

截止波导及其对消失模滤波器设计的应用

中国电子科技集团第 54 研究所 李志永

摘要 简要分析了截止波导的传输特性。文献指出,当管壁无耗时,其传输常数为实数,并且特性阻抗是纯电感。在此基础上,结合传输线设计理论和微波网络理论,推导出了一定长度截止波导的等效电路,利用这些结果和普通滤波器的设计理论推出了消失模滤波器的设计方法。最后应用此方法设计了一个三腔截止波导滤波器,用实践对理论进行了验证。

关键词 截止波导 微波网络 消失模滤波器

1 引言

早在二十世纪三十年代,就有人用截止波导制作衰减器了,但是发明者当时并没有提出相应的理论。随着微波技术的发展,涌现出了一大批介绍截止波导的文章及书籍。用尺寸比较小的截止波导来实现滤波器回路是当今的热门研究课题。

从概念上讲,截止波导具有很强的插入损耗,它并不传输行波,即对于单一的消失波来说,在无限长的波导中几乎不传输能量。但文献指出,在一特定的条件下,比如存在所谓“接受极子”时,截止波导将会出现反射,从而传输一部分能量,截止波导滤波器正是根据这个道理出现的。按一定的边界条件,在截止波导中插入若干电容性的膜片或圆销钉可以起到接受极子的作用,可以做成具有一定带宽的滤波器。从另一方面来讲,截止波导的阻抗特性呈感性,如在合适的位置插入容性的障碍物,即可与之形成谐振,由此可以制成滤波器。

2 截止波导的等效电路

由网络理论知,任何一个二端口网络都可以用一个 T 形或 π 形电路表示,对于一般的截止波导,它也是一个二端口网络,可以用图 1 表示,其转换公式为:

$$Z_1 = Z_{01} - \sqrt{Z_{02}(Z_{01} - Z_{S1})} \quad (1)$$

$$Z_2 = Z_{02} - \sqrt{Z_{02}(Z_{01} - Z_{S1})}$$

$$Z_3 = \sqrt{Z_{02}(Z_{01} - Z_{S1})}$$

其中, Z_{01} 、 Z_{S1} 为图 1(a) 中 2 口断路和短路时 1 口的阻抗; Z_{02} 、 Z_{S2} 分别为图 1(a) 中 1 口断路和短路时 2 口的阻抗。

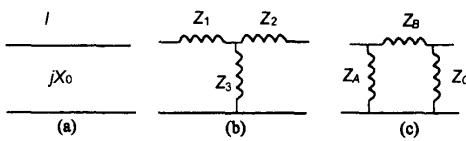


图 1 截止波导的等效电路

图 1(b) 中 T 形网络又可以转换为图 1(c) 所示的 π 形网络,转换公式为:

$$Z_A = Z_1 + Z_3 + \frac{Z_1 Z_3}{Z_2} \quad (2)$$

$$Z_B = Z_1 + Z_2 + \frac{Z_1 Z_2}{Z_3} \quad (3)$$

$$Z_C = Z_2 + Z_3 + \frac{Z_2 Z_3}{Z_1} \quad (4)$$

对于截止波导,其特性阻抗可以表示为:

$$Z_0 = jX_0 + R \quad (5)$$

在无耗的情况下, $R = 0$, 则式(3)变为:

$$Z_0 = jX_0 \quad (6)$$

可以计算出,对于一定长度的截止波导有:

$$Z_{S1} = Z_0 \tanh \gamma l = jX_0 \tanh \gamma l$$

$$Z_{01} = Z_0 \cosh \gamma l = jX_0 \cosh \gamma l$$

$$Z_{S2} = Z_0 \tanh \gamma l = jX_0 \tanh \gamma l$$

$$Z_{02} = Z_0 \cosh \gamma l = jX_0 \cosh \gamma l$$

从而可以得出图 1(b) 中 T 形网络的参数值及图 1(c) 中 π 形网络的参数值:

$$Z_1 = Z_2 = jX_0 \tanh \frac{\gamma l}{2} \quad (7)$$

$$Z_3 = \frac{jX_0}{\sinh \gamma l}$$

$$Z_A = Z_C = jX_0 \coth \frac{\gamma l}{2}$$

$$Z_B = jX_0 \sinh \frac{\gamma l}{2}$$

这样,可把理想的截止波导用传输线理论转化成图 1 中的等效 T 形或 π 形电路。

3 消失模滤波器的设计

工作在截止频率以下的波导被称为截止波导,利用截止波导制成的滤波器被称为消失模滤波器。在截止波导中间加入容性的障碍物如膜片或圆销钉就可以形成谐振腔,下面我们介绍一下以并联形式开始的消失模滤波器的设计。

图 2 是以并联形式开始的消失模滤波器及其等效电路,实线框中的电路可看做一个 J 变换器,它们

收稿日期:2003 年 10 月 28 日

把谐振器耦合起来。对于第一个和最后一个谐振电
路,谐振器只包含一个电感,而中间的谐振器则包含
两个电感,即:

$$B_1 = B_0 \coth \gamma l_1 \quad (8)$$

$$B_n = B_0 \coth \gamma l_n \quad (9)$$

$$B_i = B_0 (\coth \gamma l_{i-1} + \coth \gamma l_i) \quad i = 2, 3, \dots, n-1 \quad (10)$$

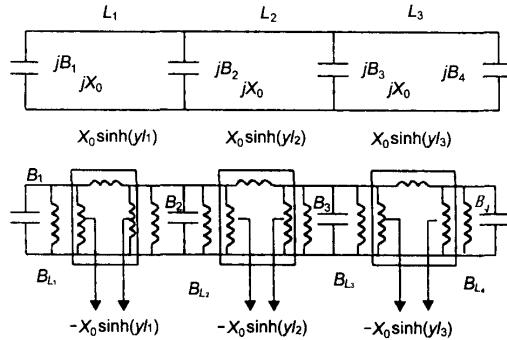


图 2 以并联谐振开始的消失模滤波器

图 3(a)是普通的带通滤波器对应的梯形网络,
图 3(b)是消失模滤波器经过 J 变换器后对应的等效
梯形网络。

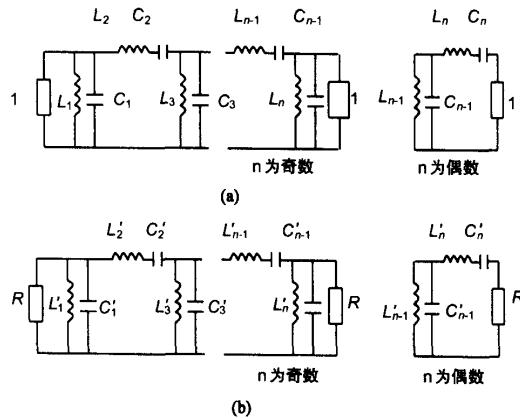


图 3 滤波器对应的梯形网络

图 3(b)中,

$$L_1^1 = \frac{1}{W_0 L_{e,1}} \quad (11)$$

$$C_2^1 = \frac{\sinh^2 \gamma l_1}{W_0 L_{e,2}} \quad (12)$$

$$L_3^1 = \frac{\sinh^2 \gamma l_2}{\sinh^2(\gamma l_1) W_0 L_{e,3}} \quad (13)$$

依此类推:当 n 为偶数时,

$$C_n^1 = \frac{\sinh^2 \gamma l_1 \sinh^2 \gamma l_3 \cdots \sinh^2 \gamma l_{n-1}}{\sinh^2 \gamma l_2 \sinh^2 \gamma l_4 \cdots \sinh^2 \gamma l_{n-2} \cdot W_0 L_{e,n}} \quad (14)$$

当 n 为奇数时,

$$L_n^1 = \frac{\sinh^2 \gamma l_2 \sinh^2 \gamma l_4 \cdots \sinh^2 \gamma l_{n-1}}{\sinh^2 \gamma l_1 \sinh^2 \gamma l_3 \cdots \sinh^2 \gamma l_{n-2} \cdot W_0 L_{e,n}} \quad (15)$$

图 3(b)是图 2 经过 J 变换器后的电路,所以图
3(b)与图 2 等效。我们将图 3(b)与图 3(a)比较可
以得到,对于第一个谐振腔有:

$$\frac{R}{\Delta W_0 L_{e,1}} = \frac{R_0 g_1 W_0}{W_2 - W_1} \quad (16)$$

对于第二个谐振腔有:

$$\frac{\sinh^2 \gamma l_1}{R \Delta W_0 L_{e,2}} = \frac{g_2 \omega_0}{R_0 (W_2 - W_1)} \quad (17)$$

其中,

$$\frac{1}{W_0 L_{e,1}} = \frac{1}{\coth \gamma l_1}$$

$$\frac{1}{W_0 L_{e,2}} = \frac{1}{\coth \gamma l_1 + \coth \gamma l_2}$$

$$\frac{1}{W_0 L_{e,i}} = \frac{1}{\coth \gamma l_{i-1} + \coth \gamma l_i}$$

由式(14)和(15)可以求出:

$$\sinh \gamma l_1 = \frac{\Delta \omega_0}{\omega_2 - \omega_1} \sqrt{g_1 g_2 \omega_0 L_{e,1} \omega_0 L_{e,2}} \quad (18)$$

同理,对第三个谐振电路进行比较可得:

$$\sinh \gamma l_2 = \frac{\Delta \omega_0}{\omega_2 - \omega_1} \sqrt{g_2 g_3 \omega_0 L_{e,2} \omega_0 L_{e,3}} \quad (19)$$

通用的表达式为:

$$\sinh \gamma l_i = \frac{\Delta \omega_0}{\omega_2 - \omega_1} \sqrt{g_i g_{i+1} \omega_0 L_{e,i} \omega_0 L_{e,i+1}} \quad (20)$$

对于窄带而言,上式可以简化为:

$$\sinh \gamma l_i = \frac{\Delta \omega_0}{2(\omega_2 - \omega_1)} \sqrt{g_i g_{i+1}} \quad (21)$$

在上面的式子中, Δ 是一项修正值[1],其值为:

$$\Delta = \frac{2}{1 + \frac{1}{1 - \left(\frac{\lambda_e}{\lambda_0}\right)^2}}$$

另外对于最平坦和切比雪夫响应滤波器有:

$$l_i = l_{n-i}, \tanh(\gamma l_0) = \tanh(\gamma l_n) \approx 1$$

l_0 和 l_n 分别是滤波器第一个谐振杆和第 n 个
谐振杆中心到滤波器端面的距离。

4 消失模滤波器设计举例

为了验证以上所述理论,我们进行了一个三腔
消失模滤波器的设计:

中心频率 1.5GHz, 相对带宽 1%;

材料选用 R48 波导(截止频率 3.1524GHz), 电
容谐振杆选用圆的金属杆,其半径取波导宽边的十
分之一,采用 0.01dB 的切比雪夫波纹,其低通元件
值为:

$$g_0 = g_4 = 1, g_1 = g_3 = 0.6291, g_2 = -0.9702.$$

消失模滤波器经网络分析仪观测到的结果如图4所示。注意,在滤波器的调整过程中,谐振频率会随着销钉的变化而变化,只要杆之间的距离计算得准确,杆距滤波器端面的距离和销钉尺寸选择的合适的话,肯定会调出理想的响应曲线。

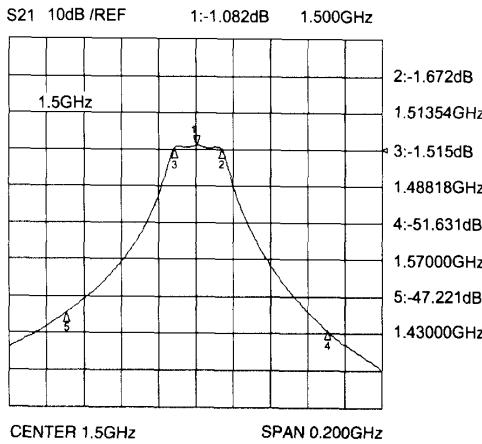


图4 消失模滤波器的响应曲线($n=3, f_0=1.5\text{GHz}$)

图5是三腔截止波导滤波器的结构示意图,在波导的H面固定了三根电容销钉,与特性阻抗为电感的截止波段形成了三个谐振腔。输入和输出采用同轴线。同轴线与波导谐振腔的耦合可以是电耦合,也可以采用磁耦合的方式。

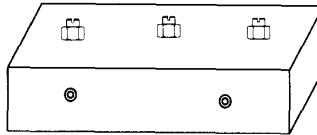


图5 三腔消失模滤波器结构

消失模滤波器设计理论通过实践得到了验证,其相对带宽在1%~10%范围内设计理论比较准确。这种滤波器可以通过同轴线实现输入输出耦合,也可以直接耦合到传输波导,但是为了消除在连接处的不连续性,要在连接处加一容性匹配螺钉。

在设计中心频率为1.5GHz的滤波器时,传统的波导滤波器的设计需要选用用BJ18波导,其横截面尺寸为129.54mm×64.77mm,而通过消失模滤波器的设计理论,仅仅选用了横截面尺寸为47.55mm×22.149mm的BJ48波导就满足了指标,其体积得到了大大减小(如果选择合适的波导型号,还可以使其体积进一步减小)。并且消失模滤波器结构简单,调谐方便,造价低廉。在插入损耗方面,文献[2]将消失模滤波器与梳状线滤波器做了比较并指出,在差

损相同的情况下,消失模滤波器可以做得比梳状线滤波器体积小30%,在体积相同的情况下,消失模滤波器可以做得比梳状线滤波器的差损低。另外还指出消失模滤波器可以用作可调滤波器、均衡器等,可见消失模滤波器具有广阔的应用前景。

参考文献

- [1] Graven, the Design of Evanescent Mode Waveguide Bandpass Filters for a Prescribed Insertion Loss Characteristic, IEEE Trans. on MTT, 1971; 19(3):295~308
- [2] Richard V. Snyder, New Application of Evanescent Mode Waveguide to Filter Design, IEEE Trans. on MTT, 1977; 25(12):1013~1021
- [3] 黄志沟. 截止波导理论导论. 北京: 中国计量出版社, 1991
- [4] 甘本, 吴万春. 现代微波滤波器的结构与设计. 科学出版社, 1973

作者简介

李志永 男 通信测控技术研究所硕士研究生。

(上接第40页)

度,很好的阻抗匹配,为此可作为毫米波双极化微带天线阵的组阵单元。

参考文献

- [1] D. M. Sheen et al. Application of the Three-Dimensional Finite-Difference Time-Domain Method to the Analysis of Planar Microstrip Circuits [J]. IEEE Trans. MTT, 1990; 38(7): 849~856
- [2] J. P. Berenger. A Perfectly Matched Layer for Absorption of Electromagnetic Waves [J]. Journal of Computer Physics, 1994; 114: 185~200
- [3] J. B. Verdu et al. An Extension of the PML Technique to the FDTD Analysis of Multiplayer Planar Circuits and Antennas [J]. Microwave and Optical Technology Letters, 1995; 10(6): 323~327
- [4] J. P. Berenger. Three-Dimensional Perfectly Matched Layer for Absorption of Electromagnetic Waves [J]. Journal of Computer Physics, 1996; 127: 363~379
- [5] An Ping Zhao, Antti V. R. Application of a Simple and Efficient Source Excitation Technique to the FDTD Analysis of Waveguide and Microstrip Circuits [J]. IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques, 1996; 44(9): 1535~1539

作者简介

陈晓梅 (1976~),女,内蒙古东胜人,硕士研究生,主要从事天线理论与计算、电磁场数值计算方面的研究。

杨雪霞 (1969~),女,副教授,主要从事电磁场数值计算及其有源微带天线方面的研究。

《无线电工程》期刊

信息产业部优秀电子科技期刊

邮发代号:18-150

欢迎订阅

欢迎投稿

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>