

复合左右手微带传输线滤波器的探讨仿真

吴须大

(西安空间无线电技术研究所, 西安 710000)

摘要 文章分析了复合左右手微带传输线单元晶格的等效电路, 并从微波滤波器的角度对分析结果进行了仿真; 着重对单元晶格构成的0阶谐振器在微波滤波器领域中的应用进行了探讨; 仿真了3种输入、输出耦合形式的滤波器, 其滤波器的电性能良好; 验证了0阶谐振器在微波滤波器设计中应用的可能性, 也提供了可行的实现途径。

主题词 滤波器 复合左右手微带传输线结构 0阶谐振器

0 引言

复合左右手传输线具有超越常用右手传输线的传输特性, 可以实现负的等效磁导率和介电常数。这种复合左右手微带线由串联的交指电容和并联的短路短截线电感单元组成, 形成一个宽带小插损的左手通带, 从而在微波部件中得到开创性的广泛应用。据文献^[1~4]介绍, 目前在微波部件设计中, 首先是作为一个小型、宽带相移传输线应用在宽带功率合成器、耦合器、巴伦等部件, 以及应用在天线馈源系统; 同时作为谐振器使用也有了开拓性的发展, 设计了袖珍的共面波导形式的双通带滤波器^[5~7]。

文章也利用这种由“串联的交指电容和并联的短路短截线电感”组成的复合左右手微带传输线结构(类似于参考文献[8]中的图18), 应用滤波器的工程设计技术, 通过HFSS高频仿真软件, 对这种结构形式的微波滤波器的实现进行了探讨。

1 周期复合传输线的基本分析^[1]

这种复合左右手微带传输线结构单元晶格的等效电路表示在图1。

该单元等效电路由周期加载的串联电容 $2C$ 、并联电感 L 和短互联传输线组成。其中 β 是短互联传输线的传播常数; d 是该单元尺寸; 而且 $\beta d \ll 1$ 。如无限接连该单元晶格, 则第 n 单元晶格另一边上的电压和电流可以使用传输矩阵 $(ABCD)$ 相关系:

$$\begin{pmatrix} V_n \\ I_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_{n+1} \\ I_{n+1} \end{pmatrix} \quad (1)$$

其中, A 、 B 、 C 、 D 是单元传输矩阵的元。该单元传输矩阵是由构成该电路的电容 $2C$ 、 $\beta d/2$ 部分传输线、电感 L 、第二个 $\beta d/2$ 部分传输线、第二个电容 $2C$ 共5个元件矩阵的积。

根据Floquet理论, 由(1)式得

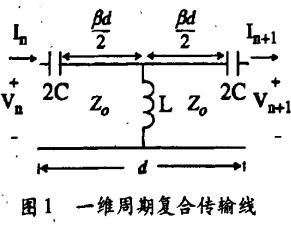


图1 一维周期复合传输线

单元晶格的等效电路

$$\begin{pmatrix} V_n \\ I_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_{n+1} \\ I_{n+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{n+1} e^{-jkd} \\ I_{n+1} e^{-jkd} \end{pmatrix} \quad (2)$$

其中 k 是单元晶格的 Bloch 传播常数, 是一个复数。经过运算和简化后得图 1 所示的复合传输线色散方程式:

$$\cos(kd) = A \quad (3)$$

定义在单元端头上的 Bloch 阻抗为:

$$Z_B^{\pm} = \frac{\pm B}{\sqrt{A^2 - 1}} = \frac{\mp jB}{D \tan(kd)} \quad (4)$$

用传输线参数($\beta d, Z_0$)和电感 L 、电容 $2C$ 的值来表示传输矩阵的元(A, B, C, D), 则(3)、(4)可表示为:

$$\sin^2(kd/2) = \left[\sin(\beta d/2) - \frac{\cos(\beta d/2)}{2\omega C Z_0} \right] \left[\sin(\beta d/2) - \frac{Z_0 \cos(\beta d/2)}{2\omega L} \right] \quad (5)$$

$$Z_B^{\pm} = \pm \frac{Z_0 \tan(\beta d/2) - \frac{1}{2\omega C}}{\tan(kd/2)} \quad (6)$$

设复合传输线的互联传输线部分足够短, 这样 $\beta d \ll 1$; 同时设复合传输线单元相移足够小, 即 $kd \ll 1$ 。在这两个假设的条件下, 色散等式和 Bloch 阻抗可进一步简化为:

$$k^2 = \left[\omega L_0 - \frac{1}{\omega C d} \right] \left[\omega C_0 - \frac{1}{\omega L d} \right] \quad (7)$$

$$Z_B = \frac{\sqrt{\omega L_0 - \frac{1}{\omega C d}}}{\sqrt{\omega C_0 - \frac{1}{\omega L d}}} \quad (8)$$

其中 L_0, C_0 是非加载传输线每单位长度的电感、电容, $\beta = \omega \sqrt{L_0 C_0}$, $Z_0 = \sqrt{L_0/C_0}$ 。当 $\omega L_0 < \frac{1}{\omega C d}$ 时, 复合传输线的串联电抗 $\omega L_0 - \frac{1}{\omega C d}$ 变成负, 从而使等效磁导率为负; 同样, 当 $\omega C_0 < \frac{1}{\omega L d}$ 时, 并联电纳 $\omega C_0 - \frac{1}{\omega L d}$ 变成负, 从而使等效介电常数为负。因此, 可以有以下几种情况来分析:

- (1) 当复合传输线的串联电抗和并联电纳都为负, 则 k 为负, 起着一个负折射率介质作用, 即左手异性介质作用;
- (2) 当复合传输线的串联电抗或并联电纳一个为负, 则 k 为虚数, 波不能在复合传输线上传输;
- (3) 当复合传输线的串联电抗和并联电纳都为正, 则 k 为正, 此时复合传输线和普通传输线一样;
- (4) 当复合传输线的串联电抗或并联电纳一个为 0, 则 k 在非 0 频率上为 0, 此时该单元晶格可以构成 0 阶谐振器。

由(1)、(2)和(3)分析可见, 当图 1 单元等效电路元件参数固定, 以频率为变量, 则该电路呈现高通滤波器特性, 称为左手通带, 它的低端紧靠 Bragg 频率 ω_B , $\omega_B \approx 1/2\sqrt{LC}$; 它的高端是具有截止频率为 ω_{c1}, ω_{c2} 的阻带。随着频率再增高, 跟随该阻带的是右手通带。

2 复合传输线单元晶格特性的仿真

仿真所使用的介质基片为 RT/Duroid5870, 相对介电常数 $\epsilon_r = 2.33$ 。由于仿真设备的限制, 为了

尽量缩小仿真的范围,加载的并联电感短截线不用金属孔化的形式,而改用盒体侧壁直接接地。

2.1 单元晶格的幅频特性

复合左右手微带传输线单元晶格结构表示在图2(a),对它进行了宽频范围的仿真,获得了如图2(b)的单元晶格的幅频特性。由于该结构属于高通电路,高通3dB截止频率约在8GHz,频率往高直到接近15GHz,属于左手通带。根据以上分析,在该通带里,单元晶格的等效介电常数和等效磁导率都为负;同时对于长度为d的传输线相位移特性是领先($\phi = -kd$)。15GHz左右是阻带范围,此时单元晶格的等效介电常数或等效磁导率其中一个为负。再往频率高端即进入右手通带特性。在该通带范围内单元晶格的等效介电常数和等效磁导率都为正,其相位移特性是迟后。

正因为该结构在左手通带内具有与普通传输线不同的领先相位移特性,才使复合左右手微带传输线在微波和天线领域获得较广泛的应用。但从整个幅频特性看,该单个单元晶格结构也可以用作窄带阻滤波器;在返回损耗小于-20dB的范围内,左手通带带宽有1.5GHz,右手通带有1GHz带宽。

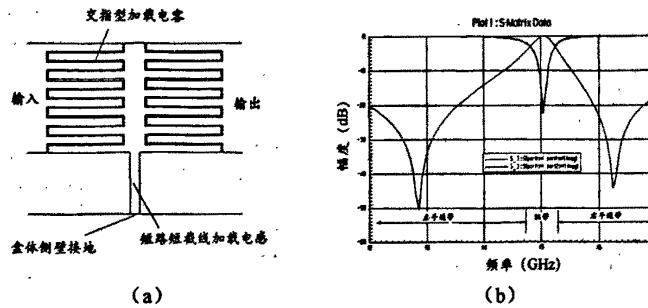


图2 复合左右手微带传输线单元晶格:(a)单元晶格结构;(b)单元晶格的幅频特性

2.2 3个单元晶格接连的幅频特性

多个单元晶格接连就可以组成电性能良好的复合左右手微带传输线左手通带。由于仿真设备的限制,使用了3个交指数较少的单元晶格进行接连,构成的微带传输线结构表示在图3(a),它的返回特性和传输特性表示在图3(b)。由图3(b)可见,该特性是一个性能良好的高通滤波器性能,高通截止频率在4.8GHz,返回损耗小于-20dB的左手通带带宽大于3GHz。

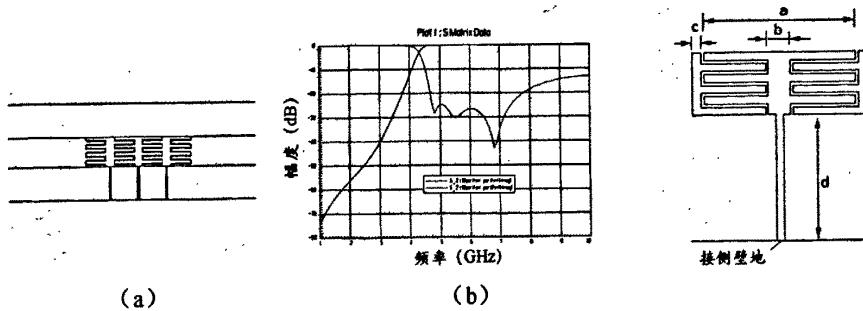


图3 3个单元晶格传输线:(a)结构;(b)幅频特性

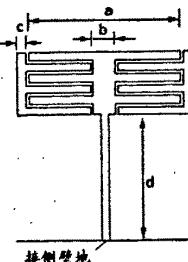


图4 0阶谐振器结构

3 0阶谐振器的应用仿真

对于第1节中第4点的基本分析可见,在非0频率上 $k=0$ 时,该单元晶格可以构成0阶谐振器。由(7)、(8)两式不难推出该谐振器的谐振频率为:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{C_R L}} \quad (9)$$

它表明谐振仅与分布电容 C_R ($C_R = C_0 d$) 和加载的电感 L 有关。同时横跨该谐振器的相移 $\phi = -kd = 0$ 。

文献[8]也给出了0阶谐振器的无载Q值:

$$Q_0 = \frac{\sqrt{C_R/L}}{G} \quad (10)$$

其中 G 是有损复合传输线的并联电导。

文中使用的0阶谐振器形状结构和有关参数见图4。

在图4中, $a = 2.08\text{mm}$, $b = 0.3\text{mm}$, $c = 0.12\text{mm}$, $d = 1.2\text{mm}$, 所有的电容间隙为 0.04mm , 交指指宽、短路短截线宽都为 0.1mm 。介质基片的相对介电常数仍然是2.33。为了简化, 介质基片的厚度设定为 0.7mm , 覆铜厚度设定为 0.04mm 。这样, 该0阶谐振器的谐振频率约在 11.5GHz 。下面就仿真探讨的三种3阶滤波器进行介绍。

3.1 列式容性输入输出滤波器

这种滤波器结构表示在图5(a), 3个单元晶格的0阶谐振器与输入、输出微带线排列在一条直线上, 其输入、输出耦合采用容性间隙的形式。仿真的滤波器带内特性表示在图5(b), $6\text{GHz} \sim 20\text{GHz}$ 的带外特性表示在图5(c)。

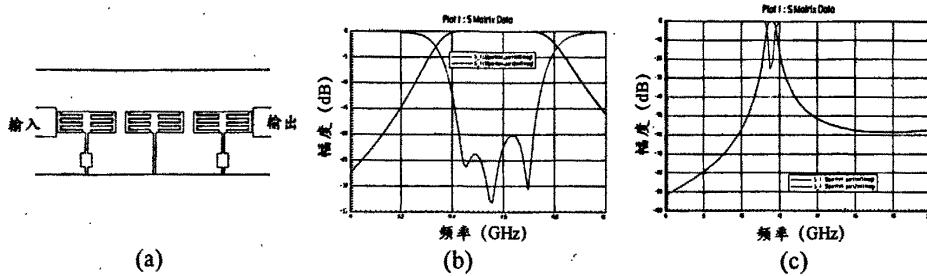


图5 列式容性输入输出滤波器:(a)结构;(b)带内特性;(c)带外特性

另外, 为了试探是否能缩小盒体空间, 采用了曲折线形式的短路短截线, 其结构表示在图6(a), 仿真的滤波器带内特性和 $6\text{GHz} \sim 20\text{GHz}$ 的带外特性分别表示在图6(b)和图6(c)。从而验证了利用曲折线形式可以缩短短路短截线直线长度。

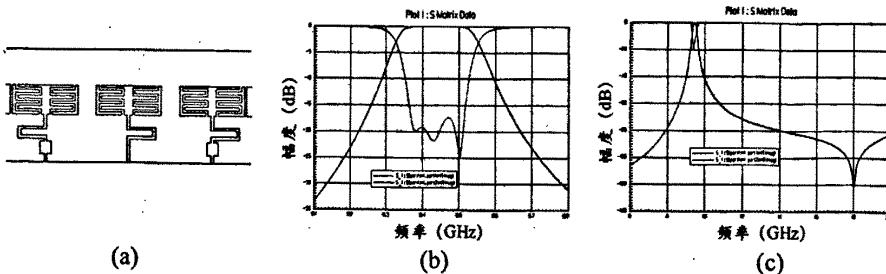


图6 曲折线形式的短路短截线滤波器:(a)结构;(b)带内特性;(c)带外特性

3.2 抽头输入输出滤波器

输入、输出耦合采用抽头的形式, 抽头位置设在加载的短路短截线上, 这种滤波器结构表示在图7(a), 仿真的滤波器带内特性表示在图7(b), $6\text{GHz} \sim 20\text{GHz}$ 的带外特性表示在图7(c)。

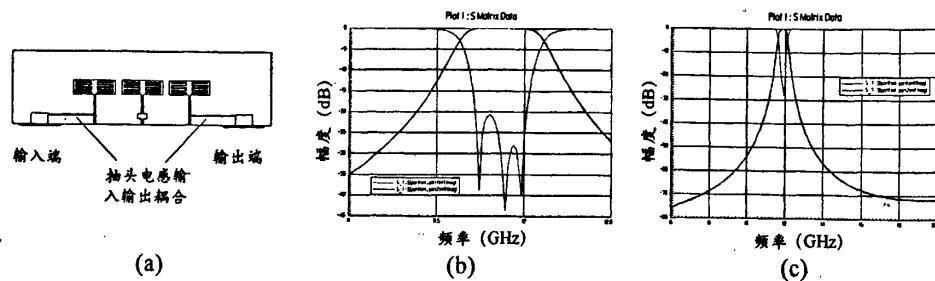


图7 抽头输入、输出滤波器:(a)结构;(b)带内特性;(c)带外特性

3.3 垂直容性输入输出滤波器

为了引入源、负载与谐振器之间的交叉耦合,期望在带外产生额外的衰减极点,采用了垂直容性输入、输出耦合形式。而短路短截线分别使用了2种接地形式:侧壁接地和金属孔化接地。侧壁接地的结构如图8(a)所示,仿真的滤波器带内特性和6GHz~20GHz的带外特性分别如图8(b)和图8(c)所示。

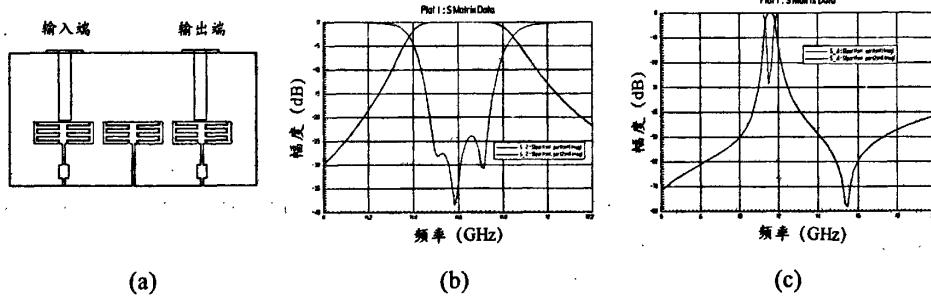


图8 垂直容性输入输出、侧壁接地滤波器:(a)结构;(b)带内特性;(c)带外特性

在此基础上,用金属孔化接地的方式替换侧壁接地,金属孔直径为 $\phi 0.26\text{mm}$,打在原侧壁位置上,其整个结构表示在图9(a),仿真的滤波器带内特性表示在图9(b),带外特性表示在图9(c);与侧壁接地形式相比,通常往低端移动了约500MHz,带宽也略有增大;带外特性几乎没有变。

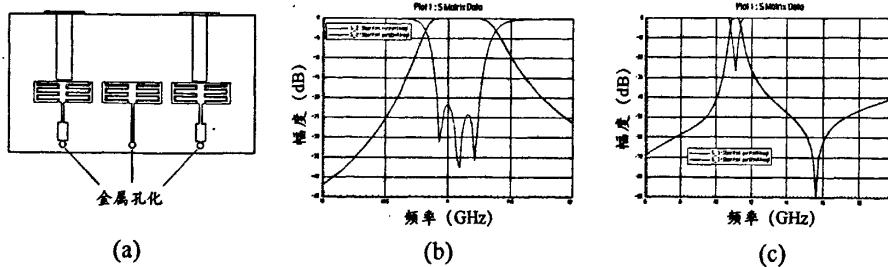


图9 金属孔化接地滤波器:(a)结构;(b)带内特性;(c)带外特性

接地方式除了侧壁接地、金属孔化以外,还可采用虚拟地电容等。

3.4 耦合形式的分析

0阶谐振器滤波器与普通谐振器滤波器一样可以采用探针式容性输入、输出耦合;也可以采用环或抽头式感性输入、输出耦合。这些输入、输出耦合形式已被以上仿真的带内特性所验证。但从带外特性来看,容性输入、输出耦合滤波器在频率高端带外远区的衰减不够大;而抽头输入、输出耦合滤波器的带外衰减具有陡度大而且单调上升的特点,是一种比较可取的形式。

0阶谐振器之间通常采用间隙电容耦合,如同文中所描述的那样。当然还有其他的耦合形式可供选择。

4 结 论

文章介绍了对复合左右手微带传输线单元晶格的等效电路所做的分析,并从微波滤波器的角度对分析结果进行了仿真,同时着重对单元晶格构成的0阶谐振器在微波滤波器中的应用进行了深入的探讨,仿真了3种输入、输出耦合形式的滤波器,其滤波器的电性能良好。从而验证了0阶谐振器在微波滤波器领域中应用的可能性,同时也提供了可行的实现途径。

由于采用了交指电容和短路短截线电感产生左手特性的0阶谐振器,随着频率的增高,交指电容的间隙越来越小,加工精度的影响越来越大;文中对交指电容的间隙选用了0.04mm,还在可加工的范围内。因此,该类型的0阶谐振器适用于频率较低的微波部件。

0阶谐振器具有体积小、工作频带宽等特点,很可能在微波部件的设计中得到较广泛的应用。

参考文献

- 1 Eleftheriades G V, Balmain K G. Negative-refraction metamaterials. IEEE Press, Published by John Wiley Sons, Inc., 2005
- 2 Mao S G, Chen S L and Huang C W. Effective electromagnetic parameters of novel distributed left-handed microstrip lines. *IEEE Trans. on Microwave Theory Tech.*, 2005, 53(4): 1515 ~ 1521
- 3 Mao S G and Chuch Y Z. Broadband composite right/left-handed coplanar waveguide power splitters with arbitrary phase responses and balun and antenna application. *IEEE Trans. on Microwave Theory Tech.*, 2006, 54(1): 243 ~ 250
- 4 Mao S G and Chen S L. Characterization and modeling of left-handed microstrip lines with application to loop Antenna. *IEEE Trans. on Antenna Propag.*, 2006, 54(4): 1084 ~ 1091
- 5 Mao S G, Wu M S, Chuch Y Z and Chen C H. Modeling of symmetric composite right/left-handed coplanar waveguide with application to compact bandpass filters. *IEEE Trans. on Microwave Theory Tech.*, 2005, 53(11): 3460 ~ 3468
- 6 Bonache J, Gil I, Garcia-Garcia J and Martin F. Novel microstrip bandpass filters based on complementary split-ring resonators. *IEEE Trans. on Microwave Theory Tech.*, 2006, 54(1): 265 ~ 271
- 7 Mao S G, Wu M S and Chuch Y Z. Design of composite right/left-handed coplanar waveguide bandpass and dual-bandpass filters. *IEEE Trans. on Microwave Theory Tech.*, 2006, 54(9): 3543 ~ 3549
- 8 Lai A and Itoh T. Composite right/left-handed transmission line metamaterials. *IEEE Microwave Magazine*: 34 ~ 50, Sep. 2004

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、毫米波器件的分析和优化、卫星有效载荷技术的研究等。

敬 告 读 者

为适应我国信息化建设需要,扩大本刊及作者知识信息与学术交流渠道,本刊已被CNKI中国期刊数据库全文收录,其作者文章著作权使用费与本刊印刷版稿酬一次付清。若作者不同意文章被收录,请在来稿时向本刊声明,本刊将作适当处理。

本刊编辑部

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>