

恒 K 式-m 推演式微波滤波器设计

王海波、杨文胜、吴刚、赵锦林

中国电子科技集团公司第五十五研究所，南京，210016

1 前言

恒 K 式-m 推演式滤波器由于通带与阻带之间的过渡有陡削的衰减特性，即较好的矩形系数，而被广泛应用于载波电话中。在微波领域中同样可以得到比其它微波滤波电路有更好的矩形系数。本文提出了设计一个 0~12.5GHz 低通恒 K 式-m 推演式滤波器，得到了较好的特性，提出的指标为：

带内波纹 $L_p \leq 2\text{dB}$; 通带 $W_B = 0 \sim 12.5\text{GHz}$; 输入、输出驻波比小于 1.2;

阻带衰减在 14GHz 以上能达到大于 25dB $L_s \geq 25\text{dB}$

2 电路的选择

由于通带边界频率为 12.5GHz，而 14GHz 处要达到 25dB 衰减，这过渡段的陡度很大，对于最大平滑式滤波器不能达到这样的陡度。对于切比雪夫式滤波器，取带内 $L_p = 1\text{dB}$ ，且取 9 级，理论上也只能达到 28dB 左右，况且在这样大的带内波纹下，电压驻波比已达 2.6 以上，这样大的驻波比和级数引起大的插入衰减。实际上加上接头和微带过渡的不理想，图形与计算精度的不完善。故 9 级切比雪夫也不能达到这样的陡度，再增加级数也失去了实际意义。因为级数增加，在理论上可行，而实际上不但阻带陡度不能理想地上升，而且带内插损反而大幅加大。经过实际试做，用 96 瓷陶瓷板，插损达 3dB 以上；用石英板，插损也达 2dB，但阻带也只能达 20dB，而达不到指标要求。

用椭圆函数式，当取 $L_p = 0.18\text{dB}$ 时，6 级，在理论上陡度能达到要求 ($L_s \geq 30\text{dB}$)，但经计算实际微带电路尺寸时发现，其并联支路中串联谐振线中的电感尺寸长度太短，即使用低介电常数的介质 $\epsilon_r = 2.05$ ，电感尺寸也只有零点几个毫米，这样串联谐振线中的电容块非常靠近主传输线，而发生耦合，这样实际电感线失去作用，故椭圆函数式在这样的频率下工艺上是不能实现的。

采用定 K 式和 m 推演式复合的滤波器。众所周知，对于定 K 式滤波器，其衰减量在阻带内随频率的升高而增大。但其有二个缺点：(1) 它在通带内的阻抗特性呈现一个随频率而变的 1/4 圆周特性，而负载阻抗或源阻抗一般是不变的，所以负载或源阻抗只能有一个点同滤波器特性阻抗相匹配；(2) 它的阻带与通带变换区的衰减量无突变区，陡削度不够。

为此，采用 m 推演式作为滤波器的终端匹配级和源匹配级，这样与负载或源的匹配有很大改善。因为 m 推演式是用 2 级阻抗，即在通带内与负载或源有二个完全匹配点，而其它部分虽不完全匹配，但可以把反射系数通过 m 值的选取而限定在可以容许的程度，这样使通带利用系数大幅上升，而使通带宽度增加，况且其阻带衰减陡度随 m 值的不同而不同，这样可以通过改变 m 值来调整阻带衰减陡度。

衰减陡度可调 m 来达到，m 值越小， f_c 越向 $\Omega = 1$ 点靠近。陡度也越大。况且 m 变时， $\Omega = 1$ 这点是不变的。但其有一缺点：衰减特性在过 f_c 点之后，随 Ω 增加而下降，况且 m 值取的越小，高于极点频率的频率下降也越快。

由定 K 式和 m 推演式各自的优缺点，把这两种滤波器合用起来，可以相互取长补短，即

过渡段的陡度和与源或负载的匹配由 m 推演式承担，而阻带较高频段的衰减量由 K 式来承担组成了定 $K-m$ 推演滤波器。

3 定 K 式与 m 推演式元件值的计算

为了滤波器的插入损耗尽量小，那么滤波器的特性阻抗与源或负载不匹配引起的反射系数应尽量小。取反射系数 $\rho_1 \leq 0.1$ ，这时电压驻波比为 1.2 左右，从滤波器理论可知，若使 $\rho_1 \leq 0.1$ ，必须使滤波器带内反射系数小于 ρ_1 的一半，即 $\rho_2 \leq 0.05=5\%$ 。这样可以由 ρ_2 的要求求出负载系数 m 值，通常可以算出利用系数 Ω_{tb} 、衰减量 a 、元件初值 L_0 、 C_0 。

a. 采用以一级 π 型 m 推演式和三级 T 型定 K 式相级联

由 $Z\pi m$ 式的公式：对于电阻函数 $\gamma = (1 - \rho_2) / (1 + \rho_2)$ ，则 $m = \sqrt{(1 - \sqrt{1 - r^4}) / 2}$

通常利用系数 $\Omega_{tb} = \sqrt{(1 - 2m^2) / (1 - m^2)}$

设计电阻 $R = R_L / r = 55.26\Omega$ ，这里 $R_L = 50\Omega$ ，是源或负载电阻。

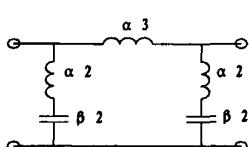
这样算出的 m 值是否合适，还要计算理论截止频率是否落在过渡带内。 $f_c = f_{tb} / \Omega_{tb} = 13\text{GHz}$ ，恰好落在过渡带内，所以 m 值取得合适。而要求的 14GHz 处，即 $\Omega = 1.12$ 处的衰减量达到或大于要求值，为此可用公式 $a = \ln[(1 + mq) / (1 - mq)]$ 计算，这里 $q = \Omega / \sqrt{\Omega^2 - 1}$ ，算出各种归一化频率下的衰减量，并列成表格，再在坐标纸上用 Ω 为横轴， a 为纵轴画出衰减曲线，比较陡度是否达到要求，对于定 K 式用上面公式，只要令 $m = 1$ 代入，也可算得衰减量，列出表且和 m 推演式的衰减量相加画在坐标纸上，得曲线。检查陡度和阻带内的衰减量是否达到要求。若能达到要求，那 m 值和定 K 式的级数可以定下来。若达不到，可以改变 m 值和定 K 式的级数，直到满足要求为止。本文用了 3 级 T 型定 K 式和一级 π 型 m 式。

b. 计算单位电感与电容

$$L_0 = R / (2\pi f_c) \quad C_0 = 1 / (2\pi f_c R)$$

c. 计算各元件标准函数值

对于 π 型 m 式

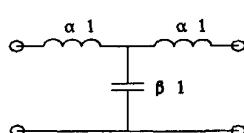


$$\text{其中: } \alpha_2 = (1 - m^2) / m,$$

$$\alpha_3 = 2m,$$

$$\beta_2 = m$$

对于定 K 式 (T 型)



$$\text{其中: } \alpha_1 = 1,$$

$$\beta_1 = 2$$

d. 计算实际电容电感值

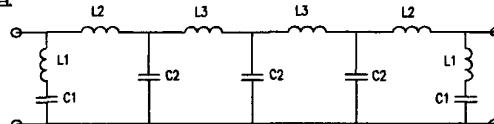


图 1. 三级定 K 式与 m 推演式级联图

$$L_1 = \alpha_2 L_0; \quad L_2 = (\alpha_3/2 + \alpha_1)L_0; \quad C_1 = \beta_2 C_0; \quad C_2 = \beta_1 C_0; \quad L_3 = (\alpha_1 + \alpha_2)L_0 = 2L_0$$

根据阻抗匹配级联，且对负载和源呈现二级阻抗，其结构图如图 1 所示。

4 电路尺寸的计算

a. 介质厚度及材料的选择

为了经济简单，易于加工、调整，为了降低带内衰减，采用聚四氟乙烯介质的带状线。取 $t=1.5\text{mm}$, $\epsilon_r=2.55$ 。这时两介质板间距 $b=3\text{mm}$ ，它满足 $b \ll \lambda_{\min}/(2\sqrt{\epsilon_r})$ 的条件，防止了高次模的产生，从而保证了纯的 TEM 波的传输。同时取接地板的宽度为 $5b=15\text{mm}$ 。

b. 元件尺寸的计算

由于已知各电感值与电容值，由传输线理论用半集中元件来代替，可以得到各元件下的电路尺寸。

电感用高特性阻抗的短路传输线替代。

$$\text{由微波理论知: } jZ_h \operatorname{tg} \theta = j\omega L$$

当 $\theta \leq \pi/4$ ，可算得电感传输线的长度为 $l=LV_s/Z_h$ ；

电容用低阻抗的开路传输线替代。

$$jY_1 \operatorname{tg} \theta = j\omega C,$$

当 $\theta \leq \pi/4$ 时，可得到电容传输线的电长度为 $l=CV_s/Y_1$ ，其中 V_s 为传输线相速。

对于电容线，由于线较宽，故在长度方向上对边缘电容进行了理论修正。以上计算方法，得到的图形如图 2 所示。

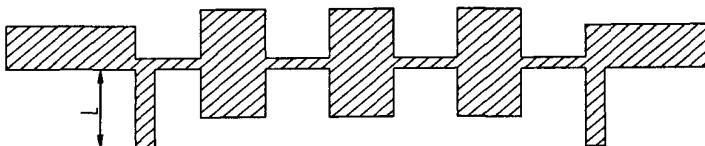


图 2. m 推演式与定 K 式滤波器的实际图，其中 $L = \lambda_s/4$, $f_c = f_0/\sqrt{1-m^2}$

根据以上计算的尺寸进行了制版，装配后进行测试，一次成功，整个体积为 $25 \times 15 \times 8(\text{mm}^3)$ ，比较小，符合要求。

5 实测结果

用标量网络分析仪测得的图形如图 3 所示。

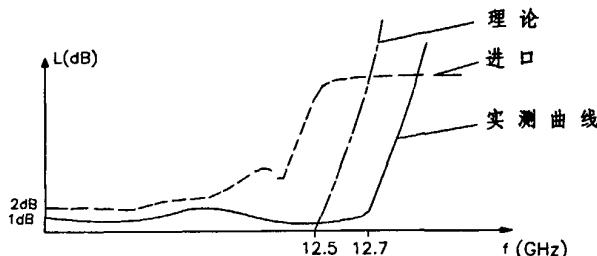


图 3. 滤波器特性曲线对比图

指标: $L_p \leq 1\text{dB}$ 通带 $W_b = 0 \sim 12.7\text{GHz}$ 阻带: 在 14GHz 处 $L_s \geq 30\text{dB}$

从曲线上看，在阻带区衰减陡度同理论计算非常一致，在整个 $0 \sim 12.7\text{GHz}$ 内曲线平稳，

无明显起伏。

6 后言

根据理论推算寄生通带大于 40GHz 以上。故比较成功地抑制了高次谐波，理论计算的曲线与实际制作后的特性指标曲线非常吻合，达到了技术要求。

参考文献

1. 《线性电路分析》 吴大正编, 国防工业出版社
2. 《微波技术》 李树范编, 教材
3. 《微波集成电路设计》 顾其净等编, 人民出版社出版

微波滤波器设计培训——视频课程

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养，是国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地。客户遍布中兴通讯、研通高频、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们推出的微波滤波器设计培训专题，有资深工程师领衔主讲，课程既有微波滤波器设计原理的详细解释，也有各种仿真分析工具的实际设计应用讲解，设计原理和设计仿真实践相结合，向大家呈现各种结构的微波滤波器的完整设计流程。旨在帮助大家透彻地理解并实际的掌握各种微波滤波器的设计。



微波滤波器设计培训专题视频课程

高清视频，专家授课，中文讲解，直观易学；既有微波滤波器设计原理的详细解释，也有像 ADS、CST、HFSS 各种仿真分析工具的实际设计应用讲解，旨在帮助大家透彻地理解并实际的掌握各种微波滤波器的设计。

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/filter/>

更多专业培训课程：

- **HFSS 视频培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/>

- **CST 视频培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/cst/>

- **天线设计专业培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/>

专注于微波、射频、天线设计人才的培养

易迪拓培训

官方网址: <http://www.edatop.com>

淘宝网店: <http://shop36920890.taobao.com>