

传输零点可控的腔体三模滤波器

Cavity Triple-Mode Filter with Transmission Zero Controllable

黄庆涛(中国电信研究院,广东 广州 510630)

Huang Qingtao (China Telecom Research Institute, Guangzhou 510630, China)

摘要:

滤波器是通信设备的重要器件,在射频收发端起到不可或缺的作用。合格的滤波器带内增益平稳,传输有用信号;带外抑制出色,滤除杂散信号。介绍了一款三模腔体滤波器以及传输零点的控制方法。通过激励腔体固有3个 TE_{110} 简并谐振模式实现单腔三模,配合调谐结构的位置特征控制传输零点的位置,实现通带低频抑制或高频抑制。

关键词:

传输零点;腔体滤波器;简并模

doi:10.12045/j.issn.1007-3043.2025.06.011

文章编号:1007-3043(2025)06-0057-04

中图分类号:TN929.5

文献标识码:A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Abstract:

The filter is an important component of communication equipment, which plays an indispensable role in the RF transceiver. Qualified filters have stable gain in band which transmits useful signals, and excellent suppression out of band which filters out stray signals. It mainly introduces a triple-mode cavity filter and the method of controlling the transmission zero. By exciting the triple TE_{110} degenerate resonance modes, triple-mode with single cavity is achieved, while the position of the transmission zero is controlled by the position characteristics of the tuning structure to achieve passband low frequency suppression or high frequency suppression.

Keywords:

Transmission zero; Cavity filter; Degenerate resonance mode

引用格式:黄庆涛. 传输零点可控的腔体三模滤波器[J]. 邮电设计技术, 2025(6): 57-60.

0 引言

滤波器被广泛应用在航空、航天、雷达、通信、电子对抗等电子设备中,具有较好的选频滤波功能。滤波器的理论设计方法有多种,包括巴特沃斯滤波器(Butterworth Filter)^[1]、椭圆函数滤波器(Elliptic-Function Filter)^[2]、切比雪夫滤波器(Chebyshev Filter)^[3]等经典模型。20世纪70年代,A.E. Atia和A.E. Williams提出了耦合矩阵法^[4-5],它以谐振电路为基础,配合谐振模式间的耦合特征,给出滤波器的耦合

矩阵,进而进行物理结构设计。耦合矩阵法在工程上得到极大应用,其中典型的就腔体滤波器。

腔体滤波器具备Q值高、插损小、散热好、结构牢固、性能稳定等特性,在通信设备的射频收发端被广泛应用。传统的腔体滤波器一个腔体激励一个谐振的模式,通过多个腔体耦合实现多个谐振模式,如图1(a)所示,采用3个同轴谐振腔构成三腔三模滤波器;而单腔多模滤波器则是通过控制腔体多个本征谐振模式的耦合来实现多模谐振,每一个谐振模式相当于一个腔体,在提升滤波性能的同时减小了体积,如图1(b)所示,采用矩形腔的3个简并模构成单腔三模滤波器;此外,适当引入传输零点可以抑制频带外无用信

收稿日期:2025-04-25

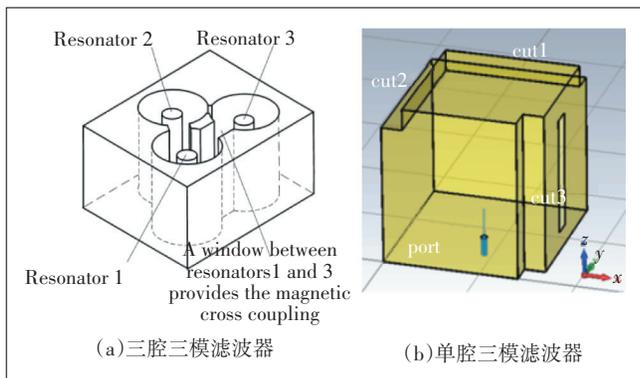


图1 三腔三模滤波器与单腔三模滤波器

号及噪声,提升滤波器的带外性能。

1 腔体滤波器分析

本文采用CST MWS三维电磁场仿真软件配合建模仿真和分析研究。在本征模式仿真下(Eigenmode Solver),一个标准的球形腔体有多个谐振模式,其中 TE_{110} 模式为主模,能量最高,最容易形成通带和滤波特性(见图2)。

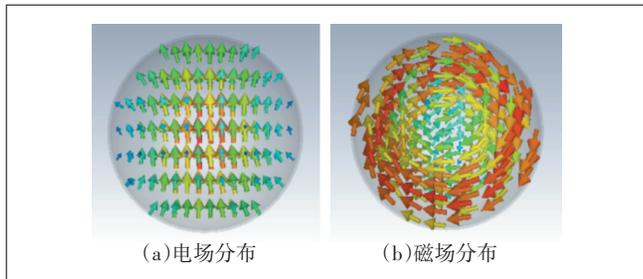


图2 TE_{110} 模的电场分布和磁场分布

根据 TE_{110} 模式的电磁场分布特性,考虑球形腔体的高对称性,该 TE_{110} 模共有3个简并模式,如果以电场分布为参考量,根据电场与笛卡尔坐标系下的坐标轴关系,该 TE_{110} 模的3个简并模可以分别命名为 TE_{110-x} 、 TE_{110-y} 和 TE_{110-z} ,图3所示为 XOZ 截面和 YOZ 截面下3个模式的电场分布。

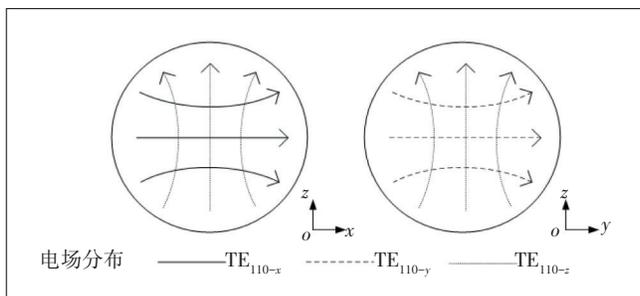


图3 TE_{110} 简并模电场分布

对于一个球形腔体,本征谐振模式的频率由腔体尺寸(即球体半径)确定,尺寸(半径)越小则初始谐振频率越高,尺寸(半径)越大则初始谐振频率越低。可以根据所需通带的频率,初步确定球形腔体的尺寸。从 TE_{110} 模的电磁场分布来看,在初始谐振频率确定之后,可以通过轴向频率控制结构调整对应谐振模式(TE_{110-x} 、 TE_{110-y} 、 TE_{110-z})的频率 f_x 、 f_y 、 f_z ,轴向频率控制结构越长等效该模式的球体半径越小,谐振频率越高,反之亦然(见图4)。

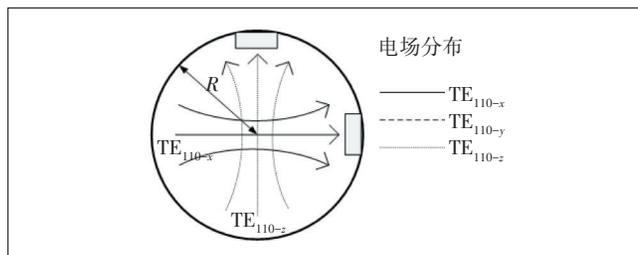


图4 频率控制结构示意图

解决了球形腔体的谐振模式选择与频率控制,接下来要解决激励方式和耦合方式。在微波射频领域,根据电磁场分布,典型的激励方式是电激励(如探针激励)和磁激励(如小孔激励),探针激励需要沿着电场最大方向放置金属探针,类似电偶极子辐射激励出电场,小孔激励则需要沿着磁场最大方向开孔,类似波导的磁场分布特性激励出磁场,很明显,从实施难易程度和激励效果上,本方案选取探针激励更加合适(见图5)。同样,典型的耦合方式也分为电耦合(如调谐螺钉)和磁耦合(如调谐环),通过扰动谐振模式的电磁场分布实现2个谐振模式间的耦合度,本方案选取电耦合更加合适(见图6)。

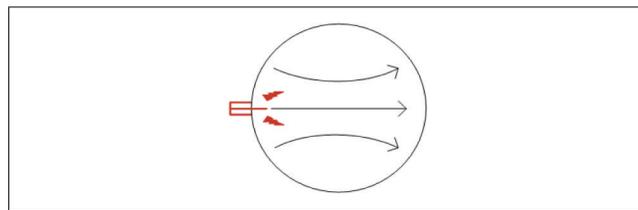


图5 电激励(探针激励)示意

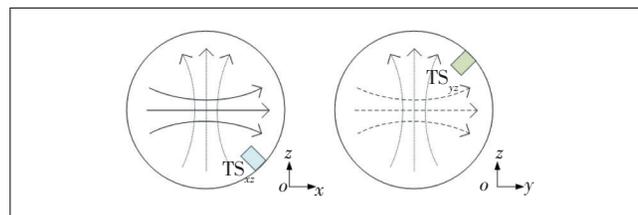


图6 电耦合(调谐螺钉)示意

谐振模式间的耦合,如耦合过高则会出现过耦合,如耦合过低则会出现欠耦合,因此需要合理控制耦合度,图7给出了调谐结构与谐振模式耦合度的关系。在YOZ截面上,沿着与Y轴和Z轴45°的地方插入调谐螺钉TS_{yz},有效扰动了TE_{110-x}和TE_{110-z}的电场,进而控制了2个谐振模式的耦合度,调谐螺钉TS_{yz}越长则耦合系数越高。

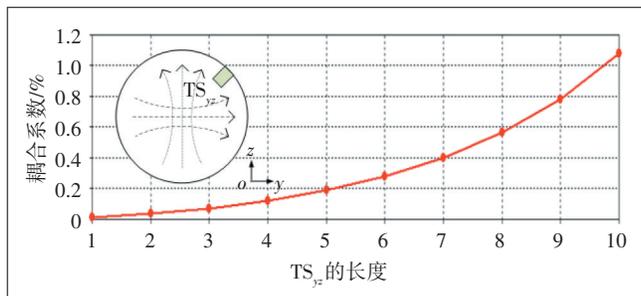


图7 调谐结构与谐振模式间耦合系数的关系

为方便描述,本文以TS表示调谐结构(Tune Structure),TS_{xy}表示影响TE_{110-x}和TE_{110-y}谐振模式的调谐结构,同理有TS_{yz}调谐结构和TS_{xz}调谐结构;以Q表示调谐结构位置所在的象限(Quadrant),Q_{xy}表示调谐结构TS_{xy}所在的象限,同理有Q_{yz}和Q_{xz}。

2 三模腔体滤波器与传输零点控制方法

基于以上分析,综合考虑谐振模式选择、频率控制、激励方式和耦合控制,系统地给出了球形腔体滤波器的核心指标,本章将给出具体的设计案例。

图8所示为3个简并TE₁₁₀谐振模式的工作原理,从信源(Port-x)激励出第1个谐振模式TE_{110-x},利用调谐结构TS_{xz}耦合出第2个谐振模式TE_{110-z},再通过调谐结构TS_{yz}耦合出第3个谐振模式TE_{110-y},最后输出到负载端(Port-y),实现单腔三模滤波器(见图9)。

如图10所示,在XOZ截面上,此时TS_{xz}处于第4象限,在YOZ截面上,此时TS_{yz}处于第1象限。该滤波器的频率响应特性曲线如图11所示,通带内S21曲线有3个传输极点(对应S11曲线的3个反射零点),对应TE₁₁₀3个简并谐振模式,而通带的高频处有一个传输零点,较好地抑制了高频处的带外杂散。

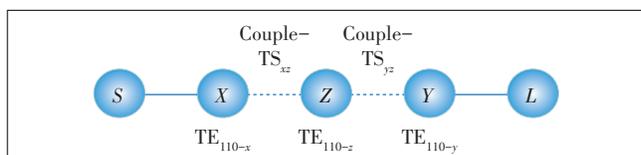


图8 单腔三模拓扑

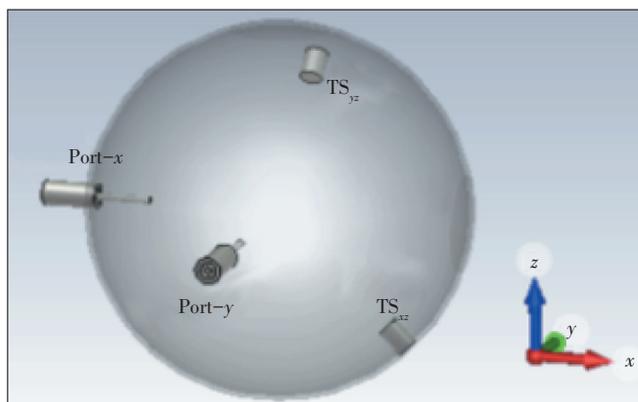


图9 单腔三模滤波器模型

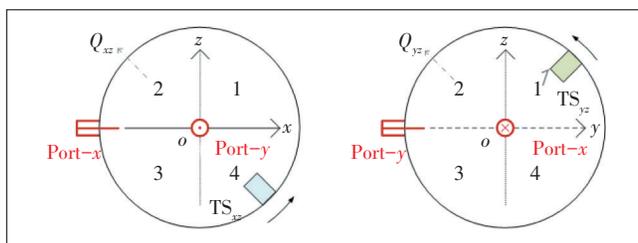


图10 XOZ截面和YOZ截面下调谐结构示意图

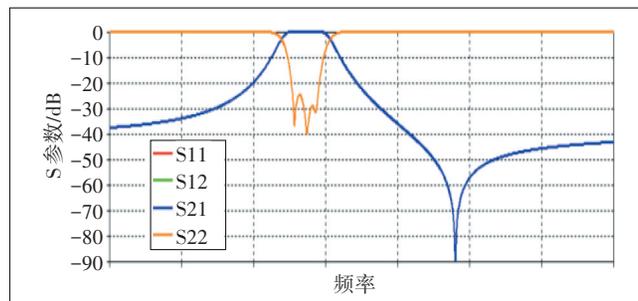


图11 频率响应特性S参数仿真

在该滤波器模型中,通过调整调谐结构TS_{xz}和TS_{yz}位置所在的象限(对应Q_{xy}和Q_{yz}的取值),可以灵活控制传输零点的位置。当Q_{xy}+Q_{yz}为偶数时,传输零点在通带低频处,当Q_{xy}+Q_{yz}为奇数时,传输零点在通带高频处,下面将给出几种情况的仿真结果(见图12)。

在图12(a)中,TS_{xz}在XOZ截面第3象限,TS_{yz}在YOZ截面第3象限,即Q_{xy}=3,Q_{yz}=3,Q_{xy}+Q_{yz}为偶数,传输零点在通带的低频处,实现低频抑制。在图12(b)中,TS_{xz}在XOZ截面第2象限,TS_{yz}在YOZ截面第4象限,即Q_{xy}=2,Q_{yz}=4,Q_{xy}+Q_{yz}为偶数,传输零点在通带的低频处,实现低频抑制。在图12(c)中,TS_{xz}在XOZ截面第1象限,TS_{yz}在YOZ截面第2象限,即Q_{xy}=1,Q_{yz}=2,Q_{xy}+Q_{yz}为奇数,传输零点在通带的高频处,实现高频抑制。

综上所述,根据工程设计需求,选取合适尺寸的球形腔体,可以实现一个单腔三模球形腔滤波器,通

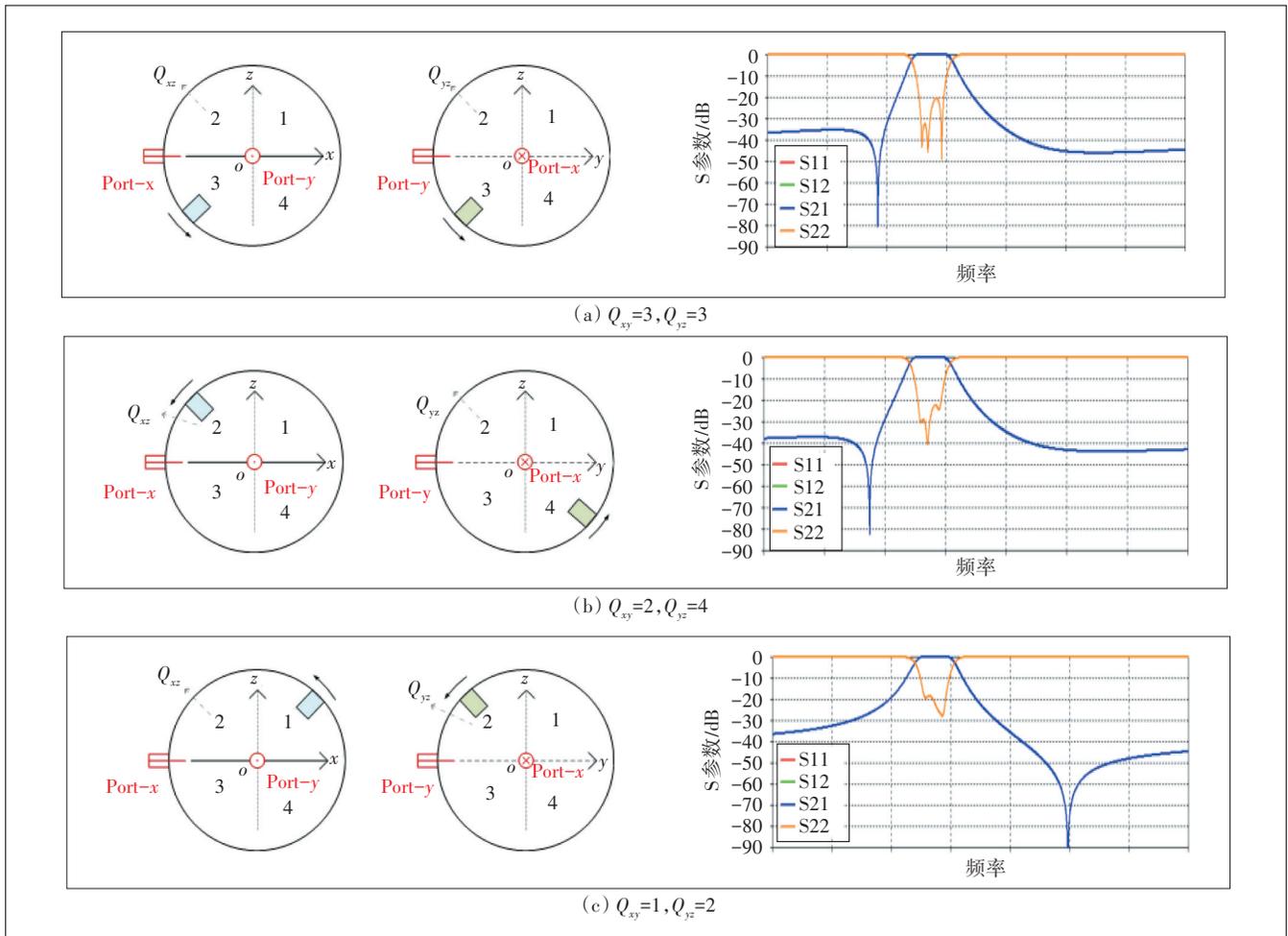


图 12 传输零点控制方法仿真

过在合适的位置(象限)插入调谐结构,进而控制传输零点的位置,实现较好的带外抑制。

3 结束语

滤波器是通信设备的关键器件,需要综合考虑体积小、性能佳等诸多因素,本文介绍的球形腔体滤波器,利用本征模式下3个 TE_{110} 简并模实现单腔三模,相比传统三模滤波器减少了2个腔体体积,同时提出了一种传输零点的控制方法,通过调整调谐结构位置特征,实现了传输零点的灵活可控,可根据设计需求实现通带低频抑制或高频抑制,大大提高了滤波器的带外性能。本文从谐振模式选择、频率控制、激励方式和耦合控制上对腔体滤波器做了系统介绍,从原理分析到仿真设计,对滤波器设计具有一定的参考意义。

参考文献:

[1] MARGOLIS S. On the design of active filters with butterworth charac-

teristics[J]. IRE Transactions on Circuit Theory, 1956, 3(3): 202.

[2] HENDERSON K W. Nomographs for designing elliptic-function filters[J]. Proceedings of the IRE, 1958, 46(11): 1860-1864.

[3] KAWAKAMI M. Nomographs for butterworth and chebyshev filters [J]. IEEE Transactions on Circuit Theory, 1963, 10(2): 288-289.

[4] ATIA A, WILLIAMS A E. A solution for narrow-band coupled cavities[Z]. COMSAT Laboratories Tech. Memo, 1970; CL-39-70.

[5] ATIA A E, WILLIAMS A E. New types of waveguide bandpass filters for satellite transponders [J]. COMSAT Technical Review, 1971, 1 (1): 21-43.

作者简介:

黄庆涛,毕业于华南理工大学,硕士,主要从事移动通信及无线网络技术、射频通信技术、网络规划建设及运营优化等方面的研究工作。

