

# 0 阶谐振器椭圆函数滤波器的设计仿真

吴须大 禹旭敏 杨军

(西安空间无线电技术研究所, 西安 710000)

**摘要** 文章介绍了由复合左右手微带传输线构成的 0 阶谐振器的一般特性及其设计滤波器的工程设计方法。应用该方法设计了相对带宽为 10%、中心频率为 2GHz 的带通滤波器, 通过使用 Ansoft HFSS 高频仿真软件的仿真, 获得了 4 阶椭圆函数滤波器传输特性, 其电性能优良。经与其他类型滤波器相比较, 这种 0 阶谐振器椭圆函数滤波器具有小型、工作频带宽的特点。

**关键词** 滤波器 复合左右手微带传输线结构 0 阶谐振器

## 0 引言

对于两端开路(或短路)的普通传输线形式谐振器, 当谐振器长度  $L$  一定时, 满足(1)式的频率都能谐振。

$$\beta_n L = n\pi \quad n=1, 2, 3, \dots \quad (1)$$

式中,  $\beta_n$  是普通传输线相位常数;  $n$  是谐振器阶数, 可以为任意正整数。这表明传输线形式的谐振器具有多谐性。但  $n$  不能为 0, 如果为 0, 意味着相位常数  $\beta_0 = 0$ , 这可以用两种情况来分析: 对于 TEM 波, 只有当频率为 0 时相位常数  $\beta_0 = 0$ ; 对于 TE 波或 TM 波, 只有当频率等于该传输线截止频率时, 相位常数  $\beta_0 = 0$ , 此时群速等于 0, 波不能有效传输。

但复合左右手微带传输线不一样, 它有一个明显的特点, 即在非 0 频率上相位常数  $k$  可以等于 0, 而此时群速不为 0, 波能传输<sup>[1,2]</sup>。由此, 组成复合左右手微带传输线的单元晶格可以构成 0 阶谐振器。参考文献[3]采用高频仿真软件 Ansoft HFSS, 验证了 0 阶谐振器在微波滤波器设计中应用的可行性。文章同样采用高频仿真软件进一步设计仿真了结构新颖的 4 阶椭圆函数滤波器。

## 1 0 阶谐振器的基本特性<sup>[1,2]</sup>

在参考文献[2]的图 18 中, 已给出了一种 0 阶谐振器。文章在此基础上, 根据滤波器应具有较小的尺寸、较宽的工作带宽、较高的无载  $Q$  值等实际要求, 进行了综合分析, 做了适应性改进, 形成了结构类似于参考文献[2]、而又比较独特的 0 阶谐振器, 其简易结构如图 1(a)所示。

由图 1(a)可见, 该谐振器是由两端通过容性裂缝开路的单元晶格构成。对于终端开路的微带单元晶格结构, 在忽略了有耗复合左右手传输线串联电阻  $R$  和并联电导  $G$  的情况下, 其输入阻抗可近似表示成:

$$Z_{in} = -jZ_0 \cotg(kd) \quad (2)$$

$$\text{其中 } k = \sqrt{\left[\omega L_0 - \frac{1}{\omega C_d}\right] \left[\omega C_0 - \frac{1}{\omega L_d}\right]}$$

收稿日期: 2007-11-30; 收修改稿日期: 2008-06-19

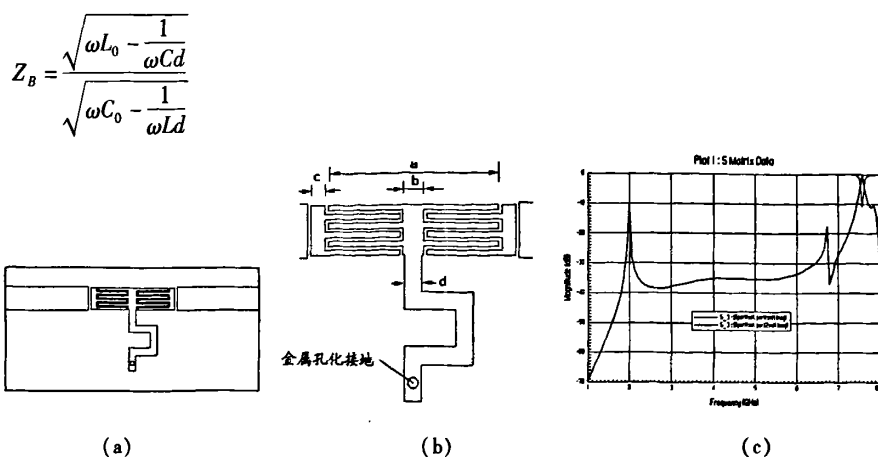


图1 0阶谐振器

(a) 平面外形结构; (b) 结构参数; (c) HFSS 仿真的宽带幅频特性

$L$ 、 $C$  分别是周期加载的并联电感和串联电容;  $L_0$ 、 $C_0$  是非加载传输线每单位长度的串联电感和并联电容;  $d$  是单元尺寸。

当  $kd \ll 1$  时,  $\text{ctg}(kd) \approx 1/kd$ 。这样, (2) 式可简化为:

$$Z_{in} \approx -j \frac{1}{(\omega C_0 d - \frac{1}{\omega L})} \quad (3)$$

因此, 终端开路的微带单元晶格结构呈现的是并联谐振器特性, 该谐振器的谐振频率为:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{C_R L}} \quad (4)$$

它表明谐振频率仅与分布电容  $C_R$  ( $C_R(C_0 d)$ ) 和加载的电感  $L$  有关。这一点比较重要, 无论是设计还是调试, 都是着眼于这两个参数, 特别是在调试谐振器谐振频率时, 改变加载的电感  $L$  是比较容易的事。

文献[2]也给出了0阶谐振器的无载  $Q$  值:

$$Q_0 = \frac{\sqrt{C_R/L}}{G} \quad (5)$$

这里使用的0阶谐振器形状结构和有关参数见图1(b)。所使用的介质基片为 Rogers Ro4003c,  $\epsilon_r = 3.38$ ,  $\tan \delta = 0.002$ ,  $h = 1.32$ , 覆铜厚度设定为  $0.035\text{mm}$ 。在图1(b)中,  $a = 10\text{mm}$ ,  $b = 1.2\text{mm}$ ,  $c = 0.8\text{mm}$ ,  $d = 1\text{mm}$ , 金属化孔直径为  $0.6$ , 所有的交指指宽为  $0.3\text{mm}$ , 电容间隙为  $0.2\text{mm}$ 。此时, 加载的短路短截线电感  $L$  是调节谐振器谐振频率的主要手段, 其长度是使该谐振器谐振频率在  $2\text{GHz}$  左右。

使用 Ansoft HFSS 软件对图1(a)进行了宽频带仿真, 其幅频特性如图1(c)所示。由图1(c)可见, 高端频率直至  $6\text{GHz}$  没有出现谐波。显然, 由复合左右手微带传输线单元晶格构成的0阶谐振器具有工作频带宽的特点。

利用这种谐振器可以设计成各种特性的滤波器, 下面就椭圆函数特性滤波器的设计仿真作一介绍。

## 2 滤波器耦合参数的设计仿真方法

### 2.1 耦合尺寸的设计仿真方法

在带通滤波器设计过程中,一个重要的环节是根据归一化的耦合系数去决定输入输出耦合机构的尺寸和谐振器之间的耦合尺寸。在理论上,这些耦合尺寸可以通过计算近似获得,但在 0 阶谐振器的电磁场分布相当复杂的情况下,也可以在滤波器的实际结构中通过对称谐振器对的耦合测量技术加以实现。如果谐振器与外部耦合很弱和忽略谐振器无载  $Q$  值影响的情况下,在过耦合状态,使用 Ansoft HFSS 高频仿真软件,测出传输双峰幅频特性的中心频率  $f_0$ 、低端峰值频率  $f_a$  和高端峰值频率  $f_b$ ,则谐振器之间的耦合系数  $k_c$  可以近似为:

$$k_c \approx \frac{f_b - f_a}{f_0} \quad (6)$$

因此,通过改变有关的几何尺寸,使实测的耦合系数与理论要求的相等,从而获得需要的相关尺寸。耦合系数  $k_{1,2}$ 、 $k_{2,3}$ 、 $k_{1,4}$  的仿真模型分别表示在图 2(a)、图 2(b) 和图 2(c)。

关于输入输出耦合的测量方法较多,分为单加载和双加载两类,都可使用,不在这里介绍。

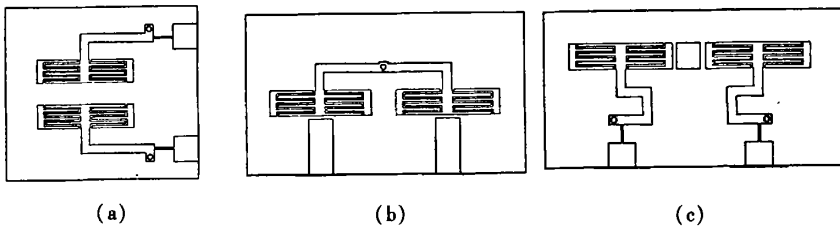


图 2 测量传输双峰幅频特性的仿真模型:(a)  $k_{1,2}$ ; (b)  $k_{2,3}$ ; (c)  $k_{1,4}$

## 2.2 源与负载之间的耦合

由图 2 的仿真模型可见,源与负载  $50\Omega$  微带传输线间距约 15mm 左右,由此产生的互耦合往往反映在图 2 的测量传输幅频特性中,即在传输双峰幅频特性的高、低带外频率上分别形成一个衰减极点。经仿真实验,该耦合属于磁耦合。因此,可分两种情况进行分析:

当谐振器之间采用电耦合时,如图 2(a) 和图 2(c),在带外能产生衰减极点;如果将图 2(c) 中的输入输出由抽头耦合改成如图 2(b) 那样通过缝隙耦合的形式,同样产生衰减极点;而如果把图 2(c) 中的输入输出由抽头耦合改成类似于图 1(a) 那样从两端通过缝隙相耦合的形式,从而拉大源与负载  $50\Omega$  微带传输线间距,也能产生衰减极点,但产生的衰减极点的位置将离谐振频率很远。

而当谐振器之间采用磁耦合时,如图 2(b),在带外就不产生衰减极点。

虽然源与负载之间的耦合很弱,但仍可以在滤波器的设计中加以利用。如图 3 的 2 阶滤波器,由于存在源与负载之间的耦合,从而大大提高了带外衰减陡度。

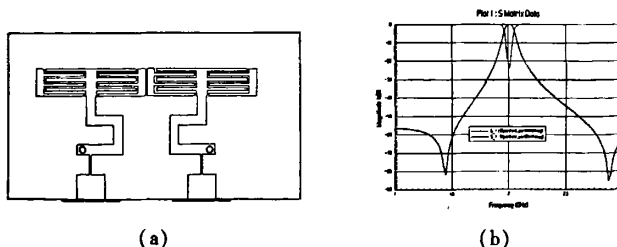


图 3 具有衰减极点的 2 阶滤波器:(a) 结构; (b) 传输特性

## 3 4 阶椭圆函数滤波器的设计仿真

### 3.1 滤波器的设计仿真

滤波器的基本结构如图 4 所示。在该滤波器中采用了 4 个“蘑菇”状 0 阶谐振器,对称排列,输入输出采用了通常使用在螺旋滤波器或同轴滤波器的抽头耦合形式,抽头点的位置选在金属孔化接地附近,具体位置由输入输出耦合大小而定;谐振器 1 和谐振器 2 采用“蘑菇”顶端之间容性间隙进行耦合,谐振器 3 和谐振器 4 之间也是如此;谐振器 2 和谐振器 3 之间有一个公共金属孔化接地电感(相当于一段短的高阻抗接地传输线),该电感既是 0 阶谐振器的一个组成部分,又是两谐振器之间的耦合机构的一个组成部分。该耦合机构可以看成短路短截线,在金属孔化直径固定的情况下,短路短截线长短决定耦合大小。由于谐振器 1 和谐振器 4 之间间距较大,为了产生电耦合,安置了一段短的传输线,类似于同轴滤波器中谐振器之间常用的耦合探针。输入输出传输线选用  $50\Omega$ ,介质基片的损耗角正切为  $\tan\delta=0.002$ ,微带、金属化孔和盒体等工作面的材料选为铜,电导率  $\sigma$  为  $5.8 \times 10^7$  siemens/meter。

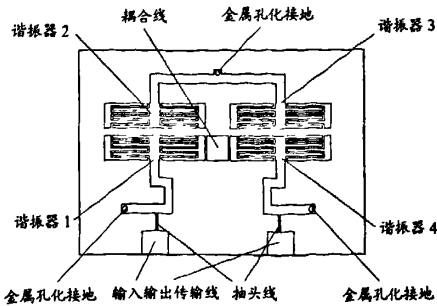


图 4 4 阶滤波器的基本结构

所设计的滤波器的中心频率在 2GHz,通带相对带宽为 10%,4 阶椭圆函数传输特性,其归一化耦合系数为  $R=1.071, M_{1,2}=0.900, M_{2,3}=0.731, M_{1,4}=-0.074$ ,源与负载之间的耦合很小,约在 0.0009 左右。由归一化耦合系数和相对带宽决定滤波器的耦合系数。根据上一节的仿真测量方法,分别确定有关的耦合尺寸。经过组合和轻微精细的调试,获得了如图 5 所示的仿真电性能。

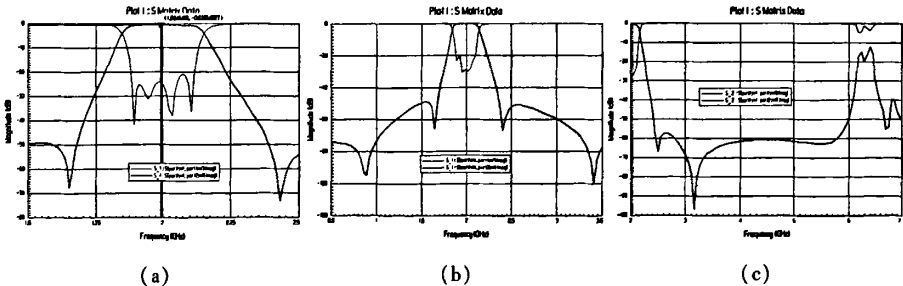


图 5 4 阶椭圆函数滤波器的仿真电性能：  
(a)带内特性;(b)近带带外特性;(c)高端远带带外特性

从图 5 仿真的电性能可见,中心频率  $f_0$  约在 1 995MHz,很接近 2GHz;中心频率衰减为 0.65dB (相对于介质  $\tan\delta=0.02$ ,金属铜  $\sigma=5.8 \times 10^7$  S/m);通带相对带宽稍大于 10%;通带两边各产生了两个衰减极点,两边基本对称;通带高端远带带外衰减特性较好,从 2.4GHz 到 6GHz 衰减都在 50dB 以上(见图 5(c));阻带带宽较宽,谐波出现在  $3f_0$  以上,基本达到了预期的设计目的。

3.2 与其他类型微带滤波器性能的比较

在相同的介质基片和相同的谐振频率情况下,0 阶谐振器具有的无载 Q 值可以与半波长微带谐振器相比较<sup>[2]</sup>,而尺寸要比半波长微带谐振器小得多;当然,谐波特性也要比半波长谐振器好得多。0 阶谐振器就是与四分之一波长微带谐振器相比,同样占优势,现用两个滤波器来说明。

图 6 是从参考文献[4]拷贝的、应用四分之一波长微带谐振器实现的 4 阶椭圆函数滤波器。设计的中心频率在 2GHz,通带 3dB 相对带宽为 10%,所有微带电路加工在一个 Rogers RO4003c 介质基片上。该介质基片参数也与本文相同。因此可以作有关的比较。

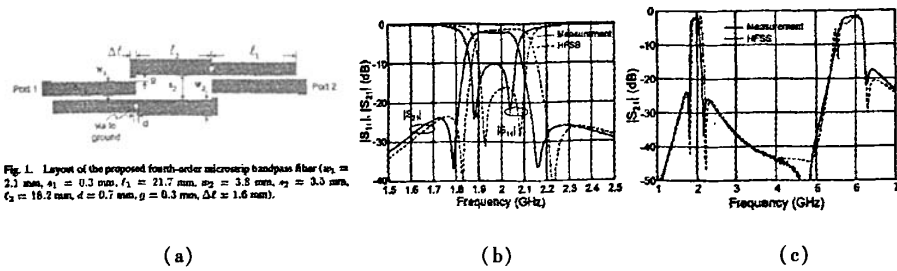


图 6 从参考文献拷贝的 4 阶椭圆函数滤波器：  
(a) 结构；(b) 通带特性；(c) 远带衰减特性

图 7 是结构较紧凑的 4 阶椭圆函数微带滤波器<sup>[5]</sup>，显然也是应用四分之一波长微带谐振器实现的。图 7(b)、7(c)是从该参考文献<sup>[5]</sup>中提取有关的几何尺寸参数应用到本文所采用的介质基片型号上，通过相同的 Ansoft HFSS 仿真软件获得仿真性能，通带中心频率在 2 025MHz，很接近 2GHz，相对带宽较小，约为 8%。也可以作近似的比较。

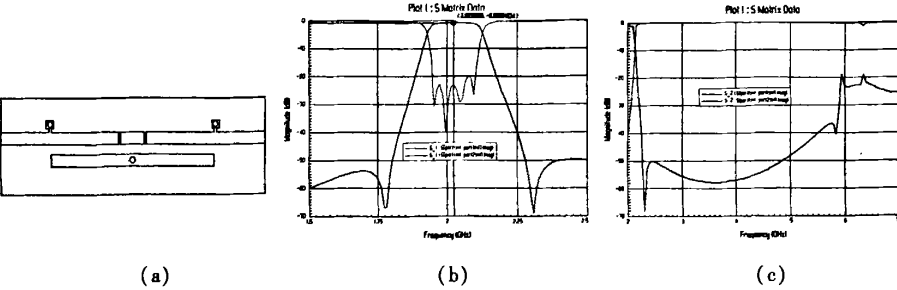


图 7 结构较紧凑的 4 阶椭圆函数微带滤波器：  
(a) 结构；(b) 通带特性；(c) 远带衰减特性

这三种 4 阶椭圆函数滤波器有关大小和阻带高端特性的简要比较见表 1。

表 1 4 阶椭圆函数滤波器简要比较

滤波器类型	滤波器大小	通带相对带宽	阻带高端最近谐波频率
0 阶谐振器滤波器	22mm×33mm (含输入输出 50Ω 线长度，以及微带与盒体侧壁之间空间的整个盒体)	10% (等波纹相对带宽)	6.2GHz
从参考文献[4]拷贝的滤波器结构和性能	62mm×11mm (不包括输入输出 50Ω 线长度，以及微带与盒体侧壁之间的空间)	10% (3dB 相对带宽)	5.5GHz
从参考文献[5]提取的几何参数应用到本文所采用的介质基片上仿真的滤波器性能	70mm×24mm (含输入输出 50Ω 线长度，以及微带与盒体侧壁之间空间的整个盒体)	8% (等波纹相对带宽)	5.9GHz

由表 1 可见：应用 0 阶谐振器设计的 4 阶椭圆函数滤波器要比应用四分之一波长微带谐振器设计的尺寸还要小；工作带宽要宽，远带衰减要好。

5 结论

文章首先介绍了复合左右手微带传输线构成的 0 阶谐振器的一般特性和设计该种滤波器的工程设计方法。应用该方法设计了中心频率在 2GHz、相对带宽为 10% 的带通滤波器，经使用 Ansoft HFSS

高频仿真软件的仿真,获得了带外共具有 4 个衰减极点的 4 阶椭圆函数滤波器特性,电性能优良,基本达到设计仿真的目的。接着在介质基片一样、中心频率也基本一样的情况下,与两个 4 阶四分之一波长微带谐振器椭圆函数滤波器作了简要的比较,其比较结果表明:利用 0 阶谐振器设计的 4 阶椭圆函数滤波器具有体积小、工作频带宽等特点,因此,拥有一定的工程应用前景。

### 参考文献

- [1] Eleftheriades G V, Balmain K G. Negative-refraction metamaterials. IEEE Press, Published by John Wiley Sons, Inc., 2005
- [2] Lai A and Itoh T. Composite right/left-handed transmission line metamaterials. IEEE Microwave Magazine; 34 ~ 50, Sep. 2004
- [3] 吴须大. 复合左右手微带传输线滤波器的探讨仿真. 卫星有效载荷技术学术论文集. 2007
- [4] Lin Y S, Wang C H, Wu C H and Chen C H. Novei compact parallel-coupled microstrip bandpass filters with lumped-element K-inverters. IEEE Trans. on Microwave Theory Tech., 2005, 53(7): 2324 ~ 2328
- [5] 吴须大. 结构紧凑的微带滤波器的仿真. 卫星有效载荷技术学术论文集. 2007

### 作者简介

吴须大 1940 年生, 1966 年毕业于中国科学技术大学, 研究员, 已发表论文数十篇。主要研究方向为电磁场的数值计算、毫米波器件的分析与优化、卫星有效载荷技术的研究等。

(上接第 10 页)

## 5 结论

文章提出并论证了中继星星间链路 Ka 天线(中继星天线或用户星天线)对目标的扫描捕获方法, 采用阿基米德螺旋扫描轨迹, 且采用恒线速度比采用恒角速度的螺旋扫描捕获方法更好。因为其螺距相等, 易于实现全覆盖扫描范围; 它的曲线平滑且线速恒定, 有利于对目标信号的发现和捕获; 天线方位角速度幅值及俯仰角速度幅值不因扫描圈数的增加而增大, 这对卫星姿态冲击影响小。

文中导出了扫描轨迹方程和天线方位俯仰转角表达式, 论述了此方法的性能和扫描参数的选择, 分析计算证明了设计的扫描捕获方法的有效性。

### 参考文献

- [1] 于瑞霞, 黎孝纯. 中继星星间链路天线扫描捕获方法的研究[A]. 星间链路技术研讨会论文集. 2004
- [2] 王晰, 经姚翔. 窄波束天线捕获运动目标方法[A]. 空间电子学学术年会论文集. 2004
- [3] 经姚翔. 窄波束天线扫描搜索参数分析[A]. 空间电子学学术年会论文集. 2004
- [4] 孙小松, 杨涤等. 中继星天线指向控制策略研究[J]. 宇航学报. 2004(4)
- [5] 李于衡, 刘宁宁. 在轨跟踪与数据中继卫星测控关键技术[J]. 上海航天. 2006(4)
- [6] 黎孝纯, 王珊珊, 余小川. 中继星天线程控指向用户星的方位角和俯仰角计算[J]. 空间电子技术. 2007(4)

### 作者简介

黎孝纯 1938 年生, 1962 年毕业于成都电讯工程学院(现电子科大)雷达专业, 研究员。长期从事卫星跟踪测量、卫星通信技术的研究。

于瑞霞 1973 年生, 1997 年硕士研究生毕业, 高级工程师。现从事卫星测控通信技术研究。

闫剑虹 1972 年生, 1998 年硕士研究生毕业, 高级工程师。现从事卫星测控通信技术研究。

## 微波滤波器设计培训——视频课程

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立, 致力和专注于微波、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/>