



新型微波滤波器的 理论与设计

褚庆昕 涂治红 陈付昌 王欢 著



科学出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

新型微波滤波器的理论与设计

褚庆昕 涂治红 陈付昌 王欢 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书介绍了作者及其团队近年来在微波滤波器领域的研究成果,主要包括广义 Chebyshev 滤波器和电磁混合耦合滤波器的综合理论、可控电磁混合耦合滤波器的理论与设计、多频滤波器的理论与设计以及超宽带滤波器的理论与设计。这些成果所涉及的课题也是近年来电磁场与微波技术学科的研究热点。本书力求从机理、分析、仿真和实现几个方面进行充分的论述,以便读者阅读、理解和掌握。

本书可作为高等院校电子信息类专业的研究生和高年级本科生微波电路课程的参考教材,也可作为相关科技人员的参考书籍。

图书在版编目(CIP)数据

新型微波滤波器的理论与设计/褚庆昕等著.—北京:科学出版社,2016
ISBN 978-7-03-049859-5

I. ①新… II. ①褚… III. ①微波滤波器 IV. ①TN713

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 214884 号

责任编辑:裴育 陈婕 王苏 / 责任校对:杜伟利
责任印制:肖兴 / 封面设计:蓝正设计

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 9 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2016 年 9 月第一次印刷 印张:18 1/2

字数:360 000

定价:108.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序 一

受作者所托，要为其学术著作《新型微波滤波器的理论与设计》写一份提纲挈领的序。

任何一本学术著作，作为高层次的概括，均可归纳为：思想、内容、方法和应用几大部分。目前强调的创新，关键在于思想创新。

一般来说，思想创新就是学术思想之创新。但是，褚庆昕教授这本著作进入了更高的层次——在一定意义上达到了哲学思想的创新。

现在，信息论的最高目标是获得尽可能多的独立、高质量信息传输通道。而在本书中概括性地归纳成频率坐标中两个相近零点可构成一信息通道。



众所周知，在电磁领域中一直存在——场的理论和路的理论这“两条大道”。而褚庆昕基于哲学思想认为两者是统一且同一的。事实证明：由这一思想引出了广义 Chebyshev 综合，并已获得最坚实的工程应用。对于我国的实际情况，作者的创新思想很难自己表述，否则会被认为是自吹，但这恰恰又是学习该书最重要的核心。由此，我简要地表述了上述思想，是为序。

序

2016年7月

于西安电子科技大学

序 二

Microwave filtering technologies are key to controlling the spectrum of signals and tackling interference issues in many wireless systems including mobile and satellite communications. There is an increasing demand for research and development of advanced microwave filters to meet more stringent requirements for future wireless system applications. To this end, Prof. Chu's group has made valuable contributions to this field. As a result, this book is based on the authors' research work containing interesting concepts and designs. The book covers a variety of microwave filter design examples, some of which are dealt with a great detail, demonstrating the art of this engineering approach. The book, written in Chinese, will be most useful to Chinese students and researchers engaged in microwave filter designs.

Jiasheng Hong
August 2016 in Fuzhou

前 言

本书汇集了本人及指导的研究生近年来在微波滤波器领域的研究成果。

全书内容包含四部分。本书的第一部分介绍微波滤波器的综合理论：在传统滤波器综合理论的基础上，重点研究广义 Chebyshev 滤波器和电磁混合耦合滤波器的综合理论。随着无线通信的快速发展，频谱资源越来越拥挤，信道也越来越窄，如何抑制各信道间的干扰对微波滤波器的选择提出了更高的要求。广义 Chebyshev 滤波器由此应运而生，它在传统 Chebyshev 滤波器中引入有限频率传输零点，在不增加谐振器的条件下提高了滤波器的选择性。为了实现广义 Chebyshev 滤波器，传统的方法是采用交叉耦合滤波器。但是，交叉耦合滤波器为了实现 N 个传输零点，至少要有 $N+2$ 个谐振器，因此要实现 1 个传输零点，至少要有 3 个谐振器。众所周知，微波耦合结构可以同时存在电耦合和磁耦合。而研究表明，合理地控制电耦合和磁耦合，两个谐振器组成的滤波器也可以产生一个传输零点，这对于减小滤波器的体积、降低成本是很有吸引力的。本书提出的电磁混合耦合滤波器的综合理论就是解决这类滤波器的综合设计问题。第一部分的内容体现在本书的第 2 章。

有了滤波器的综合理论，对于微波滤波器而言，更重要也更具挑战性的是滤波器的设计与实现，尤其是如何通过物理结构实现电耦合和磁耦合在一定范围的有效控制。本书的第二部分就是关于可控电磁混合耦合滤波器的设计与实现，书中给出了多款微带平面结构、同轴腔结构和介质谐振器结构的可控电磁混合耦合滤波器的设计实例。这些内容都可以在第 3 章中看到。

本书的第三部分介绍多频滤波器，它是针对多标准、多模式的一体化通信系统。现代无线通信系统，尤其是手持终端，一方面希望体积小、成本低，另一方面希望功能多，可以兼容多个频率的标准和模式，相当于多个通信系统集成一体，这势必又增加了体积和成本。由于制约系统体积的瓶颈主要是射频前端（含天线），如果一个射频前端能够同时工作于多个频率，就相当于多个射频前端，必然可以有效地减小体积和成本。因此，近年来，多频射频器件的研究一直是业内研究的热点。本书第 4 章集中介绍本人团队在小型平面多频滤波器方面的研究成果，包括基于 SIR 结构、SLR 结构、CR 结构、组合谐振器结构、多通路谐振器结构的多频滤波器的分析、设计和实例。

本书的第四部分介绍超宽带滤波器的研究成果，包括几种结构的分析、设计和实例，主要体现在第 5 章。自 2002 年美国联邦通信委员会(FCC)把 3.1~10.6GHz 频段开放给超宽带通信系统以来，作为系统重要部件的超宽带滤波器的研究已成

为业内重点研究的内容。

本书 80% 以上的内容都是我们团队的研究成果，除了署名的作者外，还有许多研究生的贡献，他们是吴小虎博士、林学明硕士、计明钟硕士、李舒涛硕士、田旭坤硕士、黎志辉硕士、欧阳霄硕士和朱贺硕士等。许多研究成果已发表在国内外著名的刊物上，包括微波领域顶级刊物 *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* 和 *IEEE Microwave and Wireless Component Letters* 等。

与本书内容有关的研究工作得到了国家自然科学基金重点项目（U0635004）的资助，在此，向国家自然科学基金委表示衷心的感谢。

本书的主要内容都是近几年的研究成果，内容新的同时，也难免有不成熟和瑕疵的地方。真诚希望读者从书中得到帮助的同时，更能不吝赐教，提出宝贵的意见。

褚庆昕

2015 年 11 月

于广州华南理工大学校园

目 录

序一

序二

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 滤波器发展简史	1
1.2 滤波器综合理论	3
1.3 电磁混合耦合滤波器	3
1.4 多频带滤波器	4
1.5 超宽带滤波器	5
参考文献	6
第 2 章 滤波器综合理论	11
2.1 引言	11
2.1.1 网络函数的实现条件	13
2.1.2 网络函数的零极点	14
2.1.3 传输零点	16
2.1.4 传输系数、反射系数和特征函数	18
2.1.5 滤波器的函数逼近	20
2.2 传统滤波器综合理论	23
2.2.1 基本概念	23
2.2.2 低通原型滤波器	24
2.2.3 频率变换	27
2.2.4 变形低通原型	32
2.3 广义 Chebyshev 函数滤波器的综合理论	35
2.3.1 传输零点的提取	36
2.3.2 广义 Chebyshev 函数的传输和反射多项式推导	52
2.3.3 由传输和反射多项式推导导纳参数	58
2.3.4 耦合矩阵综合	60
2.3.5 耦合矩阵化简	66
2.3.6 综合实例	70
2.4 混合电磁耦合滤波器的综合理论	77
2.4.1 传统定义的耦合系数	78

2.4.2	混合电磁耦合的定义	82
2.4.3	混合电磁耦合滤波器的耦合矩阵综合	87
2.4.4	综合实例	91
	参考文献	93
第3章	可控混合电磁耦合滤波器	96
3.1	混合电磁耦合平面滤波器	96
3.1.1	耦合传输线的电磁耦合	97
3.1.2	矩形开口环滤波器	105
3.1.3	三角形开路环滤波器	111
3.1.4	发夹梳滤波器	114
3.2	混合电磁耦合同轴腔滤波器	119
3.2.1	同轴腔中的电磁场模式	120
3.2.2	传统同轴腔的等效传输线模型	124
3.2.3	混合电磁耦合同轴腔滤波器设计	125
3.3	电磁耦合 $TE_{01\delta}$ 模介质谐振器滤波器	139
3.3.1	$TE_{01\delta}$ 模介质谐振器	139
3.3.2	$TE_{01\delta}$ 模介质谐振器的新耦合机制	144
3.3.3	基于新耦合机制的 $TE_{01\delta}$ 模介质谐振器滤波器	149
3.3.4	混合电磁耦合 $TE_{01\delta}$ 模介质谐振器滤波器	155
	参考文献	156
第4章	多频带滤波器	159
4.1	基于阶跃阻抗谐振器的多频滤波器设计	159
4.1.1	SIR 的谐振特性	159
4.1.2	基于两节 SIR 的双频滤波器设计	168
4.1.3	基于三节 SIR 的三频滤波器设计	179
4.2	基于多通带谐振器的多频滤波器设计	181
4.2.1	利用半波长和四分之一波长谐振器设计双频滤波器	181
4.2.2	利用半波长和四分之一波长谐振器设计三频滤波器	183
4.3	基于组合谐振器的多频滤波器设计	185
4.3.1	基于组合谐振器的双频滤波器设计	186
4.3.2	基于组合谐振器的三频滤波器设计	192
4.3.3	基于组合谐振器的四频滤波器设计	201
4.4	基于枝节线加载谐振器的多频滤波器设计	207
4.4.1	基于开路枝节线加载谐振器的双频滤波器设计	207
4.4.2	基于短路枝节线加载谐振器的双频滤波器设计	212
4.4.3	基于单枝节加载谐振器的三频滤波器设计	218

4.4.4 基于十字谐振器的三频滤波器设计·····	223
4.5 基于多枝节线加载谐振器的高阶双频滤波器设计·····	233
4.5.1 多枝节加载谐振器谐振特性分析·····	233
4.5.2 耦合特性分析·····	235
4.5.3 实例设计·····	240
参考文献·····	244
第 5 章 超宽带滤波器的设计 ·····	247
5.1 引言·····	247
5.2 基于枝节加载的超宽带滤波器设计·····	247
5.2.1 基于中间非对称阶跃阻抗枝节加载的超宽带滤波器设计·····	247
5.2.2 基于双枝节加载型谐振器的超宽带滤波器·····	253
5.2.3 基于多枝节加载的高选择性超宽带滤波器设计·····	260
5.2.4 基于多枝节加载的宽阻带超宽带滤波器设计·····	264
5.3 具有陷波特性的超宽带特性研究·····	268
5.3.1 基于弯折 T 形枝节加载谐振器的陷波超宽带滤波器·····	269
5.3.2 基于内嵌谐振单元的超宽带滤波器陷波设计·····	276
参考文献·····	281

第 1 章 绪 论

1.1 滤波器发展简史

在电信发展的早期，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不断发展^[1]。1910 年，一种新颖的多路通信系统即载波电话系统的出现，在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 Wagner 开创了一种以“Wagner 滤波器”闻名于世的滤波器设计方法。与此同时，美国的 Canbel 发明了一种以镜像参数法而知名的设计方法。随着这些技术的突破，许多知名的科研人员包括 Zobel、Foster、Cauer 和 Norton 开始积极地和系统地研究采用集总元件的滤波器设计理论。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构成。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^[2-8]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^[3, 7-9]。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，Richtmeyer 报道了介质谐振器，它利用了介质块（六面体、圆柱、圆盘等形状）的电磁波谐振，有小尺寸和高 Q 值两个显著的特点，然而，当时的材料温度稳定性不高使这种滤波器不足以实际应用。20 世纪 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质滤波器实际应用的可行性^[10-12]。随着陶瓷材料的发展，介质滤波器的应用得到迅速的发展。在现有的射频和微波通信设备中，介质滤波器已成为最重要、最常见的元件之一。此外，有专家认为，采用 20 世纪 80 年代出现的高温超导材料极有可能制造出极低损耗和极小尺寸的新颖微波滤波器^[13-16]，因此许多研发人员致力于其实际应用。21 世纪初，左手媒质滤波器出现，这种材料的滤波器具有体积更小和群延迟更小的特性^[17,18]。

在滤波器发展的早期，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，它是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实现滤波性能。1933 年，Mason 展示了一种石英晶体滤波器，这种滤波器由于其优异的温度稳定性和低损耗特性在不久以后成为通信器材中不可或缺的重要元件。同晶体谐振器一样，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,但由于其低生产成本而得到实际应用。采用如 LiNbO_3 、 LiTaO_3 等单晶体材料的声表面波的谐振器也被用作滤波器元件。声表面波滤波器比体声波滤波器可在更高的频率范围内得以实际应用。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。例如,钇铝铁石榴石(YIG)球微波滤波器已得到实际运用,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。

虽然前面提到的滤波器都采用了线性谐振系统,但在滤波器发展早期,研究者也意识到了可以用其他方法获得滤波响应。这种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。采用有源电路的滤波器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应用。这样的有源滤波器包括采用回放大器获得 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。数字滤波技术的一般步骤是: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。虽然数字滤波器的想法出现得很早,但实际工业应用直到 20 世纪 70 年代数字大规模集成电路取得了显著的发展以后才得以实现。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。

如前所述,滤波器及其设计方法的发展已有相当长的历史,滤波器已成为电信领域,同时也是许多其他电子设备中不可或缺的器件^[19-25]。随着信息产业和无线通信系统的蓬勃发展,微波频带出现相对拥挤的状态,频带资源的划分更加精细,分配到各类通信系统的频率间隔越来越密,对滤波器的性能提出了更高的要求。卫星和无线基站通信系统则需要体积小、损耗低、功率容量大、造价低的滤波器和多工器。集成多通信系统中的微波集成电路(MIC)和单片微波集成电路(MMIC)要求滤波器具有小型化、多通带和高性能的特点。超宽带通信系统则要求滤波器具有宽带、高抑制、陷波等特性。要满足这些要求,就需要在滤波器的设计理论和实现形式上有所创新。基于这一要求,本书致力于建立新的滤波器综合理论,提出新的分析和设计方法,创造新型的滤波器结构。

滤波器是近几十年来经久不衰的研究课题,在本学科顶级刊物 *IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques*、*IEEE Microwave and Wireless Component Letters* 的每一期都有滤波器相关文章的专区(filter and multiplexer)。滤波器综合技术^[26-35]、电磁混合耦合滤波器^[36-45]、多频滤波器^[46-57]和超宽带滤波器^[58-76]作为其中的重要分支,近 10 年广受科研工作者的青睐。

1.2 滤波器综合理论

射频/微波滤波器是现代微波中继通信、卫星通信、无线通信和电子对抗等系统必不可少的组成部分，同时也是最为重要和技术含量最高的微波无源器件。随着现代通信需求的高速发展，可利用的频谱资源日益紧张，因此对滤波器频率选择特性的要求越来越高。为了提高通信容量和避免相邻信道间的干扰，要求滤波器必须有陡峭的带外抑制；为了提高信噪比，要求通带内要有低的插入损耗；而为了减小信号的失真，要求通带内有平坦的幅频特性和群时延特性；为了满足现代通信终端的小型化趋势，要求滤波器有更小的体积与重量。传统的 Butterworth 滤波器和 Chebyshev 滤波器已经难以满足这些要求，引入具有有限传输零点的交叉耦合结构的滤波器是目前最常用，也是最佳的选择。与传统滤波器相比，这种滤波器不仅能够满足通带外的高选择特性，同时能够减少谐振腔的个数，降低设计成本和滤波器体积。

本书第2章系统地介绍现代交叉耦合滤波器的综合理论，并将其分成三大部分：传输零点特性、耦合谐振结构特性和求取滤波器耦合矩阵方法（综合方法和优化方法）。求取描述滤波器特性和结构的耦合矩阵的方法是交叉耦合滤波器综合理论的核心，而根据滤波器指标确定的滤波器阶数和传输零点则是耦合矩阵综合必不可少的前提条件。耦合谐振结构的耦合系数和滤波器外部 Q 值的提取则是根据耦合矩阵实现滤波器物理结构的基础。

1.3 电磁混合耦合滤波器

要满足苛刻的通信指标就必须采用具有有限频率传输零点的准椭圆滤波器；要实现有限传输零点就要在滤波器中构造多耦合路径。本书第3章介绍电磁意义上的多耦合路径的思想，它是比物理结构上的多耦合路径更广义的概念。传统耦合滤波器设计中，两个谐振器之间的一条物理耦合路径要么是电耦合，要么是磁耦合，因此在电磁意义上，耦合路径也是一条；而在混合电磁耦合滤波器中，两个谐振器之间的一条物理耦合路径在电磁意义上却是两条耦合路径，因此，从电磁意义上来讲，采用混合电磁耦合实现滤波器可以使耦合路径翻倍，如图 1-1 所示。交叉耦合滤波器可以实现准椭圆滤波响应，但它的耦合拓扑结构复杂，在滤波器应用中受到很多物理限制，而混合电磁耦合滤波器可以实现具有直线耦合拓扑和独立可控传输零点的准椭圆函数滤波器，在滤波器应用中常常优于交叉耦合滤波器。在传统滤波器设计中，人们总是使一个耦合结构只实现单一极性的电耦合或磁耦合，而尽量避免另一极性的耦合，主要原因是当电磁耦合纠缠在一起时，缺

乏适当的方法将电耦合和磁耦合从混合电磁耦合中分离出来，并独立地控制。本书第 3 章将解决这些问题，直接将谐振器通过混合电磁耦合级联起来构造多款具有阵线耦合拓扑结构的性能优良的准椭圆函数滤波器。

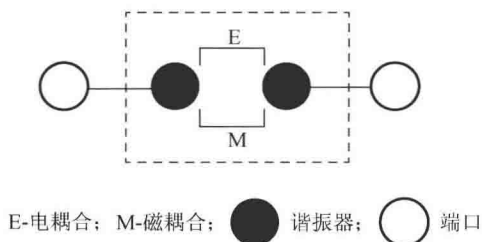


图 1-1 电磁混合耦合滤波器耦合结构

1.4 多频带滤波器

当今社会，无线通信技术向着高速、宽带以及大容量的趋势迅速发展，这对传统的单频段通信系统无疑是一个巨大的挑战。一个典型的单频段通信接收机的基本框图如图 1-2 所示，其由天线、滤波器、低噪声放大器（low noise amplifier, LNA）、混频器和基带信号处理模块等构成。天线接收的信号经过滤波器选出有用的信号，经过 LNA 放大，再经过混频器与射频（radio frequency, RF）本振信号混频，混频之后的信号经过中频（intermediate frequency, IF）滤波器取出有用的中频信号，得到的中频信号再经过 IF 放大器放大，然后经过混频器与 IF 本振信号混频得到基带信号，送入基带信号处理模块进行信号处理。单频段通信系统因为只能接收和处理单一频段的信号，大大限制了通信容量。

提高系统通信容量的直接方法就是设计能够兼容现有的各种频段资源的双频甚至多频通信系统，这也是当今无线通信技术发展的重要方向。例如，全球移动通信系统(GSM)同时工作在 900MHz 和 1800MHz 两个频段；无线局域网(WLAN)同时工作在 2.4GHz 和 5.2GHz 频段等。

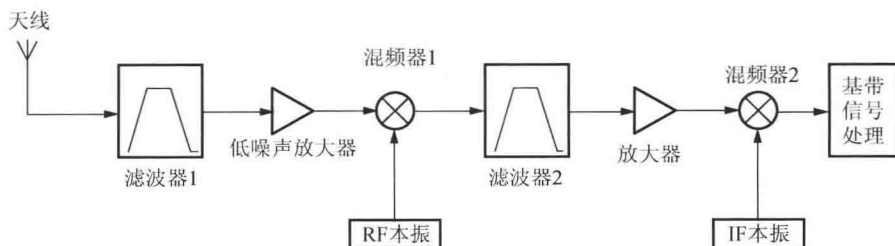


图 1-2 单频接收机结构框图

为了实现能够在双频段同时工作的通信系统，一般需要采用两套独立的单频段通信系统。两套独立的系统各自含有天线、滤波器、放大器和混频器等，可以分别处理两个不同频段的信号，然而这种做法在增加系统容量的同时却带来了许多其他问题：因为其实质是两个单频通信系统的简单叠加，所以体积比较大，不利于集成和小型化；额外购买基站、站址、铁塔等费用以及双倍数量的各个器件，大大提高了成本；此外，两套通信系统还存在着互调引起的性能问题。随着移动和无线通信技术的快速发展，要求在一个通信系统里能够兼容两个甚至多个通信制式，实现真正意义上的双频通信系统，已经成为减少无线通信设备成本和减小其体积的一个重要途径。

新型的双频通信系统在这种情况下应运而生，如图 1-3 所示，它由宽带天线^[28-32]、双频滤波器、双频低噪声放大器、双频段镜像抑制下变频器（双频混频器）等组成。这样，一个通信系统就可以同时包含两个频段的信号，信号的处理和传输由各个双频段器件单元来完成，整个双频通信系统设备的体积仅为原来的一半，并且性能也有了很大的提高^[52]。

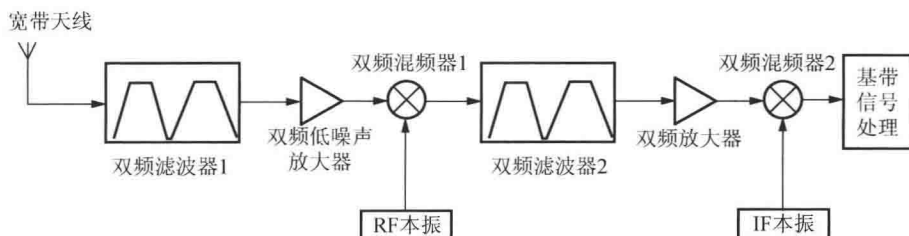


图 1-3 双频接收机结构框图

多频滤波器作为多频通信系统的关键器件，其性能优劣和体积大小是人们关注的焦点，它的研究与设计越来越得到人们的重视。双频滤波器作为一个二端口器件，它的传输特性是同时包括相距一定频率范围的两个通带，并且两个通带之间留有很好的隔离度，信号经过这个二端口器件后，阻带部分的信号被抑制，两个通带范围的信号保留了下来，这样就增加了系统的通信容量。在当今无线通信系统向着多制式、大容量、超宽带方向发展的背景下，作为其关键器件的多频滤波器的研究和设计具有极其重要的意义。本书第 4 章将专门介绍多频滤波器的理论设计与实现。

1.5 超宽带滤波器

超宽带技术早在 1940 年就已经出现，源于时域电磁学中用某类微波网络固有的冲激响应描述其瞬时特性。1960 年，超宽带技术用于雷达技术领域。1972 年，超宽带脉冲检测器申请了美国专利。1978 年，出现了最初的超宽带通信系统。1984

年,超宽带通信系统成功地进行了 10km 的试验。1990 年,美国国防部高级计划局开始对超宽带技术进行验证。2002 年 2 月,美国 FCC 发布了关于超宽带技术的“First Report and Order”,允许超宽带技术的商业应用,这是超宽带技术发展的一个重要里程碑。从此,超宽带技术,特别是超宽带无线通信开始受到比较广泛的关注。

超宽带无线通信的主要特点有:隐蔽性好、处理增益高、多径分辨能力强、传输速率高、空间容量大、穿透能力强、多功能一体化等。超宽带无线通信在民用领域具有巨大的市场。美国 FCC 预言,超宽带技术可能会带来一个全新的产业。目前,为满足低廉的宽带 Internet 无线接入和宽带多媒体业务增长的需要,民用超宽带无线通信的研究主要是建立短距离的高速连接和高速无线个域网(wireless personal area net, WPAN)。美国 FCC 已经批准超宽带技术的部分应用领域,相应的频段划分见表 1-1。

表 1-1 FCC 授权的超宽带技术的应用领域和使用频段

应用领域	使用频段
透地雷达成像系统	960MHz 以下, 3.1~10.6GHz
墙内成像系统	960MHz 以下, 3.1~10.6GHz
穿墙成像系统	960MHz 以下, 1.99~10.6GHz
医疗系统	3.1~10.6GHz
监视系统	1.99~10.6GHz
汽车雷达系统	24.075GHz 以上
通信与测量系统	3.1~10.6GHz

作为超宽带系统的关键器件之一,超宽带滤波器也得到了长足的发展。为了适应微波集成电路小型轻便化的要求,滤波器不仅要性能好,而且要体积小、结构紧凑。这对于波长只有厘米级的超宽带系统而言,的确是一个棘手的难题。本书第 5 章所研究的课题正是基于这一背景提出来的,研究所涉及的内容包括阶跃阻抗谐振器、枝节线加载谐振器谐振特性的理论分析,基于阶跃阻抗形式的高性能、小型化超宽带微带带通滤波器的研究与设计。

参 考 文 献

- [1] Makimoto M, Yamashita S. 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.
- [2] van Valkenburg M E. Introduction to Network Synthesis. New York: Wiley, 1966.
- [3] Hunter I C. Theory and design of microwave filters. IET Electromagnetic Waves Series, 2001,48:49-100.
- [4] Rhodes J D. Theory of Electrical Filters. New York: Wiley, 1975.
- [5] Rhodes J D, Zabalawi I H. Design of selective linear phase filters with equiripple amplitude characteristics. IEEE Transaction on Circuits System, 1978, 25:989-1000.

- [6] Levy R, Snyder R V, Matthaei G. Design of microwave filters. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2002, 50(1): 783-793.
- [7] Matthaei G L, Young L, Jones E M T. *Microwave Filters, Impedance-Matching Networks, and Coupling Structures*. New York: McGraw-Hill, 1964.
- [8] Scanlan J O. Theory of microwave coupled-line networks. *Proceedings of the IEEE*, 1980, 68: 209-231.
- [9] Marcuvitz N. *Waveguide Handbook*. Stevenage: IEE, 1986.
- [10] Cohn S B. Microwave bandpass filters containing high- Q dielectric resonators. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1968, 16(4): 218-227.
- [11] Fiedziuszko S J. Dual-mode dielectric resonator loaded cavity filters. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1982, 30: 1311-1316.
- [12] Fiedziuszko S J, Hunter I C, Itoh T, et al. Dielectric materials, devices, and circuits. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2002, 50(1): 706-720.
- [13] Matthaei G L, Hey-Shipton G L. Concerning the use of high-temperature superconductivity in planar microwave filters. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1994, 42(7): 1287-1294.
- [14] Lancaster M J. *Passive Microwave Device Applications of High-Temperature Super-Conductors*. Cambridge: Cambridge University Press, 1997.
- [15] Mansour R R, Ye S, Peik S, et al. HTS filter technology for space applications. *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, 1998.
- [16] Lascaux C, Rouchaud F, Madrangeas V, et al. Planar Ka-band high temperature superconducting filters for space applications. *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, 2001: 487-490.
- [17] Antoniadou M A, Eleftheriades V. Compact linear lead/lag metamaterial phase shifters for broadband application. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2003, 2: 103-106.
- [18] Garcia-Garcia J, Martin F, Bonache J, et al. Spurious passband suppression in microstrip coupled line band pass filters by means of split ring resonators. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2004, 14(9): 416-418.
- [19] 甘本祯, 吴万春. 现代微波滤波器的结构与设计(上、下册). 北京: 科学出版社, 1973.
- [20] 黄席椿, 高顺泉. 滤波器综合法设计原理. 北京: 人民邮电出版社, 1978.
- [21] 吴万春. 集成固体微波电路. 北京: 国防工业出版社, 1981.
- [22] 吴万春. 毫米波集成电路的设计及其应用. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1989.
- [23] 李嗣范. 微波元件原理与设计. 北京: 人民邮电出版社, 1982.
- [24] 吴万春, 梁昌洪. 微波网络及其应用. 北京: 国防工业出版社, 1980.
- [25] Hong J S, Lancaster M J. *Microstrip Filters for RF/Microwave Applications*. New York: Wiley, 2001.
- [26] Cameron R J. General coupling matrix synthesis methods for Chebyshev filtering function. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1999, 47(4): 433-442.
- [27] Cameron R J. Advanced coupling matrix synthesis techniques for microwave filters. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2003, 51(1): 1-10.
- [28] Cameron R J, Harish A R, Radcliffe C J. Synthesis of advanced microwave filters without