行于面而垂直于边的边中点的场,四面体内部的场就是从这些节点中插入而得.用这种方法,麦克斯维方程转换成矩阵方程,可以用传统数值方法解决.

在网格大小(决定了精度)和现有的计算能力之间必须采取折衷的方法,一方面,方案的精度由每个元素(四面体)决定,同一个对象,网格越多就越精确,因为四面体越小,节点之间插入的误差越小;另一方面,计算大量的网格需要占用大量的 CPU 时间和内存,所以,在保证精度下应简化网格.

优化网格时,HP-HFSS 采用了迭代的方法,在关键的区域能自动细化网格.首先,生成一个粗糙的初始网格方案,然后,根据可容许的误差标准细化网格,产生一个新的方案,当 S 参数收敛到预定值,迭代过程就结束了.

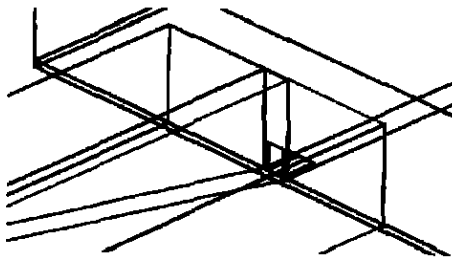


图 2 尖劈部分放大图
Fig. 2 Magnification of the chop

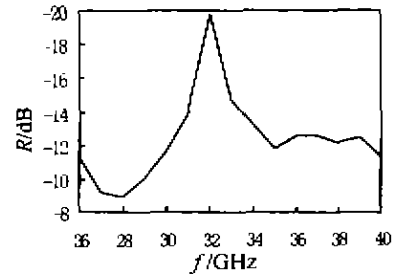


图 3 直线型脊波导回波损耗
Fig. 3 Return loss of the rectilinear

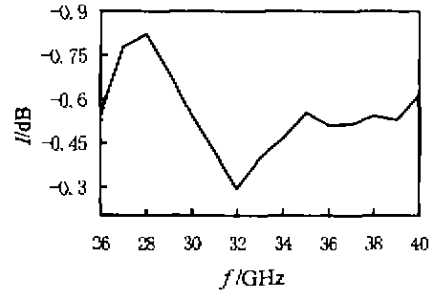


图 4 直线型脊波导插入损耗
Fig. 4 Insertion loss of rectilinear ridge waveguide

2 仿真结果与工程应用

以下的仿真环境设置为:收敛精度 $|\Delta S_i| < 0.05$;频率范围为 26~40GHz;线性点为 15 个;其它采用系统默认值.

直线型脊波导如图 1 所示,采用 8mm 波导 (7.112×3.556mm),微带 $\epsilon_r = 2.22, W = 0.76\text{mm}, h = 0.254\text{mm}, Z_0 = 50\Omega$.

图 2 为图 1 过渡段中尖劈的放大图,仿真结果见图 3、图 4.

从仿真结果可见,回波损耗大的地方,插入损耗大,因此,改善结构前端的匹配很重要,特别是在频率高端,发生了严重失配,回波损耗迅速增大,插入损耗相应增大.

曲线型脊波导如图 5 所示.图 6 为过渡段中的

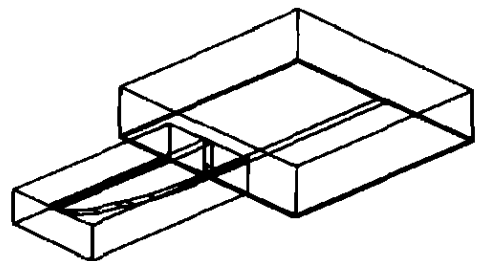


图 5 曲线型脊波导过渡模型
Fig. 5 Curvilinear-ridge-waveguide model

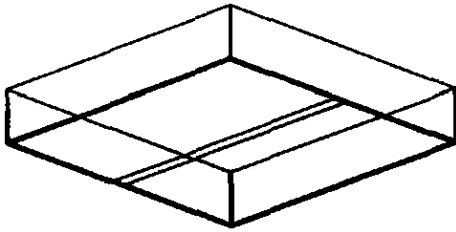


图6 脊波导过渡的微带部分

Fig. 6 The microstrip of ridge waveguide transition

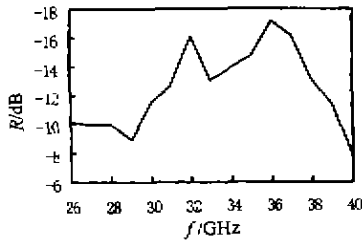


图7 曲线型脊波导回波损耗

Fig. 7 Return loss of curvilinear ridge waveguide

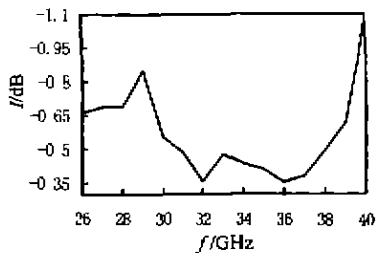


图8 曲线型脊波导插入损耗

Fig. 8 Insertion loss of curvilinear ridge waveguide

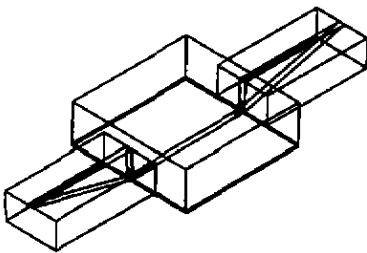


图9 背靠背过渡的结构图

Fig. 9 Layout of back-to-back transition

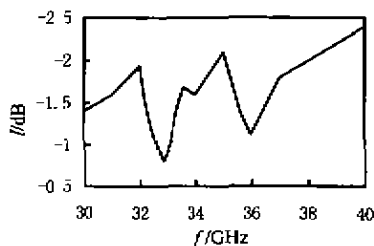


图10 背靠背结构的过渡段插入损耗

Fig. 10 Insertion loss of back-to-back transition

微带部分,长16mm,曲线型脊波导过渡段的仿真结果如图7、图8所示.比较直线型与曲线型脊波导,可以看出二者差别不大,曲线型的带宽要比直线型宽一些,这是曲线型结构的优点.

对于实际的脊波导过渡结构而言,必须扣除微带的影响,16mm微带的插入损耗约为0.2~0.25dB,因此单个直线型脊波导在31~38GHz的插入损耗在0.3dB以下;单个曲线型脊波导在30~39GHz的插入损耗在0.35dB以下.

根据设计仿真结果,对有波导微带过渡的背靠背结构进行测试(见图9),测试系统由信号源为HP8350,输入功率为0dBm,频率范围为30~40GHz,标量网络分析仪AV3611组成,测试结果如图10所示.图10的结果包括了两个脊波导(输入、输出各一个)以及16mm微带线的插入损耗,由此可推算出在35~37GHz(实验要求的频段)单个脊波导的插入损耗为0.45~0.9dB,与仿真结果比较有一定误差,最佳点在32.82GHz,推算得出单个脊波导插入损耗约为0.3dB,接近仿真值.因为实验所用的脊波导的尖壁部分是手工打磨,误差在所难免,而尖劈对结果影响很大,有的相差达4dB,并且会引起中心频率漂移,需要经过反复多次的实验才能得到较好的结果.实验中还要注意尖劈与微带、脊与波导底边的接触问题.

3 结语

本文通过HFSS对直线型脊波导和曲线型脊波导进行仿真,得到比较合理的结构尺寸,并在实验中反复验证,得到比较好的结果,对于提高微波毫米波系统的性能无疑有很大帮助.而HFSS采用的有限元法,同样适用于分析其它无源电路和有源电路.

REFERENCES

- [1] HUI-Wen Yao, Amir Abdelmonem, Ji-Fuh Liang, *et al.* A full wave analysis of microstrip-to-waveguide transitions. *IEEE MTT-S.* 1994:213-216
- [2] Frank J. Villegas, D. Ian Stones, H. Alfred Hung. A novel waveguide-to-microstrip transition for millimeter-wave module application. *IEEE MTT.* 1999, 47(1):48-55
- [3] Yoke-Choy Leong, Sander Weinreb. Full band waveguide-to-microstrip probe transitions. *IEEE MTT-S.* 1999. 1435-1438
- [4] LOU Ren-Hai. *Electronic and Magnetic Theory* Chengdu: University of Electronic Science and Technology Press (楼仁海. *电磁理论*. 成都: 电子科技大学出版社). 1996. 357