

文章编号: 1672-2892(2011)02-0175-05

微波组件设计中的腔体效应

韩 军

(中国电子科技集团 第38研究所, 安徽 合肥 230031)

摘要: 微波有源模块因为腔体的原因造成自激和传输参数的恶化一直是微波电路设计的难点之一。目前没有完整的理论来支持微波有源电路模块的腔体设计。本文从理论上分析了以微带线作为主要微波传输载体的微波组件的腔体效应, 借助电磁场仿真工具 HFSS 对装有微带电路的微波组件进行了仿真。根据仿真结果设计 X 波段微波组件, 并对 S 参数进行了测试, 测试结果与仿真结果吻合, 证明该方法是有用的。

关键词: 微波组件; 腔体效应; 谐振频率; Q 值

中图分类号: TN957.5

文献标识码: A

Cavity effects in the design of microwave modules

HAN Jun

(The 38th Research Institute of CETC., Hefei Anhui 230031, China)

Abstract: The problems of self-excitation and worsening of S-Parameter caused by structure of microwave active module always happen in the design of microwave circuits. Up to now, there is no complete theory to support the design of cavity. This study presented a theoretical analysis of the cavity effect of microwave module, in which microwave was transferred by microstrip lines. The microwave module with microstrip lines was simulated by High Frequency Structure Simulator(HFSS), a powerful full-wave simulation tool. A microwave module of X-band was designed according to the results of simulation and measurements of S-Parameters. The measured results agree well with the simulated results.

Key words: microwave module; cavity effect; resonance frequency; quality factor

微波组件是有源相控阵雷达中的关键部件之一, 是通过装在盒体内的微波器件来实现雷达微波信号的功率放大、低噪声放大和变频等功能。随着雷达技术和微波集成电路(Monolithic Microwave Integrated Circuit, MMIC)技术的发展, 对其尺寸的要求进一步提高。腔体效应是指微波组件的形状、尺寸和电路布局等结构参数对 S 参数的影响, 这些结构参数对组件的性能指标和增益稳定性起着决定性作用。由于微波组件内部结构复杂, 再加上器件对腔体的微扰, 目前尚无非常完整的理论支持微波腔体的设计。工程上比较常见的方法是加吸波材料, 通过合理的腔体尺寸避开工作频带等。

1 空腔谐振分析

微波组件中实际遇到的腔体多是矩形腔体或者矩形腔体的组合, 其结构如图 1 所示, 这里把整个矩形腔体视为界面尺寸为 $a \times b$, 长度为 l 且两端短路的矩形波导, 因此, 空腔中场的横向分布如同矩形波导的场结构, 场的纵向分布如同圆柱形谐振纵向结构, 腔体中可能存在 TE 和 TM 振荡模式。根据电磁理论^[1], 矩形腔体振荡分为 TE 型和 TM 型, 矩形腔的截止波长为:

$$\lambda_c = 2 / \sqrt{(m/a)^2 + (n/b)^2 + (p/l)^2} \quad (1)$$

式中: m, n, p 分别表示电磁场沿 x, y, z 方向的半驻波个数, m, n 为非负的整数。对于 TE 型, p 为正整数; 对于 TM

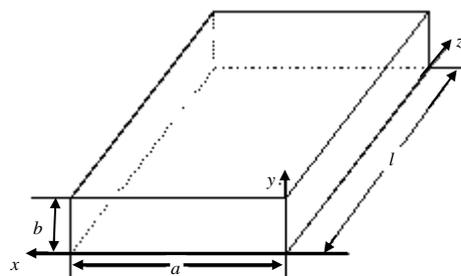


Fig.1 Schematic diagram of cavity
图 1 腔体结构示意图

型, p 为非负整数。可见其腔体的尺寸决定了其振荡特性。

品质因子 Q 定义为:

$$Q = \frac{\text{储藏在系统中能量的时间平均值}}{\text{系统中每秒钟的能量损耗}} \quad (2)$$

从 Q 值的定义可以看出, Q 值越低, 振荡衰减越快。可以推理, 当 Q 值达到一个较低的值, 腔体的谐振特性对谐振频率点的电性能影响较小。

2 装有低温共烧陶瓷(LTCC)电路基板的腔体谐振分析

以 LTCC(Low Temperature Cofired Ceramic)作为微波传输和控制信号传输的载体^[2-3], 把它分装在金属的腔体里, 当腔体内加了介质板后, 其谐振特性会发生改变^[1,4-6]。对于电场垂直于介质面的最低模式^[2], 如果认为屏蔽盒壁面为理想导体, 则波导波长可近似表示为:

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - \frac{h}{b} \left(1 - \frac{1}{\epsilon_r}\right) - \left(\frac{\lambda_0}{2a}\right)^2}} \quad (3)$$

式中: λ_0 表示自由空间波长; h 表示介质的高度。当 $h=0, \epsilon_r=1$ 即无介质基片时:

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{2a}\right)^2}} \quad (4)$$

可以看出, 当腔体内有介质基板时, 其谐振特性会发生改变, 可以通过对计算条件的简化计算出谐振频率。

若基板上再加上微带线、焊盘以及各种器件, 此时, 整个腔体内部结构复杂, 谐振腔里的介质包括空气和陶瓷, 已经不能再简单的解析方法来分析^[3]。这里借助电磁场仿真工具 HFSS 来对实际应用状态的谐振特性进行分析。

对仿真模型需要补充说明的是: 微波信号和控制信号之间都有一层地的隔离, 为了提高计算效率, 这里仅考虑微波信号; 组件中的 MMIC、金丝、环形器等器件均用微带线直接代替。微带线的布局根据实际的芯片布局设定。模型如图 2 所示。

空腔的尺寸为 $60 \text{ mm} \times 18 \text{ mm} \times 6.3 \text{ mm}$, 内层 LTCC 厚度为 0.288 mm , 介电常数为 5.9。损耗角为 0.007。利用 HFSS 软件进行仿真, 考虑到元器件的工作带宽和组件的设计, 工作带宽为 $8 \text{ GHz} \sim 12 \text{ GHz}$, 以 7 GHz 为振荡频率的计算起始点, 计算比其更高的振荡频率。为了更加有效地验证仿真结果的有效性, 选取了 2 个仿真模型, 模型 1 仿真结果比较理想, 模型 2 特意恶化了部分仿真结果, 其主要变化为微带线的位置。仿真结果如表 1 所示。

通过对表 1 的数据分析可以发现, 当 T/R 组件盒体中装入电路基板时, 其振荡特性发生了明显的改变, 需要借助仿真工具进行分析。在电路设计的过程中应当充分考虑实际情况, 如微带线的走向、元器件的布局和封装等。

3 装有 LTCC 电路基板的 S 参数分析

在得出腔体的谐振特性后, 还必须要对其 S 参数进行分析, 只有得到比较理想的 S 参数, 才能有效地保证生

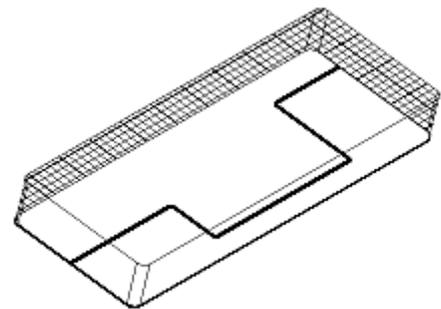


Fig.2 Schematic diagram of simulation model
图 2 仿真模型示意图

表 1 腔体谐振特性仿真结果

resonant frequency/GHz			quality factor	
model 1	model 2	empty cavity	model 1	model 2
8.530	8.11	8.87	253	157
9.240	8.52	10.33	208	11 358
9.990	8.89	12.40	327	180
10.610	9.18	14.80	216	625
11.810	9.61	16.92	229	632
12.100	9.90	17.41	265	282
12.960	9.99	17.73	233	1 225
14.380	10.93	19.00	272	418
14.420	11.12	20.14	179	299
15.622	12.00	20.65	244	7 208

产出来的 T/R 组件在工作频带内的增益平坦度等指标。因此,对同一模型的 S 参数进行了分析。为了验证仿真的正确性,特地仿真了 2 个结论,1 个是带内有明显起伏的;1 个是带内平坦度较好的。2 个模型之间的差异主要体现在微带线相对位置的不同。仿真结果见图 3。

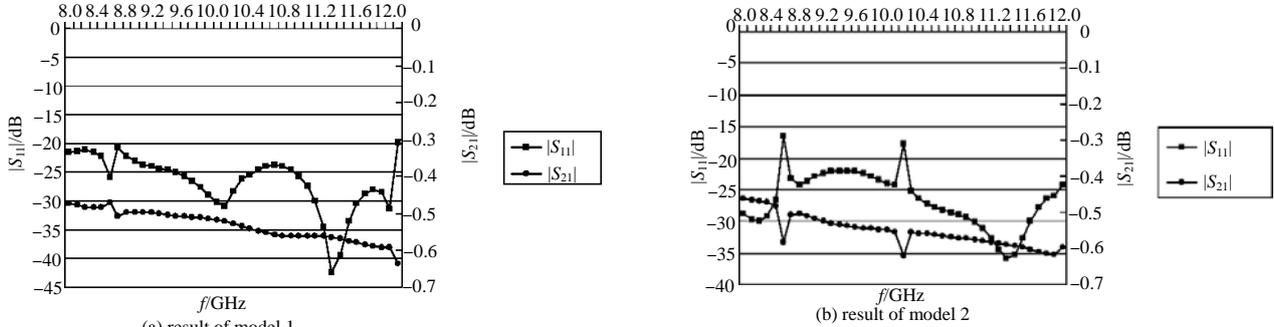


Fig.3 S-parameters of model 1 and model 2
图 3 模型 1,2 的 S 参数

从 S 参数的仿真结果可以看出,腔体的谐振特性对 S 参数有直接的影响, S 参数在谐振频率点发生突变,但其变化程度由该谐振频率点的 Q 值决定,当 Q 值较小,该谐振频率的能量损耗较大时, S 参数突变较小,反之亦然。同时由于 2 个模型的微带线的分布位置不一样,也带来了 2 个模型仿真结果的差异。

4 测试结果与仿真结果比较

为了验证仿真结果的正确性,根据仿真模型设计生产了相应的 T/R 组件盒体和电路板并进行装配测试,其实际结果与仿真结果见图 4。

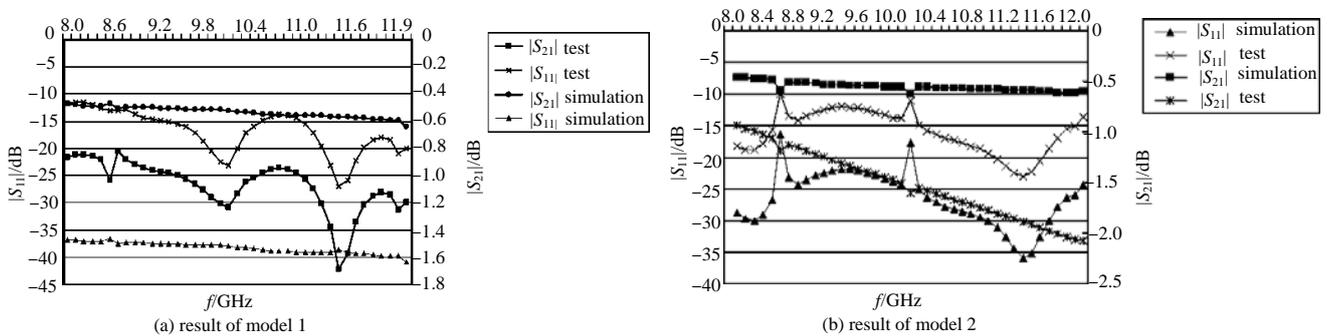


Fig.4 Comparison of simulation and test results of model 1 and model 2
图 4 模型仿真结果和测试结果比较

模型 1 的腔体内部电磁场分布见图 5。

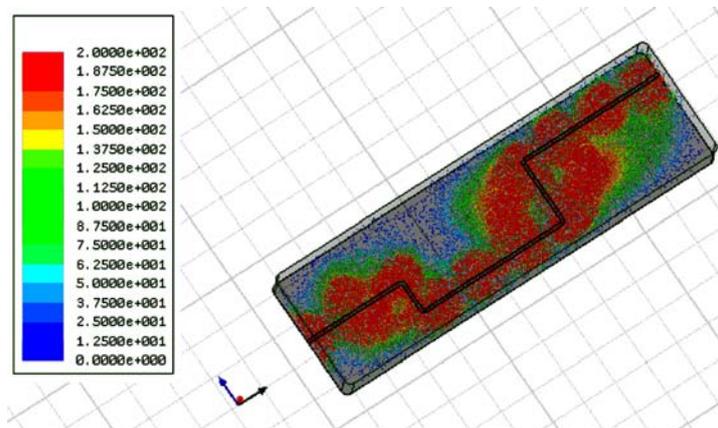


Fig.5 Field distribution diagram of simulation model
图 5 仿真模型的腔体电磁场分布示意图

通过对上述 2 个模型的仿真和测试数据结果比较可以看出，腔体效应对 S 参数的影响是明显的，在有较大 Q 值的谐振频率点附近， S 参数明显恶化，当设计有源微波电路时，此频率点比较容易出现自激。在设计过程中，除了选择合理的腔体尺寸以外，还需要对微带线的分布作更加细致的分析。

根据上面的设计思路和方法设计了一个 T/R 组件的实物^[7-8]。电路原理如图 6 所示。

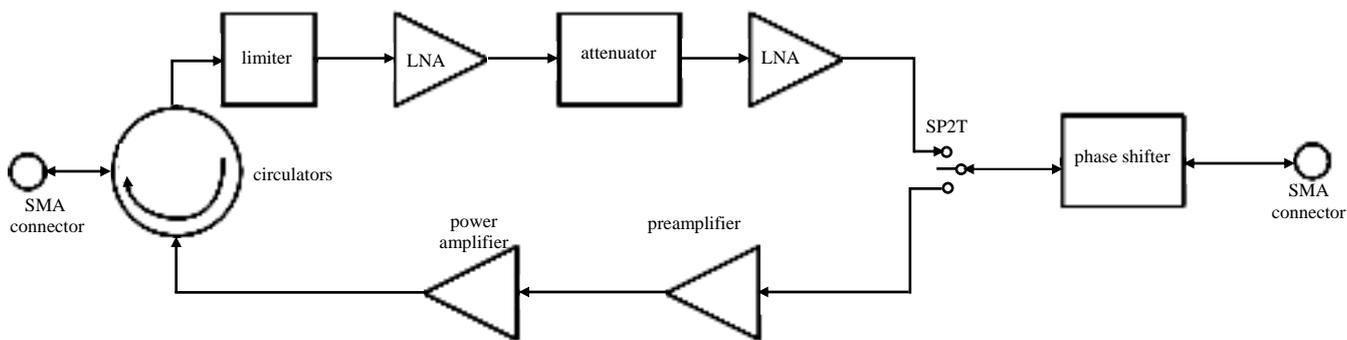


Fig.6 Schematic of T/R module
图 6 T/R 组件的原理图

首先以微带线代替器件，通过调整腔体的尺寸和微带线的位置，使得在需要的工作频带内无高 Q 值的谐振频率，再对其 S 参数进行仿真，以 $|S_{21}|$ 不出现突变为目标。通过仿真设计出来的 T/R 组件实物见图 7。

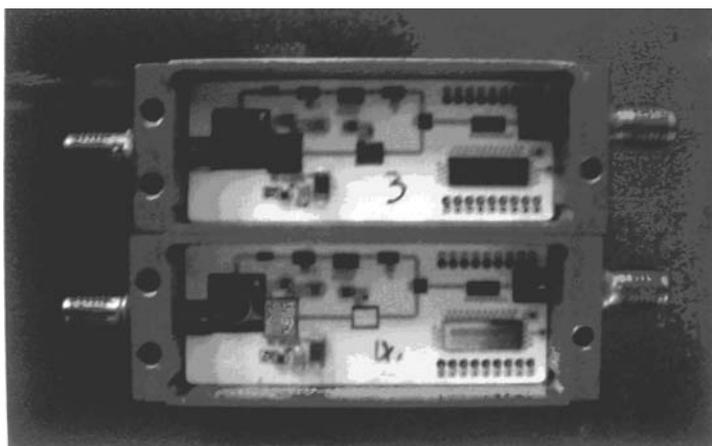


Fig.7 Picture of T/R module
图 7 T/R 组件实物照片

该组件的发射通道测试未出现自激。接收通道测试结果如图 8 所示。

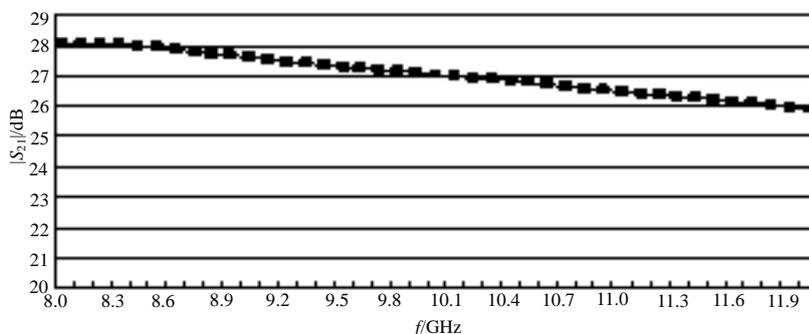


Fig.8 Gain of T/R module's receiving channels
图 8 T/R 组件接收通道测试结果

从图 8 的测试结果可以看出，接收通道的增益曲线未出现畸变，上述测试结果表明，该 T/R 组件的设计有效地避开了腔体效应对微波性能的影响。

5 结论

通过上述腔体效应分析、仿真和测试结果可以得出以下结论:在微波电路设计中,腔体效应是需要重点考虑的因素,由于微波电路的组成较为复杂,需要引入数值仿真工具进行分析。首先选择合理的腔体尺寸。在腔体尺寸选定的情况下,可以通过改变微带线的布局来改变腔体的谐振特性。当谐振频率的 Q 值较低时,可以忽略该谐振频率点对微波电路的影响,以本文中的仿真工具 HFSS 为例,如果谐振频率点的 Q 值在 200 以下,就可以忽略该谐振频率对微波电路的影响。本文提到的微波组件的腔体效应设计方法可普遍应用于微波组件的设计中。

参考文献:

- [1] 柯林 R E. 微波工程基础[M]. 北京:人民邮电出版, 1981. (Collin R E. Microwave Engineering Foundation[M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 1981.)
- [2] 谢廉忠. 微波组件用带腔体LTCC基板制造技术[J]. 现代雷达, 2006,28(6):66-72. (XIE Lianzhong. Manufacturing technology of LTCC substrate with cavity used for microwave module[J]. Modern Radar, 2006,28(6):66-72.)
- [3] 清华大学《微带电路》编写组. 微带电路[M]. 北京:人民邮电出版社, 1979. (*Microstrip Circuits* writing group, Tsinghua University. Microstrip circuit[M]. Beijing:Posts & Telecom Press, 1979.)
- [4] Wang J G,Chen Y S,Fan R Y,et al. Numerical studies on nonlinear coupling of high power microwave pulses into a cylindrical cavity[J]. IEEE Trans. Plasma Science, 1996,24(1):193-197.
- [5] Ni T D,DeMicro J,Struzebecher D,et al. High frequency hermitic packages using LTCC[C]// IEEE MTT-S Digest. USA: IEEE Press. 1996:1627-1630.
- [6] Shobha Sundar Ram,Hao Ling. IEEE Application of the reassigned joint Time-Frequency transform to wideband scattering from waveguide cavities[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2007,6(5):580-583.
- [7] 王锋,李中云. 基于多芯片组装技术的小型微波收发前端研制[J]. 信息与电子工程, 2009,7(1):25-27. (WANG Feng, LI Zhongyun. Development of a miniature T/R front-end using microwave multi-chip module technology[J]. Information and Electronic Engineering, 2009,7(1):25-27.)
- [8] 梁晓芳. X波段固态功率放大器稳定性分析[J]. 现代雷达, 2007,29(12):98-100. (LIANG Xiaofang. Stability analysis and design of X-band solid-state amplifier[J]. Modern Radar, 2007,29(12):98-100.)

作者简介:



韩 军(1980-),男,江苏省金湖县人,硕士,工程师,现主要从事相控阵雷达 T/R 组件研究.email: wirthy@163.com.