

# S 频段多次谐波群岛式滤波器仿真设计

韩来辉

(中国电子科技集团公司 第 27 研究所, 河南 郑州 450047)

**摘要:** 提出了一种基于 HFSS 仿真软件的 S 频段波导滤波器设计方法, 其组合方式是将 2 个群岛式波导低通滤波器相迭加. 仿真结果证明: 该波导滤波器通带电压驻波比小、插入损耗低且同时具有宽的、良好的匹配通带和宽的、高衰减的阻带特性, 对 S 频段发射机寄生输出的 2、3 次谐波抑制度大于 35 dB, 尤其对 S 频段 4 次谐波有不小于 80 dB 的抑制度.

**关键词:** 波导; 低通滤波器; 谐波滤波器; 群岛式滤波器

**中图分类号:** TP29      **文献标志码:** A      **DOI:** 10.3969/j.issn.2095-476X.2013.05.023

## Simulation design of S band harmonic filter with wide-band waffle-iron

HAN Lai-hui

(The 27 Institute of CETC, Zhengzhou 450047, China)

**Abstract:** It is composed of two wave-guide waffle-iron harmonic filters. HFSS proves that designed filter with the voltage standing wave ratio and the insertion loss band is low, the design makes the power-handling capacity of filter is high and the filter reliability is well, the filter can be applied to various reconnaissance equipments with harmonic. It isn't only controlling secondary and thrice harmonic but also controlling fourth harmonic, especially it can cut down 80 dB fourth harmonic.

**Key words:** wave-guide; low-pass filter; harmonic filter; waffle-iron filter

## 0 引言

随着现代微波通信尤其是卫星通信和移动通信的快速发展, 系统对通道选择性要求越来越高<sup>[1-2]</sup>. 此外, 微波高功率发射机输出功率也越来越高, 这对于发射机和天馈系统滤波器的设计提出了更高的要求. 波导滤波器因其具有损耗低、功率容量大、温度特性好等特点, 成为大功率滤波器的首选<sup>[3]</sup>. 波导滤波器作为通信系统的重要组成部分, 其性能决定了信号的质量, 因而研究高性能的滤波器具有重要意义.

对于航天测控地面系统, S 频段发射机既要输出功率高, 又要具有良好的频谱纯度以避免干扰其

他频段设备正常工作. 目前, 输出链路多采用片膜式波导滤波器, 由于高次模的影响, 第 2 个通带很近, 频带高端阻带特性差, 很难对高次谐波起到抑制作用. 而多个谐波滤波器级联的方式, 既增加输出链路的损耗和体积, 又给滤波器之间的匹配带来困难. 鉴于此, 本文拟利用高频三维有限元仿真软件 HFSS<sup>[4]</sup>, 设计一个由 2 个群岛滤波器相迭合成的 S 频段多次谐波滤波器, 以期对 S 频段发射机寄生的 2、3、4 次谐波起到一定的抑制作用.

## 1 群岛式滤波器的设计原理

群岛式滤波器也称为块模式滤波器, 它是由在标准矩形波导的宽边上开许多纵向槽和横向槽以

收稿日期: 2013 - 05 - 08

作者简介: 韩来辉(1979—), 男, 黑龙江省大庆市人, 中国电子科技集团公司第 27 研究所工程师, 主要研究方向为微波技术.

形成凸起的一些金属块所构成,其形状就像一个个“维夫”饼干铁模子,统称为群岛式滤波器。群岛式滤波器是由开有纵向槽的低通波状波导滤波器演变而来。波状低通波导滤波器由宽度相同、高度不同的矩形波导所构成,高度高的波导用来模拟串联电感,高度低的波导用来模拟并联电容,但由于矩形波导具有截止效应,波导的截止频率以下的频率不能通过,故具有低端截止的特性。群岛式滤波器兼有波纹低通滤波器的特点,具有匹配良好的宽通带和高衰减的宽阻带,且可使许多高次模受到抑制,故常用作大功率滤波器。当  $l/b' \leq 1$  和对任意的值  $\delta = b'/b$  时,群岛式波导滤波器就不能按折波导滤波器的设计方法,可以采用波导 T 形接头等效电路的设计方法<sup>[5]</sup>,其中群岛式滤波器的一个单节的底半部及其等效电路如图 1、图 2 所示。表示短线与特性阻抗  $Z_0$  的主传输线相串联的接头的等效电路取自马克维茨的图<sup>[6]</sup>。

这个滤波器单节的归一化镜像阻抗为

$$\frac{Z_1}{Z_0} = \frac{1}{Z_0} \sqrt{Z_{sc} Z_{oc}} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{1 + \cot \frac{\varphi}{2} \left( \frac{X}{Z_0} + n^2 \frac{Z'_0}{Z_0} \tan \varphi' \right)}{1 - \tan \frac{\varphi}{2} \left( \frac{X}{Z_0} + n^2 \frac{Z'_0}{Z_0} \tan \varphi' \right)}} \quad (1)$$

式中  $Z_0$  是 T 形接头主传输线的特性阻抗,  $Z'_0$  为串联短截线的特性阻抗。同时它的镜像衰减常数  $\gamma = \alpha + j\beta$  与平分后的节的开路阻抗  $Z_{oc}$  和短路阻抗  $Z_{sc}$  有关,传播常数即

$$\tanh \left( \frac{\alpha + j\beta}{2} \right) = \sqrt{\frac{Z_{sc}}{Z_{oc}}} = \sqrt{\frac{\frac{X}{Z_0} + n^2 \frac{Z'_0}{Z_0} \tan \varphi' + \tan \frac{\varphi}{2}}{\frac{X}{Z_0} + n^2 \frac{Z'_0}{Z_0} \tan \varphi' - \cos \frac{\varphi}{2}}} \quad (2)$$

式中

$$\frac{\varphi}{2} = \frac{2\pi}{\lambda} \left( \frac{l+l'}{2} - d \right) \quad (3)$$

$$\varphi' = \frac{2\pi}{\lambda} \left( \frac{b-b'}{2} + d' \right) \quad (4)$$

设计时,在应用③④式时,  $\varphi/\varphi' \approx 1$ ,此时传输常数为实数,对串联 T 形接头等效电路的元器件值,计算和查表可得出一节阻带的衰减,进而通过选择  $m$  值达到设计要求。在尺寸选择时,波导整个宽度上“群岛”数  $m$  必须为整数。

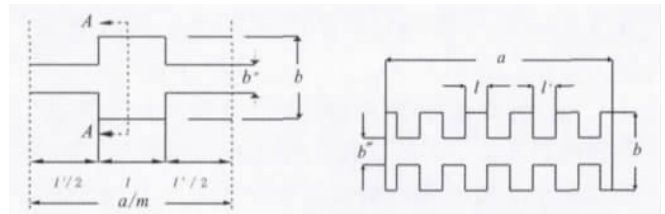


图 1 群岛式滤波器单节和剖面图

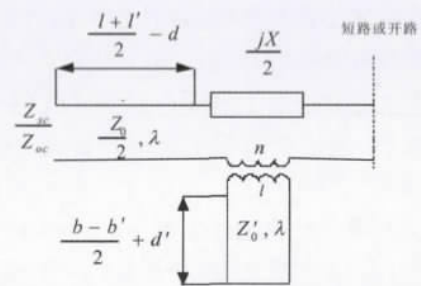
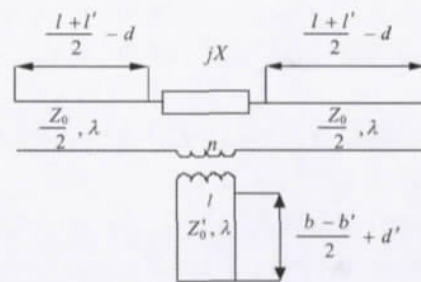
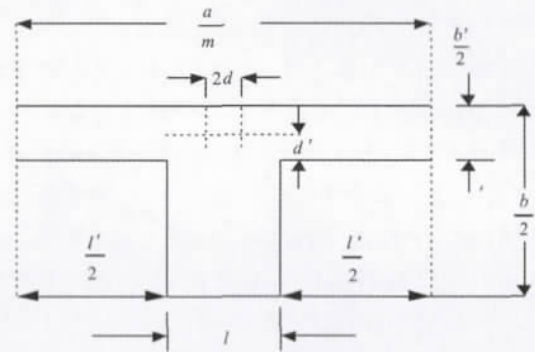


图 2 群岛式滤波器单节及其等效电路

根据计算,除满足滤波器设计要求的群岛数  $m$ ,还要利用高频仿真软件进行建模优化拟合,确定计算 S 参数所需的每个单节的尺寸,然后级联出滤波器的尺寸,并在此基础上优化,最终得到满足设计要求的滤波器。

## 2 设计实例

设计要求:设计一个 S 频段波导谐波滤波器,要求其寄生 2 次、3 次、4 次谐波滤波器,通带频率为 2.025 ~ 2.12 GHz,带内插入损耗  $IL < 0.2$  dB,输入

端驻波比 < -20 dB. 对 2, 3, 4 次谐波抑制度 > 30 dB.

由设计要求可知, 阻带特性为通带的 4 倍频, 现在很难查到这方面的资料和设计成功的案例, 因此使用单个滤波器或群岛式滤波器很难达到设计要求. 由于群岛式滤波器本身具有宽的、良好的通带特性, 宽的、高的衰减阻带特性, 因此可以考虑采用 2 个群岛式滤波器相迭加的设计方案: 第一个群岛式滤波器采用 5 节的方式, 主要对通带频率的 2 次谐波起到抑制作用, 设计采用通带频率 2 ~ 3 GHz, 阻带频率 4 ~ 6 GHz; 第 2 个滤波器采用 10 节的方式, 主要对设计通带频率的 3 次和 4 次谐波起到抑制作用, 设计采用通带频率 2 ~ 6 GHz, 阻带频率 6 ~ 9 GHz; 2 个滤波器通过 1/4 波长阻抗变换器相串联, 以达到理想的匹配效果. 具体设计方法如下.

1) 一个低通群岛式滤波器通带为 2 ~ 3 GHz (设计要求 2.025 ~ 2.12 GHz, 故在其通带内), 通带损耗 < 0.2 dB, 输入端口驻波比 < -20 dB, 阻带为 4 ~ 6 GHz.

首先, 按照设计要求采用标准 BJ22 波导结构,  $a = 109.2 \text{ mm}$ ,  $b = 54.6 \text{ mm}$ ,  $m = 5$ .

由②可知, 传播常数为实数, 且  $\varphi/\varphi' \approx 1$ , 则

$$(l + l') / 2 - d = \lambda / 2 \tag{5}$$

$$\lambda_{\infty} / 4 = d' + (b - b') / 2 \tag{6}$$

采用三维高频仿真 HFSS 软件设置  $b'$  和  $l$ , 由⑥式确定  $d'$ ; 由镜像阻抗特性得①式分母为 0, 确定  $l'$ ; 通过 HFSS 软件对变量  $b'$  和  $l$  进行多次优化, 得到所需的参数值, 优化后的模型其通带特性、传输特性如图 3 所示.

2) 一个低通群岛式滤波器通带为 2 ~ 6 GHz (设计要求 2.025 ~ 2.12 GHz, 故在其通带内), 通带损耗 < 0.2 dB, 输入端口驻波比 < -20 dB, 阻带为 6 ~ 9 GHz. 按照设计要求, 采用标准 BJ22 波导结构,  $a = 109.2 \text{ mm}$ ,  $b = 54.6 \text{ mm}$ ,  $m = 10$ .

设计方法同上, 通过 HFSS 软件设置变量  $b'$  和  $l$  并进行多次优化, 得到所需参数值. 模型的通带特性和传输特性图 4 所示.

将 2 个群岛式滤波器通过 1/4 波长阻抗变换器相串联, 采用 HFSS 仿真软件进一步仿真优化, 组合滤波器仿真结果如图 5 所示. 由仿真结果可见通带插入损耗 < 0.1 dB, 输入端驻波比 < 30 dB, 对 2, 3, 4, 次谐波均有抑制, 其中 2 次谐波的抑制度 > 35 dB,

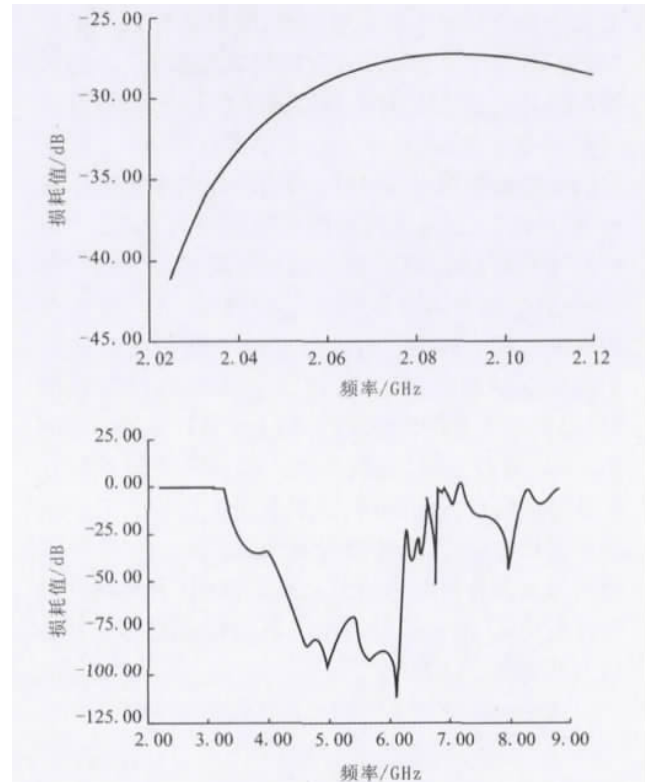


图 3 第 1 节输入输出驻波曲线和传输曲线

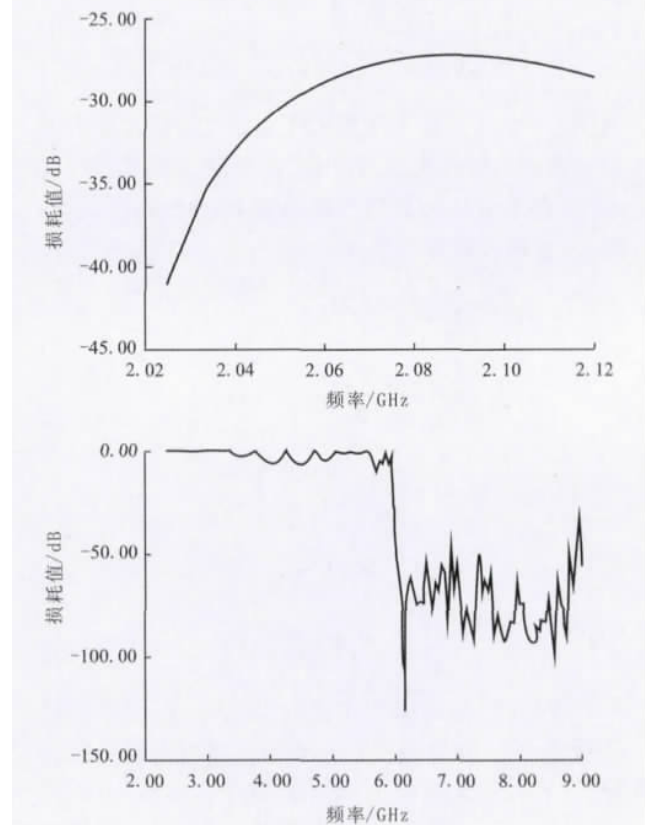


图 4 第 2 节输入输出驻波曲线和传输曲线

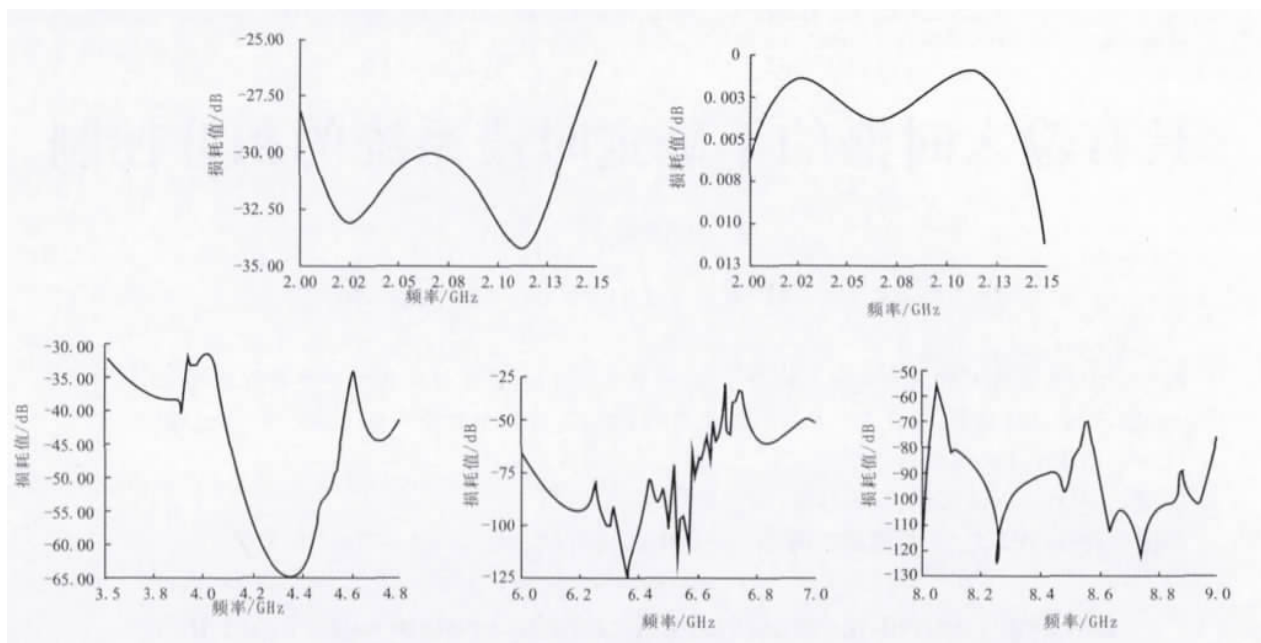


图5 滤波器级联输入输出驻波曲线和传输曲线

对3次谐波抑制度 $>70$  dB,特别对4次谐波抑制度 $>80$  dB,满足设计要求。

### 3 结语

本文将2个都具有宽的良好匹配的通带特性和宽的高衰减的阻带特性的群岛式滤波器相迭加,利用高频三维有限元仿真软件 HFSS 设计了一个 S 频段多次谐波滤波器。仿真结果表明,滤波器特性满足设计要求,具有通带特性好、插入损耗小、驻波系数小等特点,同时对多次谐波均能达到很高的抑制作用,尤其对远端的4次谐波的抑制度达到80 dB。相比其他形式的波导滤波器,该设计具有宽的、良好的通带特性和宽的、高衰减的阻带特性,在通信和航天测控地面发射设备中有广泛的应用前景。

### 参考文献:

- [1] 崔博华,苏桦,荆玉兰.微波滤波器的技术与展望[J].科技传播,2011(7):173.
- [2] Boria V E, Gimeno B. Waveguide filter for satellites[J]. Microwave Magazine, 2007, 8(5):60270.
- [3] Sharp E D. A high-power, wide-band waffle-iron filter[J]. Microwave Theory and Techniques, 1963, 11(2):111.
- [4] 曲永志,李德志,马延爽.基于 HFSS 的微调谐腔体带通滤波器设计[J].电子信息技术,2012,38(3):62.
- [5] [英]卡梅伦,[加]库德赛,[加]曼索.通信系统微波滤波器——基础、设计与应用[M].李松林,译.北京:电子工业出版社,2012.
- [6] 林为干.微波网络[M].北京:国防工业出版社,1978.