

W 频段高阶模宽带波导 Y 结环行器

奚文斌 孙忠良

(东南大学毫米波国家重点实验室, 江苏, 南京, 210096)

TN621

TN015

摘要 基于电磁理论计算, 发现在 W 频段存在环行方向一致的双高阶结谐振模, 两模相互邻近, 可以用来制成双频环行器, 也可以调整环行器参数使两模部分重迭, 得到宽带特性. 本文给出的实验结果验证了理论预言, 双模部分重迭后给出 8GHz 的 18dB 隔离度带宽.

关键词 毫米波, 波导结环行器, 高阶模, 宽频带, 环行器

引言

由于目前可用的铁氧体材料饱和磁化强度最大只有 0.53T, 采用微波频段设计环行器的方法在 W 频段不能得到性能好的波导环行器. 因此发展了一种高阶模环行器^[1,2]. 文献[1]只给出高阶模环行器的一个实验结果, 但没有显示出双模分离情形, 也没有给出理论计算结果和说明. 在文献[2]我们给出了双高阶模的全波计算结果, 结果显示两高阶模的环行方向一致(见文献[2]中图 7), 并可通过调整环行器参数使两模部分重迭得到宽带特性(见文献[2]中图 8). 由于当时缺乏完备的测试仪器, 文献[2]只给出一个高阶模的实验结果, 未能证实理论预言. 在文献[3]中, 我们给出了双模双频环行器可以实现的实验证明. 本文新的实验结果证实可用两模部分重迭来得到宽带特性.

16

1 电磁场模式及频率特性

工程上广泛应用的波导 Y 结环行器结构是部分高铁氧体结构^[1,2]. 波导 Y 结内的电磁场可用电磁场本征模的线性迭加表示. 本征模是 Y 结内麦克斯韦方程的解. 本征模分为体内模和表面模, 它们具有不同的特性.

(1) 体内模

$$E_{cc} J_n(k_r r) [sh(k_z Z), ch(k_z Z)], (\text{介质内})$$

$$E_{cc} J_n(k_r r) [sh\beta Z, ch\beta Z, \sin\beta Z, \cos\beta Z], (\text{铁氧体内})$$

其中 $J_n(k_r r)$ 是 n 阶贝塞尔函数, 它是沿径向振荡的函数. sh 和 ch 为双曲正余弦函数, 它沿 Z 向(即轴向)凋落. 所以, 体内模主要在径向谐振, 为径向谐振本征模. 场分布对频率变化敏感, 因频率变化导致 k_r 变化而使贝塞尔函数 $J_n(k_r r)$ 的最大值沿 r 方向发生变化.

(2) 表面模

$$E_{cc} I_n(k_r r) [\sin(k_z Z), \cos(k_z Z)], (\text{介质内})$$

$$E_{cc} I_n(k_r r) [\sin\beta Z, \cos\beta Z], (\text{铁氧体内})$$

其中 $I_n(k_r r)$ 是 n 阶修正贝塞尔函数, 它沿径向不振荡. 表面模主要在轴向谐振, 为轴向谐振本征模. 场分布对频率变化不敏感, 因为修正贝塞尔函数 $I_n(x)$ 不受变量变化影响, 其最大

值都在铁氧体圆柱面上。

Y 结可以看作作为一个与连接波导存在强耦合的谐振器,它支持许多使 Y 结实现环行的结谐振模,结谐振模是无数个本征模的线性迭加.仅当环形器参数满足一定条件时才会出现结谐振模.

$$\text{结谐振模} = \sum(\text{体内模}) + \sum(\text{表面模})$$

结谐振模之间的区别在于所包含的各本征模的贡献不同.结谐振模包括:

(1) 低阶模

C_0 模:组成此模的本征模全为体内模,故为窄带模.它存在于 H 面满高度铁氧体柱结构中,为径向谐振模^[4].

C_{10} 模:组成此模的本征模有体内模和表面模,体内模占优势,带宽不大,是以径向谐振为主的混合谐振模.它存在于 H 面部分高度铁氧体柱结构中^[5].

C_{11} 模:组成此模的本征模有体内模和表面模,表面模占优势,具有宽带潜力,但要求较强各向异性材料,一般要求 $|k/\mu| > 0.4$, k 和 μ 是铁氧体张量导磁率元素.此模是以轴向谐振为主的混合谐振模,通常存在于加有阻抗匹配台阶的 H 面部分高度铁氧体结构中^[6,7].

C_1 模:组成此模的本征模有体内模和表面模,但体内模场分布最大点已移到铁氧体柱表面,故几乎为纯表面模场分布,具有宽带潜力,但要求强各向异性材料,一般要求 $|k/\mu| > 0.6$.此模是以轴向谐振为主的混合谐振模,存在于重叠加有阻抗匹配台阶的 H 面部分高铁氧体柱结构中^[8].

(2) 高阶模

高阶模与低阶模结构的区别在于前者铁氧体尺寸大,它们有如下近似关系:

$$1.841 < K_c R_c < 2.405, \quad (\text{低阶模}) \quad (1)$$

$$3.045 < K_c R_c < 3.832, \quad (\text{高阶模}) \quad (2)$$

k_c 是铁氧体内最低阶本征模径向传播常数, R_c 是铁氧体半径, 1.841 等数字是贝塞尔函数的根.高阶模是混合谐振模.

微波频段一般利用低阶模,采用强各向异性材料,可实现 30% 甚至更宽带宽.高阶模因体积大而介质损耗比低阶模大,故在微波频段通常不予采用.

毫米波频段范围很大;结模的选择需依具体频段和具体要求而定.在 K_c 频段,可以利用低阶模 C_{10} 模得到宽带特性^[6,7].因为在此波段 $|k/\mu| > 0.4$ 条件还可以满足.在 W 频段,由于材料参数限制, C_{10} 模不能提供足够隔离度, C_{11} 模不能宽带工作^[2,5],利用高阶模改善环行器性能是目前唯一可行的途径.在 K_c 波段和 W 波段之间的 U 、 V 、 E 波段是一过渡波段,选择高阶模或低阶模都没有明显优越性^[8].选择高阶模带宽可宽一点,但损耗要大一些;选择低阶模带宽要窄一些,但损耗也小一些.故须根据具体要求来选择工作模式.高阶模和低阶模在 U 、 V 、 E 频段特性的详细计算结果见文献[9].

2 实验验证

图 1 和图 2 给出采用双高阶模的 W 频段波导 Y 结环行器的最新实验结果,它显示从分离到接近,以及部分重迭的三个实验结果.曲线 1 显示双模分离情形,其中 $f=95\text{GHz}$ 是两模的模式变换频率点,即分界频率点.曲线 2 显示两模已接近,但未达到部分重迭,模式分界

频率点为 93GHz. 曲线 3 显示两模已实现部分重叠, 得到 8GHz 的 18dB 隔离度带宽. 在式 (2) 满足的前提下, 需根据铁氧体材料参数, 如饱和磁化强度, 介电常数等调整铁氧体柱的直径/高度比, 并配以适当介电常数的介质匹配材料来达到调整两模环行频率的目的. 例如使一模式环行频率下降, 另一模式环行频率上升, 就可达到使两模部分重叠的目的. 至此, 理论预言完全得到证实. 可见, 在 W 频段采用高阶模优于低阶模. 采用低阶模一般只能得到 1~2GHz 带宽, 加上一些阻抗匹配措施也只能达到 3GHz 带宽.

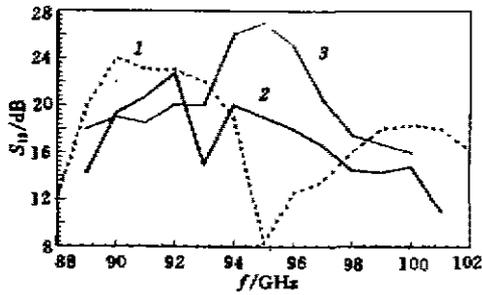


图 1 W 频段双高阶模环行器隔离度测试结果

Fig. 1 Experimental results of the isolation of dual higher-order mode circulator at W band

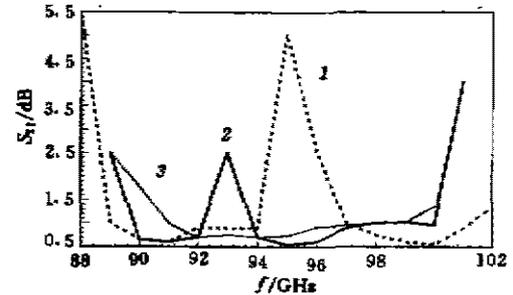


图 2 W 频段双高阶模环行器插入损耗测试结果

Fig. 2 Experimental results of the insertion loss of dual higher-order mode circulator at W band

3 结语

在 W 频段或更高频段, 由于目前受可用的铁氧体材料参数的限制, 采用低阶模已不能实现宽带性能, 因此用双高阶模部分重叠是目前实现较大带宽唯一可行的方法. 双高阶模还可制成双频环行器, 用于发射频率与接收频率不同的系统中, 或者与反射式上变频器连接, 两个频率分别用于上变频器的输入和输出.

参考文献

- 1 Piotrowski W, Schell S. *IEEE* 1982, MTT-S :252~254.
- 2 Dou W B, Sun Z L. *Int J. Infrared & Millimeter Waves*, 1992, 13(12):1915~1923.
- 3 Dou W B, Sun Z L. *Microwave & Optical Tech. Lett.*, 1995, 8(1):16~10
- 4 窦文斌, 沈 涛, 孙忠良. *红外与毫米波学报*, 1995, 14(5):359~365
- 5 刘跃武. *电子学报*, 1986, 2:6~16
- 6 窦文斌. *中国科学*, (A), 1989, 4:418~428
- 7 Dou W B, Li S F. *Microwave & Optical Tech. Lett.*, 1988, 6:200~208
- 8 Dou W B, Wang G S. *19th European Microwave Conference Proc.*, 1989, 323~327
- 9 Dou W B, Sun Z L. *Int. J. Infrared & Millimeter Waves*, 1994, 15(6):1139~1148