

71
先进通信技术译丛

5-162
A111
无线通信中的微波
谐振器与滤波器

(理论、设计与应用)

M. Makimoto 著

S. Yamashita

赵宏锦 译

李志坚 审校

国防工业出版社

·北京·

著作权合同登记 图字:军-2001-003号

图书在版编目(CIP)数据

无线通信中的微波谐振器与滤波器/赵宏锦译.—北京:国防工业出版社,2002.6

(先进通信技术译丛)

ISBN 7-118-02700-6

I.无... II.赵... III.①微波谐振器②微波滤波器 IV.①TN62②TN713

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 077475 号

Translation from the English language edition:

Microwave Resonators and Filters for Wireless Communication by M. Makimoto
and S. Yamashita

Copyright © Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2001

Springer-Verlag is a company in the Bertelsmann Springer publishing group All
Rights Reserved

本书中文版由 Springer 出版社授予国防工业出版社独家出版发行。版权所有,侵权必究。

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

北京奥隆印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850 × 1168 1/32 印张 6 1/4 156 千字

2002 年 6 月第 1 版 2002 年 6 月北京第 1 次印刷

印数:1-3000 册 定价:12.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

译者序

本书的两位作者 Mitsuo Makimoto 和 Sadahiko Yamashita 均是日本著名的微波领域专家,长期从事无线通信中射频电路的微型化研究,他们的著作《Microwave Resonators and Filters for Wireless Communication》在国际微波领域界受到了极大关注。考虑到中国读者的需求,受国防工业出版社的委托,以原著所特有的深入浅出的写作风格为基础,我们把本书的英文版译成中文版《无线通信中微波谐振器与滤波器》。

从电信发展的早期,滤波器在电路中就扮演着重要的角色。当今信息社会的发展依赖于通信技术的发展。而基于多媒体的全球个人通信系统中的无线通信将得到更大的发展,作为关键射频器件的滤波器的作用将变得越来越重要,对性能的要求也将越来越高。本书从滤波器的基本概念开始,逐步扩展到滤波器件的各种实际应用,主要介绍了应用于射频和微波的阶跃阻抗谐振器的基本理论和分析方法,以及由以上谐振器组成的滤波器的综合理论和实际设计技术,在每一部分中还提供了各种设计实例,并介绍了采用最新发展的介电和超导材料通过先进的微机械加工技术制造的新颖的谐振器和滤波器结构,我们有理由相信本书将为微型化和高性能的射频器件现在和未来的发展提供大量有用的信息,相信本书能有助于致力于微波领域、电磁波领域、无线通信系统和电路设计的学生、研发人员及工程技术人员。

本书的翻译工作得到李志坚老师的大力支持,谨致谢忱。

译者

序 言

无论何时、何地,移动通信会让你与外界保持联系!

19 世纪后期马可尼的无线电波发送和贝尔的电话发明为人类的通信方式带来了神奇的变化。通过两者的结合,现在,我们拥有了能让我们在任何时间、任何地点和任何人保持联络的强大的通信工具。对此,提供轻便电子器件的技术的突破有重大贡献。如果没有它们的进步,就不会有我们现在的情况。我们可以预见移动通信进一步发展的美好未来。本书的作者致力于无线通信中射频(RF)电路的微型化。对于射频电路,滤波器件是一种基本元件,而且也是人们正在努力研究和发展的器件。本书始于滤波器的基本概念,逐步扩展到滤波器件的各种实际应用。

本书的目的有以下几点:(1)提供应用于无线通信系统的滤波器的基本理论和基本设计步骤;(2)列出并引入实际的设计例子,说明阶效阻抗谐振器(SIR)结构在 RF 微领域应用的有效性;(3)基于拓展的阶跃阻抗谐振器结构对传输线谐振器的提出更为一般的概念。本书详细地介绍了射频和微波传输线谐振器的基本理论和分析方法,继而介绍由以上谐振器组成的滤波器的综合理论和实际设计技术。在每一部分中还提供了各种设计的例子。相信本书能对致力于微波电路理论的学生、电磁波工程领域的研究者和无线通信系统和电路的研发工程师都带来有益的信息。

本书的特点是:(1)为拓展传统的传输线谐振器的可用频率范围引入了阶跃阻抗谐振器的概念;(2)介绍了采用最新发展的介电和超导材料通过先进的微机械加工技术制造的新颖的谐振器和滤波器结构;(3)谐振器应用拓展到了滤波器以外的采用新结构的射频器件,如平衡混频器、低相位噪声振荡器。这些课题现在还没有

引起足够的重视,因此,我们相信本书将对小型和高性能的射频设备的当前和未来的发展提供大量有用的信息。

本书包括 6 章和一个附录。第 1 章是概论,讲述了滤波器的发展历史和通信系统中的应用。随后提出了应用于无线通信设备中各种滤波器所需要的功能和特性。其间我们引入了阶跃阻抗谐振器,它是一种有希望替代当前广泛应用于微波领域滤波的传输线谐振器,并克服后者主要缺点。第 2 章通过介绍传输线阻抗率的概念分析了阶跃阻抗谐振器的基本结构和特性;第 3 章探究了四分之一波长阶跃阻抗谐振器及其在滤波器中的应用。以同轴介电谐振器的形式设计的阶跃阻抗谐振器的实际应用已有了发展,对此本章将介绍各种针对于微型化技术的例子;第 4 章,集中在半波长阶跃阻抗谐振器和它的应用。这种阶跃阻抗谐振器结构很容易用带状线结构形式来实现,并和有源器件很类似。由于这些优势,它在混频器、振荡器和滤波器中的实际应用将通过举例加以说明;第 5 章讨论全波长阶跃阻抗谐振器。因为单模结构太大,这种谐振器通常设计为双模谐振器,在本章介绍了双模谐振器的激发方法和理论分析,推出了一种双模滤波器的设计方法并举出一些实验例子;第 6 章介绍阶跃阻抗谐振器更一般的概念和技术发展动向。其中讨论和总结了应用频率范围的扩展、阶跃阻抗谐振器应解决的问题以及其它方面的应用等。在附录中我们介绍了一种采用一般的微波电路模拟器进行单谐振器和谐振器对的分析方法,这种分析方法提供了用于滤波器综合中谐振器特性的一般估计,而不需专用的计算程序。这一技术贯穿本书,用于滤波器的设计,可以作为一种实用性很强的设计方法推荐给读者。

像前面所说的一样,基于多媒体的全球个人通信系统中的无线通信一定得到发展,而作为关键射频器件的滤波器的作用将变得越来越重要,对其性能的要求也将更为迫切。我们希望本书将有益于无线通信中滤波器的设计和发展,并进一步推动先进滤波器件的发展。

本书中的大部分关于 SIR 的技术资料来源于过去 25 年松下

东京研究所的研发成果,我们向长期致力于这一课题的广大研究人员以及松下通信工业公司给予我们有价值的建议并鼓励我们完成本书的同事们表达最诚挚的敬意。同时我们也向为我们提供大量有价值的滤波器实验数据的 M. Sagawa 博士、H. Yabuki 博士、M. Matsuo 先生和 A. Enokihara 博士表达深切的谢意。

最后,我们感谢花费大量精力翻译本书的 K. Goho 先生以及为我们提供出版本书机会和提供有益建议的斯普林格出版社的 C. Ascheron 博士。

Mitsuo Makimoto
Sadahiko Yamashita
2000 年春于日本川崎

目 录

第 1 章 概论	1
1.1 应用于通信领域的滤波器的历史	1
1.2 无线通信中的滤波器	3
1.3 应用于无线通信中的谐振器与滤波器的分类	5
1.4 传输线谐振器和阶跃阻抗谐振器(SIR)	7
第 2 章 SIR 的基本结构和特性	11
2.1 SIR 的基本结构	11
2.2 谐振条件和谐振器的电学长度	13
2.3 杂散谐振频率	17
2.4 一种 SIR 等效电路的推导	18
第 3 章 四分之一波长型 SIR	21
3.1 四分之一型波长同轴 SIR 的分析	22
3.1.1 阻抗比 R_2	22
3.1.2 阻抗不连续性的影响	23
3.1.3 同轴 SIR 的未加载 Q 值	26
3.2 采用同轴 SIR 的带通滤波器	34
3.2.1 采用电容耦合的 SIR - BPF 的合成方法	34
3.2.2 设计实例和性能	38
3.3 双同轴 SIR(DC - SIR)	45
3.3.1 DC - SIR 的优点	45
3.3.2 谐振条件和未加载 Q 值	46
3.3.3 400MHz 的大功率天线双工器	49
3.4 介电同轴 SIR	53
3.4.1 介电材料和介电谐振器的特性	53

3.4.2 介电同轴谐振器的基本结构和特性	55
3.4.3 便携式无线电话的天线双工器设计实例	59
3.4.4 介电 DC - SIR	62
3.4.5 介电单块 SIR - BPF	67
3.5 带状线 SIR	69
3.5.1 基本结构和特征	69
3.5.2 谐振器之间的耦合	71
3.5.3 带状线 SIR - BPF	72
第 4 章 半波长型 SIR	74
4.1 带状线 $\lambda_g/2$ 型 SIR	75
4.1.1 基本特性	75
4.1.2 用反相器实现的平行耦合线的等效表达式	77
4.1.3 带状线平行耦合 SIR - BPF 的合成	81
4.1.4 滤波器设计实例	85
4.2 内部耦合 SIR	96
4.2.1 基本结构和谐振条件	96
4.2.2 谐振时的等效电路	104
4.2.3 滤波器设计实例	105
4.2.4 应用于振荡器和混频器电路	116
第 5 章 全波长型 SIR	123
5.1 在环形谐振器中的正交谐振模式	123
5.2 作为四端口器件的全波长型 SIR 的应用	125
5.3 作为二端口器件的全波长型 SIR 的应用	129
5.3.1 正交谐振模式的耦合方式	129
5.3.2 正交谐振模式的耦合分析	131
5.3.3 滤波器中的应用	136
第 6 章 SIR 的扩展概念和技术发展趋势	144
6.1 采用复合材料的 SIR	144
6.1.1 磁性材料和介电材料的组合	144
6.1.2 用介电材料部分加载的同轴 SIR	145
6.2 多阶 SIR 和锥形线谐振器	148
6.3 折叠线 SIR	158

6.4 SIR 未来的技术趋势	163
附录 采用通用的微波模拟器分析谐振器特性	168
A.1 直接耦合谐振器 BPF 的设计参数	168
A.2 滤波器设计的实验方法	169
A.3 采用通用微波模拟器确定 Q 和 k	170
A.3.1 确定 Q	170
A.3.2 耦合系数 k 的确定	174
参考文献	177
名词对照与索引	181

第 1 章 概 论

1.1 应用于通信领域的滤波器的历史

从电信发展的早期,滤波器在电路中就扮演着重要的角色,并随着通信技术的发展而取得不断的进展。1910 年,一种新颖的多路通信系统即载波电话系统的出现,使得电信领域引发了一场彻底的技术革命,开创了电信的新纪元。新的通信系统要求发展一种能在特定的频带内提取和检出信号的新技术,而这种技术的发展更进一步加速了滤波器技术的研究和发展。

1915 年,德国科学家 K. W. Wagner 开创了一种现以“瓦格纳滤波器”闻名于世的滤波器设计方法,与此同时在美国 G. A. Canbell 发明了另一种后来以图像参数法而知名的设计方法。随着这些技术突破,许多知名的科研人员包括 O. J. Zobel、R. M. Foster、W. Cauer 和 E. L. Norton 开始积极地和系统地对采用集总元件电感和电容的滤波器设计理论进行了研究。随后,1940 年出现了包括两个特定设计步骤的精确的滤波器设计方法。第一步是确定符合特性要求的传递函数,第二步是由先前的传递函数所估定的频率响应来合成电路。该方法的效率和结果是相当不错的,现在所采用的很多滤波器设计技术就基于此早期的设计方法。

不久,滤波器设计由原先的集总元件 LC 谐振器扩展到一个新的领域,即分布元件同轴谐振器和波导谐振器^[1]。同时,滤波器材料领域取得了很大的进步,极大地推动了滤波器的发展。1939 年,P. D. Richtmeyer 报导了介电谐振器^[2],它利用了电磁波谐振,有小尺寸和高 Q 值两个显著的特点,然而由于当时的材料温度稳定性的不高使该种滤波器不足以实际应用。70 年代,各种具有优

异的温度稳定性和高 Q 值的陶瓷材料的发展增加了介电滤波器实际应用的可行性^[3]。随着陶瓷材料的发展,滤波器的应用得到迅速发展。在现有的射频和微波通信器材中介电滤波器已成为最重要、最常见的元件之一。此外,80 年代,出现的高临界温度超导材料,被认为极有可能被用于设计出极低损耗和极小尺寸的新颖微波滤波器^[4],许多研发人员的已致力于它们的实际应用。

在滤波器发展早期,滤波器的设计主要集中在以电感电容组合为主的无源电路上。为一种线性谐振器系统,许多早期的研究人员认为基于非集总/分布元件电路物理原理的谐振器系统也能达到滤波性能。1933 年, W. P. Mason 展示了一种石英晶体滤波器^[5],这种滤波器由于其优异的温度稳定性和低损耗特性而在不久以后成为通信器材中不可或缺的重要元件。和晶体谐振器一样,陶瓷谐振器系统采用体声波。虽然陶瓷滤波器的某些性能没有晶体滤波器优异,但由于其低的生产成本而得到实际应用。采用如 LiNbO_3 、 LiTaO_3 等单晶材料的声表面波谐振器件也被用作滤波器元件。声表面波滤波器比体波滤波器可在更高的频率范围里得以实际应用^[6]。向铁氧体单晶施加偏置磁场所得到的静磁模的谐振器系统也有可能用于滤波器^[7]。例如, YIG(钇铝铁石榴石)球微波滤波器得到实际应用。这种滤波器的特点是能通过调整磁场强度来改变其中心频率。

虽然上面提到的滤波器都是采用了线性谐振系统,但滤波器发展早期也意识到了用其它方法获得滤波响应。这想法产生的主要原因是滤波器作为一种功能器件,是通过给出的传递函数来实现性能的。采用了有源电路的滤波器件就是一个典型的例子。在真空电子管时代,没有 LC 电抗电路的有源 RC 滤波器得到了广泛的研究和发展,其研究成果已在滤波器技术中得到了应用。这样的有源滤波器包括采用回转器获得 LC 等效电路的一般技术和通过采用带有反馈电路的运算放大器以实现需要的传递函数响应的技术等。半导体模拟集成电路的发展促进了这类有源滤波器的进步、实际应用和推广。

除了在前面提到的技术之外,还有更直接地实现滤波器传递函数的数字技术^[8]。数字滤波技术的一般步骤是这样的:先把输入的模拟信号转换成数字信号,随后根据传递函数进行数字运算,最后通过数—模转换获得输出信号。虽然这种数字滤波器的想法出现得很早,但实际工业应用直到 70 年代数字大规模集成电路取得了显著的发展才得以实现。最近,几乎所有的数字通信系统都采用数字滤波器作为基带滤波器。另外,硬件水平的提高和高速运算算法的改进不断地扩展着应用频率的上限。

如上所述,滤波器及其设计方法的发展已有相当长的历史,滤波器不仅已成为电信领域、同时也是许多其它电子设备中不可或缺的器件。由于滤波器的种类繁多和多样性,作为一个设计者来说很有必要仔细琢磨根据特定的用途选用合适的滤波器。

根据滤波器的频率响应,滤波器可分为四种基本类型:低通滤波器(LPF),高通滤波器(HPF),带通滤波器(BPF)和带阻滤波器(BEF)。低通滤波器的设计方法是基础,许多指导书讲述了如何从 LPF 原型设计通过适当的频率转换实现 HPF、BPF 和 BEF 的技术。本书主要集中讲述 BPF,因为在无线通信设备中 BPF 是最重要也是最难设计的。

1.2 无线通信中的滤波器

各种各样的滤波器用于无线通信设备中。本章从最常见的无线通信设备——移动电话终端设备出发讲述滤波器的类型、功能和微型化的必要性。

图 1.1 是一种基于 FDMA - FDD 系统(频分多址 - 频分双工)的典型的移动电话射频电路方块图,是第一代移动通信中最通用的系统^[9]。在本例中,接收器采用双超外差系统,从天线接收的信号经接收端 Rx - BPF(双工器的一部分)处理滤去噪声号后,被低噪声放大器放大,通过混频器进行频率转化之后,经石英晶体 BPF 传送到中频端。石英晶体 BPF 的作用是信道滤波,从多重频率信

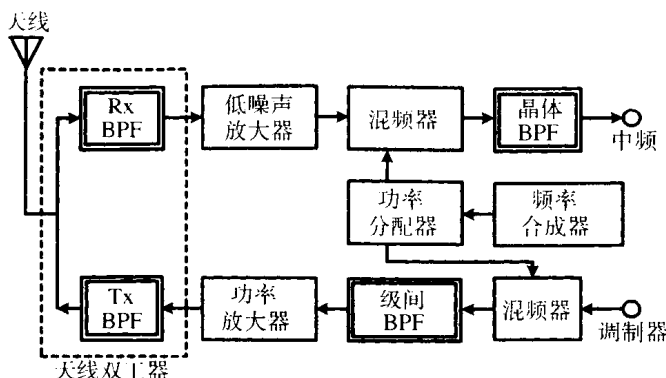


图 1.1 一种类型的移动电话 RF 电路方块图

号中获取特定信道信号。中频信号被再次放大,并转化成二次中频信号,经检波和解调成为基带信号。

图 1.1 中发射部分采用上变频系统处理预调制后的中频信号。因为由变频器输出的信号包含有各种各样的杂散信号,必须通过 BPF 提取有用信号并用功率放大器放大。功率放大器是另一个噪声源,将产生杂散信号,首先是输入信号的原始谐波成分,这些没用的信号通过发射端 BPF(双工器的另一部分)滤除,最后以电磁波的形式从天线发射信号。

由此可见,滤波器在无线通信设备中相当重要,在射频有源电路中输入输出的各级之间普遍存在,下面具体讲述一下各滤波器的功能和特性要求:

接收端 Rx - BPF 的必要功能是:(1)避免由于发射端输出信号的泄漏而使接收器前端饱和;(2)除去如镜频一类的干扰信号;(3)减少来自天线端的本机振荡器的功率泄漏。所以 BPF 的最佳性能包括高衰减以除去干扰,同时减少将直接影响接收端灵敏度的带通插损。晶体 BPF 的基本功能是信道选择,因此它必须有陡峭的沿衰减、好的群时延等特性,以及作为窄带滤波器,有优异的温度稳定性。

Tx - BPF 的基本功能是:从发射端减少杂散辐射功率以避免

对其他无线通信系统的干扰,这些无用的信号的主要成分是发射信号频率的二、三次谐波和本级振荡。另一个很重要的功能是衰减掉发射信号中接收频率段内的噪声,抑制它到接收机的灵敏度以下。因此,Tx-BPF 必须保持一个宽的阻带以抑制杂散信号,同时能维持低的带通插损和在输出端处理大电平信号。

从实际观点看,对所有手持式电子设备,像便携移动电话而言,微型化是一个重要的问题。尺寸和重量的减小会使随身携带的设备变得特别轻巧。很明显,对于射频电路的微型化有很大的需求。差不多所有较低频段的中频和基带电路,包括滤波器都能采用数字大规模集成电路(LSI),因此这些电路的微型化将随着半导体技术的发展而进步。

相反,虽然单片微波集成电路(MMIC)的出现预示着射频有源电路如放大器、调制器、频率转换器的微型化越来越成为可能。但对 RF 滤波器和振荡器等含有谐振器的电路的尺寸缩小的优化方面还存在许多有待解决的问题。因此,滤波器尺寸的缩小和性能的提高将继续是两大重要课题;并且很有可能将要在电路理论、材料、精巧工艺技术、精确的设计方法等方面开创一个新的前沿。

1.3 应用于无线通信中的谐振器与滤波器的分类

分配给无线通信的主要频带范围相当宽,从几十兆赫兹到几十吉赫兹,因此有相当多种类的谐振器和滤波器能在这些频带中使用。图 1.2 给出了几种典型例子可使用的频率范围。图 1.2 没有包括有源 RC 滤波器、开关电容滤波器(SCF)和数字滤波器等在内的有源电路滤波器,因为这些微波滤波器到现在还没有实用可行性,尚处于研发阶段。另外,图 1.2 也没有列入主要用于测量设备而在无线通信设备中极少使用的静磁式滤波器。

在低于 1GHz 的频率范围内,由图 1.2 可知最常用的是体声波、声表面波和螺旋管谐振器。由于每一种谐振器都有自己的优势和不足,因此根据滤波器的实际应用和目的来选择不同类型的

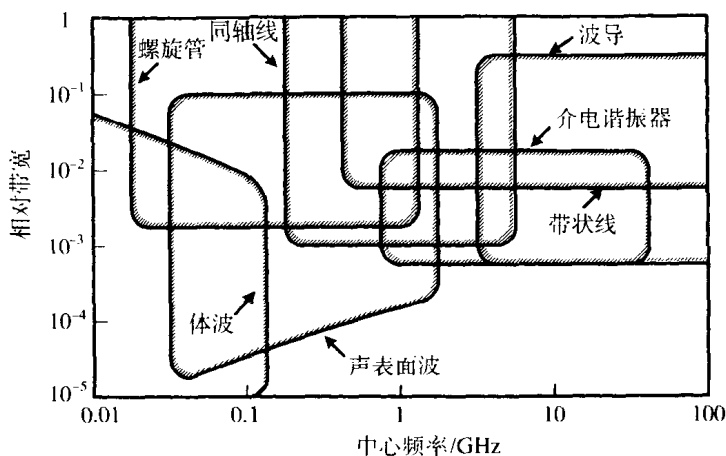


图 1.2 典型的谐振器和滤波器应用频率范围

滤波器是很有必要的。当非常需要微型化和低损耗时可采用体波和声表面波谐振器或滤波器；而当有大功率的要求时则采用螺旋管谐振器或滤波器。另外，体波和声表面波谐振器有优异的温度特性，因而适用于窄带滤波器。

对于射频到微波频段范围内，各种谐振器包括同轴的、介电的、波导的以及带状线的均可使用^[1]。同轴谐振器具有包括电磁屏蔽、低损耗特性和小尺寸等优异特点，但要在 10GHz 以上使用，则由于其微小的物理尺寸，制作精度难以达到。介电谐振器也具有低损耗、可接受的温度稳定性和小尺寸等特点，然而，高成本和现在的加工技术的限制，使它的使用范围在 50GHz 以下。

波导谐振器在这一频率范围内已有很长的使用历史，它具有低损耗和可实际应用到 100GHz 这两个主要优点。其最大缺点是，尺寸明显比其他可应用在微波段的谐振器大。

现在，在射频和微波电路中最常选用的是带状线谐振器。由于带状线谐振器具有小的尺寸、通过光刻术易于加工、与其他有源电路元件的易于兼容等优点，许多电路使用此类谐振器。它的另一大优势是能通过采用不同的衬底材料而在很大的频率范围内得

以应用。带状线谐振器存在的最大问题是,和其他谐振器相比它的插损明显比较大,使它很难应用于窄带滤波器中。即使这样,带状线谐振器仍被寄予厚望,以用于低插损的带状线结构超导滤波器。后者要求与带状线结构相同的平面电路加工方法现在正在开发中^[4]。

1.4 传输线谐振器和阶跃阻抗谐振器(SIR)

利用横电磁模(TEM)或准模电磁模的典型的传输线谐振器是同轴谐振器和带状线谐振器。如图 1.2 所示这些谐振器的应用频率范围从几百兆赫兹到一百吉赫兹,是现在无线通信中用作滤波器的主要选择对象^[10]。如前所述,这些谐振器没有很好的低损耗特性,也就是说和波导谐振器、介电谐振器相比没有高的 Q 值,然而作为电磁波滤波器它们具有有利特性:简单的结构、小的尺寸以及能应用于各种器件。微带线、带状线和共平面线谐振器的最大特点是易于与有源电路如 MMIC 相集成,因为它们是通过光刻在介电衬底上的金属化薄膜来制作的。

图 1.3 是有两个开路端的微带线半波长谐振器的基本结构,示作在微波段最常用的传输线谐振器的一个典型例子。此图展示了谐振器的物理结构:在介电衬底上生成总长度为半波长的均宽带状导体。这个结构电学参数,可用电学长度为 π 弧长的,具有均

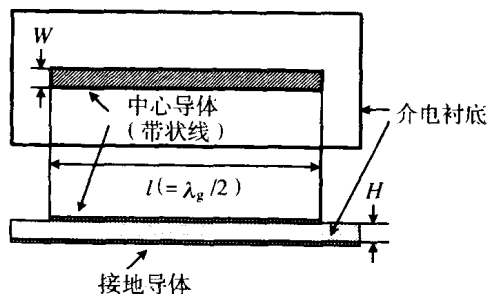


图 1.3 微带状线半波长谐振器的基本结构

匀特性阻抗的传输线来表达。这样的传输线谐振器就是均匀阻抗谐振器(UIR)。对用于 UIR 的介电衬底材料的一般要求是低的损耗因数、高的介电常数和温度稳定性。如图 1.3 所示,传输线谐振器由于其结构简单,并易于设计而被广泛应用。许多科学家认为诸如 UIR 型的传统滤波器的设计方法已相当完善。然而,在实际的设计中,这样的谐振器存在不少自身的缺陷,例如由于结构简单而使设计参数有限。另外还存在的电缺陷是本振频率整数倍的杂散响应。

为解决这些问题,在 VHF 段最常用方法是在谐振器的两个开路端加上电容,通过这种措施,谐振器长度被缩短,来自本振频率整倍数的杂散谐振频率被移开。

图 1.4(a)是这种结构类型的半波长谐振器,图中加载电容的 UIR 特征阻抗为 Z_1 ,电学长度为 $2\theta_1$,当 1.4(a)所示的半波长 UIR 的谐振器角谐振频率为 ω_0 时,半波长 UIR,加载电容 C 可表示如下:

$$C = Y_1 \tan \theta_2 / \omega_0$$

$$Y_1 = 1/Z_1; \theta_2 = \pi/4 - \theta_1$$

从另一方面看,同时将(a)中传输线长度 θ 与(b)中的集中元件 C 相替换,则两个电路图 1.4(a)和图 1.4(b)是等效的。加载了电容的 UIR 具有小尺寸和抑制杂散响应两大优势。但是加载了电容的 UIR 很难在 1GHz 以上的频率范围内使用,其原因是随着谐振频率改变含有集总元件电容 C 的电路损耗明显增加,从而需要调节频率。

加载的电容 C 能被开路的传输线替代,而且,也不必去设计 Z_1 处的传输线的特征阻抗,图 1.4(c)示出了传输线特征阻抗设为 $Z_2 (= 1/Y_2)$ 点的一个例子。当 $Y_2 \tan \theta'_2 = Y_1 \theta_2$ 时,所有三个谐振器将在同一频率上谐振。这样,如果 $Z_2 < Z_1$,那么 $\theta'_2 < \theta_2$,谐振器长度能被缩短。另外,还有两个附加的特性即为低损耗和小的