

2003年上海大学博士学位论文 ⑦

现代通信系统中微波滤波器 小型化的研究

作者：游 彬
专业：无线电物理
导师：李 英



上海大学出版社

· 上海 ·

2003 年上海大学博士学位论文

现代通信系统中微波滤波器 小型化的研究

作者：游彬
专业：无线电物理
导师：李英

上海大学出版社

· 上海 ·

Shanghai University Doctoral Dissertation (2003)

Study on the Miniaturization of Microwave Filter in Modern Communication Systems

Candidate: You Bin

Major: Radio Frequency

Supervisor: Prof. Li Ying

Shanghai University Press

• Shanghai •

上海大学

本论文经答辩委员会全体委员审查，确认符合上海
大学博士学位论文质量要求。

答辩委员会名单：

- | | | |
|---------------|---------------|--------|
| 主任：李征帆 | 教授，上海交大电子工程系 | 200030 |
| 委员：王宗欣 | 教授，复旦大学通信系 | 200430 |
| 王子华 | 研究员，上海大学通信工程系 | 200436 |
| 徐克西 | 教授，上海大学理学院 | 200072 |
| 徐长龙 | 研究员，上海大学通信工程系 | 200072 |
| 李铭祥 | 副研究员，上海电物所 | 201800 |
| 夏士明 | 副教授，上海大学通信工程系 | 200072 |
| 导师：李英 | 教授，上海大学 | 200072 |

评阅人名单：

- | | | |
|------------|---------------|--------|
| 李征帆 | 教授, 上海交大电子工程系 | 200030 |
| 王宗欣 | 教授, 复旦大学通信系 | 200430 |
| 朱守正 | 教授, 华东师大电子科学系 | 200062 |

评议人名单：

- | | | |
|------------|---------------|--------|
| 毛军发 | 教授, 上海交大电子工程系 | 200030 |
| 黎滨洪 | 教授, 上海交大电子工程系 | 200030 |
| 许福永 | 教授, 兰州大学电信系 | 730000 |
| 赵克玉 | 教授, 兰州大学电信系 | 730000 |

答辩委员会对论文的评语

游彬同学的博士学位论文采用基于理想匹配层 (PML) 吸收边界条件的时域有限差分法 (FDTD) 分析了介质谐振器及平面、多层微带结构, 重点对双模介质谐振器的主要性能进行了分析研究, 并得到了在微扰情况下双模介质谐振器中各种模式的变化, 设计了二阶的双模介质谐振器滤波器; 将滤波器的综合方法与 FDTD 方法结合起来用于设计耦合谐振器滤波器, 并采用缺陷地结构有效地抑制滤波器的寄生通带; 提出将慢波结构与多层技术相结合的滤波器新形式, 设计了一种新型的多层慢波孔耦合正方形开环谐振器滤波器, 跟传统的正方形开环谐振器相比, 减小了体积, 加宽了滤波器的阻带, 改善了滤波器的性能。

游彬同学的博士学位论文条理清晰, 分析严谨, 结果合理, 图文并茂。从该篇论文中可以看出, 游彬同学具备宽广的基础理论和系统的专业知识, 有较强的科研能力和创新能力。攻读博士学位期间, 已发表 (含录用) 学术论文八篇, 其中被 SCI、EI 各检索一篇。在答辩中能正确、清楚地回答问题。

答辩委员会表决结果

经答辩委员会表决,全票同意通过游彬同学的博士学位论文答辩,建议授予理学博士学位。

答辩委员会主席: **李征帆**

2003年8月7日

摘 要

近年来随着移动通信与个人通信业务的飞速发展和集成电路的高度集成化,作为无线通信系统必不可少的部件之一的滤波器正向小型化发展.同时,随着电子计算机的蓬勃发展,时域有限差分(FDTD)法正成为分析这类电磁问题的强有力工具.本论文提出了几种新颖的小型化微波滤波器设计,并用FDTD法对这些滤波器做了分析和研究.论文主要包括以下几个方面的内容:

首先,对谐振腔结构的FDTD方法进行介绍分析,并用采用理想匹配层(PML)吸收边界条件的时域有限差分法对平面微带结构、多层微带结构及有缺陷地微带结构作了系统的研究.与传统的Mur吸收边界条件相比,采用PML吸收边界条件不仅可以简化馈源模型、减小计算网格空间,而且可以加快收敛、提高计算速度.

其次,采用FDTD方法对双模介质谐振器的谐振模式及微扰对谐振的影响进行了分析,并根据分析结果设计出平面同轴端口的双模介质谐振器滤波器,这种滤波器采用高介电常数材料填充,能有效地减小滤波器的体积,且能获得良好的性能.

第三,介绍了用于设计切比雪夫滤波器的综合方法,并将这一方法与FDTD法相结合,用于设计各类耦合谐振器滤波器.这一方法可以从滤波器的设计指标出发,综合出滤波器的耦合矩阵,进而与分析方法相结合,得到滤波器的物理尺寸,在滤

波器实际设计中具有重要意义。

第四, 分析讨论了一种新型的柄状缺陷地结构, 在微带线的地平面上采用这种柄状缺陷地结构可以使微带线的传输特性产生一个极点, 因而将这种缺陷地结构用于抑制滤波器的寄生频率, 可以使滤波器在不增加体积、不增大插入损耗的情况下能有效地抑制滤波器的寄生频率。

最后, 作者将慢波结构与多层技术相结合设计出一种新型的孔耦合多层慢波谐振器滤波器, 由于慢波结构的存在使这种滤波器不仅减小了体积, 而且加宽了阻带. 多层技术又使滤波器的体积进一步减小为单平面滤波器的二分之一, 而且具有灵活的设计特性, 可以根据需要设计出切比雪夫滤波器或准椭圆函数滤波器, 均获得了良好的效果。

关键词 微波滤波器, 时域有限差分法, 综合设计方法, 耦合矩阵, 切比雪夫滤波器, 双模滤波器, 缺陷地结构, 慢波结构, 多层技术, 孔耦合

Abstract

In recently years with the fast development of mobile communications and personal communications and with the high integration of integrated circuits, microwave filter as one of the absolutely necessarily equipments in wireless communications systems, are becoming smaller and smaller. At the same time, with the fast development of computers, finite-difference time-domain (FDTD) method is becoming a powerful tool of analyzing these electromagnetic problems. In this dissertation, several novel miniaturized microwave filters are presented and FDTD analysis of these filters is studied. The dissertation is classified into five parts stated as follows.

Firstly, the resonator structure is analyzed by the finite-difference time-domain method, and the finite-difference time-domain method analysis on planar microstrip structures, multilayer microstrip structures and defected ground structure using the perfectly matched layer (PML) absorbing boundary condition (ABC) is fully studied. Comparing with the conventional Mur's absorbing boundary condition, applying PML's absorbing boundary condition can not only predigest the feeding model, decrease the total mesh dimensions, but also quicken the convergence, improve the calculating speed.

Secondly, the dual mode dielectric resonator and influence of disturbance are analyzed finite-difference time-domain. We design a dual mode dielectric resonator filter with planar coaxial port on the

basis of analysis results. This filter filled with high dielectric constant material, and the volume is reduced and acquired better characteristic.

Thirdly, a synthesis method designed Chebyshev filter is introduced. We combined this method with FDTD using designed some kinds of coupling resonator filter. This method can started with the designing specification, combined with analysis method, and acquired the dimension of filter. This method has important meaning in actual application.

Fourthly, a novel defected ground structure is discussed. A transmission polar will be acquired if we place this defected ground structure in ground plane of microstrip line, so we adopt this defected ground structure in restraining parasitical frequency. This structure can restrain parasitical passband availably without increasing volume and inserted losses of filter.

Lastly, we designed a novel multilayer slow-wave aperture coupling resonator filter through combined the slow-wave structure with multilayer technique. This filter has not only smaller volume but also wider stopband. The volume of this filter is half of that of single planar filter because of multilayer technique. We can design Chebyshev and quasi-elliptic-function filters with this method and acquired better effect.

Key words microwave filter, finite-difference time-domain method, synthesis design method, coupling matrix, Chebyshev filter, dual mode filter, defected ground structure, multilayer technique, aperture coupling

目 录

第一章 绪论	1
1.1 通信领域中滤波器历史的简单回顾	1
1.2 无线通信中的滤波器	3
1.3 微波滤波器小型化的几种方法	5
1.4 本文的工作	11
第二章 FDTD 方法在谐振腔及平面微带结构中的应用	13
2.1 引言	13
2.2 FDTD 方法分析腔体谐振器	15
2.3 FDTD-PML 方法分析平面及多层微带结构	18
2.4 结论	26
第三章 双模介质谐振器及其滤波器的设计	27
3.1 引言	27
3.2 正方形切角双模谐振器的理论分析	29
3.3 正方形切角双模滤波器的设计	35
3.4 结论	44
第四章 用电路综合方法设计切比雪夫型耦合谐振器 滤波器	45
4.1 引言	45
4.2 耦合谐振器滤波器的耦合矩阵	46
4.3 S 参数的多项式综合	54
4.4 单、双终端耦合矩阵的综合	59
4.5 耦合矩阵的缩减	68

4.6	单级点切比雪夫型滤波器的综合	74
4.7	结 论	77
第五章	运用缺陷地结构设计和优化微波滤波器	79
5.1	引 言	79
5.2	柄状缺陷地结构的频率特性	80
5.3	柄状缺陷地结构在抑制滤波器的寄生 通带方面的应用	85
5.4	结 论	89
第六章	多层慢波技术优化滤波器的设计	90
6.1	引 言	90
6.2	交指电容加载正方形开环谐振器的分析	91
6.3	多层四交指电容加载正方形开环谐振器 滤波器的设计	97
6.4	八交指电容加载正方形开环谐振器滤波器 的设计讨论	107
6.5	结 论	111
第七章	结束语	112
参考文献	114
致 谢	125

第一章 绪 论

1.1 通信领域中滤波器历史的简单回顾

从电信发展的早期开始,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取得进展.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 O.J.Zobel、R.M.Foster、W.Cauer 和 E.L.Norton 开始积极地、系统地采用集总元件电感和电容的滤波器设计理论进行研究.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 报导了介质谐振器,它利用了介质块(六面体、圆柱、圆盘等形状)的电磁谐振,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不高使该种滤波器不足以进行实际应用. 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电滤波器实际应用的可行性. 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质滤波器已成为最重要、最常见的元件之一. 此外,80年代出现的高温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,许多研发人员已致力于它们的实际应用.

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,这种滤波器由于其优异的温度稳定性和低损耗特性而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,但由于其较低的生产成本而得到实际应用. 采用单晶体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到应用. 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.

虽然上面提到的滤波器都是采用了线性谐振系统,但滤波器发展早期人们也意识到了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. 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. 此外还有能更直接地实现滤波器传递函数的数字技术等.

综上所述, 滤波器及其设计方法的发展已有相当长的历史, 滤波器已成为电信领域中的重要器件, 同时也是许多其他电子设备中不可或缺的器件.

1.2 无线通信中的滤波器

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常用的系统^[2].

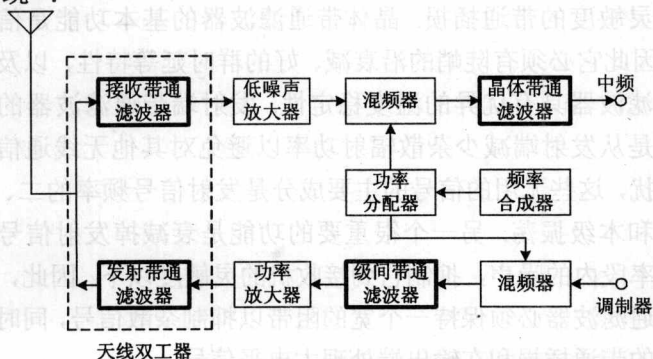


图 1.1 一种类型的移动电话射频电路方块图

在图 1.1 中接收器采用双超外差系统, 从天线接收的信号经接收端带通滤波器(双工器的一部分)处理滤去噪声信号后, 被低

噪声放大器放大,通过混频器进行频率转化后,经石英晶体带通滤波器传送到中频端。石英晶体带通滤波器的作用是信道滤波,即从多重频率信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各种各样的杂散信号,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带通滤波器(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各级之间普遍存在,各滤波器都有不同的功能和特性要求。接收端带通滤波器的必要功能是避免由于发射端输出信号泄漏而使接收器前端饱和;除去如镜频一类的干扰信号;减小来自天线端的本机振荡器的功率泄漏。所以接收端带通滤波器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。晶体带通滤波器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具有优异的温度稳定性。发射端带通滤波器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,发射端带通滤波器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。

从实用观点看,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