

2004年上海大学博士学位论文 34

无线通信系统中的微波滤波器 性能及小型化分析

作者：王学东

专业：无线电物理

导师：李英



上海大学出版社

· 上海 ·

2004 年上海大学博士学位论文

无线通信系统中的微波滤波器 性能及小型化分析



作者：王学东
专业：无线电物理
导师：李英



上海大学出版社

· 上海 ·

Shanghai University Doctoral Dissertation (2004)

**Study on the Performance and
Miniaturization of Microwave Filter in
Wireless Communication Systems**

Candidate: Wang Xue-dong
Major: Radio Physics
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：黎滨洪 教授，上海交大电子信息工程学院 200030

委员：安同一 教授，华东师范大学电子工程系 200062

王宗欣 教授，复旦大学通信工程系 200000

王子华 教授，上海大学电子信息工程系 200072

钦耀坤 研究员，信息产业部 23 研究所 200000

导师：李 英 教授，上海大学 200072

评阅人名单:

- | | | |
|------------|------------------|--------|
| 毛军发 | 教授, 上海交大电子信息工程学院 | 200030 |
| 王宗欣 | 教授, 复旦大学通信工程系 | 200072 |
| 安同一 | 教授, 华东师大电子科学系 | 200062 |

评议人名单:

- | | | |
|------------|-----------------|--------|
| 陈抗生 | 教授, 浙江大学 | 310027 |
| 许福永 | 教授, 兰州大学电子信息工程系 | 730000 |
| 朱守正 | 教授, 华东师大电子科学系 | 200062 |
| 徐长龙 | 研究员, 上海大学通信工程系 | 200072 |

答辩委员会对论文的评语

论文采用一种基于波动方程的三维时域有限差分方法,计算精度和效率明显提高.对无线通信系统中的几种微波滤波器进行了相当深入的研究,提出不少创新思路和技术,例如:

(1) 在分析具有抽头的阶梯阻抗谐振滤波器中,提出了增加耦合电容新技术.

(2) 提出一种谐振器上下平行放置的多层陶瓷带通滤波器设计思路,可减小体积提高性能.

(3) 采用低温共烧结陶瓷技术和时域有限差分方法设计出一种抑制寄生通带的多层陶瓷滤波器.

(4) 在阶梯阻抗滤波器的设计中提出一种旋转对称结构思路.

(5) 提出一种新颖的小型化单三角形微带贴片滤波器设计.

(6) 提出具有良好性能的等腰三角形和不等边三角形微带贴片滤波器设计.

其中不少工作已经得到国内外同行的认可,表明作者已具备相当强的科研能力,思维活跃,富有创新精神.

论文立论正确、论证充分,内容详实、条理清晰、文笔流畅,学风严谨,是一篇优秀的博士论文.表明王学东同学具有扎实的理论基础和系统的专业知识,独立的科研工作能力.

在答辩中正确回答问题,答辩委员会认为该论文已经达到博士论文水平.

答辩委员会表决结果

经答辩委员会通过无记名投票表决，一致通过，同意王学东同学通过论文答辩，并建议校学位委员会授予王学东同学理学博士学位。

答辩委员会主席：**黎滨洪**

2004年3月8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,时域有限差分法(FDTD)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,高性能微波滤波器设计,并用FDTD法做了分析和研究. 论文主要包括以下内容:

首先,主要讨论了时域有限差分方法,基于波动方程基础的时域有限差分方法以及对这种方法的发展. 提出的新方法需要的计算时间更少,计算效率更高.

其次,介绍了 $\lambda_g/4$, $\lambda_g/2$ 和 λ_g SIR的基本结构. 随后,系统地讨论SIR的一些基本特性如:谐振条件、谐振长度、杂散谐振频率和等效电路等.

第三,提出一种抽头式阶梯阻抗带通滤波器,通过在谐振器开路端引入耦合电容,增强两个谐振器之间的耦合,使通带带宽变宽,通带衰减减小,在不改变体积的情况下,使滤波性能得到提高;提出一种新颖的采用阶梯阻抗抽头式带通滤波器,体积只是原来的60%左右,然而性能比以前好;设计出一种抑制寄生通带的多层陶瓷滤波器,这种滤波器采用短路阶梯阻抗谐振器,在减小体积、减小插入损耗的情况下,有效地抑制滤波器的寄生通带,加宽滤波器的阻带;提出一种小型化旋转对称阶梯阻抗滤波器,利用旋转对称结构,有效地消除了阻抗比对滤波器体积的影响.

最后, 提出一种新颖、小型、简单的微带贴片带通滤波器结构. 这种结构仅用一个谐振器实现了通带两端各有一个衰减极点, 但体积是传统滤波器的 $1/2 \sim 1/3$. 这种结构中, 没有耦合缝隙, 可以减小制作过程中的不确定性; 设计出一种结构新颖、简单的方形贴片双模滤波器. 这种滤波器只有一个贴片, 没有耦合缝隙, 通过改变输入输出抽头的位置, 可以使滤波器的通带任何一侧都有衰减极点; 设计了一种不带耦合缝隙的双模椭圆函数滤波器.

关键词: 微带滤波器, 时域有限差分法, 阶梯阻抗谐振器, 椭圆函数滤波器, 多层滤波器, 微带贴片, 多层技术

Abstract

In recent years with the fast development of mobile communications, personal communications and the high integration of integrated circuits, microwave filter as one of the 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 or high performance microwave filters are presented and FDTD analysis of some filters is studied. The dissertation is classified into four parts stated as follows.

Firstly, introduces FDTD and presents a novel FDTD method. The FDTD formulation, based on wave equation, employs approximation techniques. The proposed algorithm uses much shorter time than the standard FDTD method. This method has much higher efficiency.

Secondly, $\lambda_g/4$, $\lambda_g/2$ and λ_g type transmission-line stepped impedance resonators (SIR's) have been introduced, standardizes these three types of SIR's and systematically summarizes their fundamental characteristics, such as resonance conditions, resonator length, spurious (higher order) responses, and equivalent circuits.

Thirdly, a tapped bandpass filter composed of two coupled stepped-impedance resonators (SIR) is proposed. A coupling

capacitor located at the end of resonators is introduced, by which strong coupling between them can be achieved, thus, a wider passband and lower insert loss can be realized. The performance is improved while the volume keeps no changes; A novel laminated bandpass filter composed of two SIR is proposed. The volume of proposed filter is about 60% of conventional filter while the performance is better than the former, describes the design of a compact stripline ceramic filter. Using short-circuit SIRs, this structure can restrain parasitical passband availably with decreasing volume and inserted losses of filter; A new compact SIR filter is proposed, in which impedance ratio has no impact on the volume. By reversing one of two resonators, the size of the filter is much smaller.

Lastly, presents a new compact and simple microstrip patch bandpass filter structure using only one resonator. This filter has two transmission zeros on the both sides of the passband. The volume of this filter is about 1/3 or 1/2 of conventional filter. Without coupling gaps, the new filter can reduce uncertainty in fabrication; A class of new planar dual-mode filters using one square single patch without coupling gaps are proposed. Transmission zeros can be implemented on the either side of the passband by changing the locations of two feed lines. A novel dual-mode elliptic-function bandpass filter structure without coupling gaps is also proposed.

Key words: microwave filter, finite-difference time-domain method, elliptic-function filter, laminated filter, stepped-impedance resonators, microstrip patch, multilayer technique

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 应用于无线通信中的滤波器分类	5
1.4 本文的研究内容和主要贡献	7
第二章 FDTD 及基于扩展波方程的时域有限差分法	10
2.1 引言	10
2.2 FDTD 方法基本理论	12
2.3 二维基于扩展波方程的时域有限差分方法	21
2.4 简单的三维扩展波方程的时域有限差分法	30
2.5 结论	33
第三章 SIR 的基本结构和特性	34
3.1 引言	34
3.2 SIR 的基本结构	35
3.3 SIR 的谐振条件和谐振器的电学长度	36
3.4 SIR 的杂散谐振频率	39
3.5 一种 SIR 等效电路的推导	41
3.6 四分之一波长型 SIR	43
第四章 多层陶瓷带通滤波器	50
4.1 引言	50
4.2 带有耦合电容的多层陶瓷带通滤波器	53
4.3 谐振器上下平行放置的多层陶瓷带通滤波器	59

4.4	抑制寄生通带的多层陶瓷滤波器	66
4.5	一种结构紧凑的旋转对称阶梯阻抗滤波器	74
第五章	微带贴片滤波器	81
5.1	引言	81
5.2	平面三角形谐振器	82
5.3	单个三角形微带贴片滤波器	91
5.4	等腰三角形微带贴片滤波器	91
5.5	不等边三角形微带贴片滤波器	107
5.6	方形贴片双模滤波器的研究	111
第六章	结束语	118
	参考文献	120
	致 谢	133

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,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 and 系统地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计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.

*本项目由上海市教委博士点基金资助

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^[2].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的不高使该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,20 世纪 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.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.

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他方法获得滤波响应. 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. 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. 此外还有更直接地实现滤波器传递函数的数字技术等.

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.

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. 现在从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常用的系统^[1].

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之后, 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, 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.

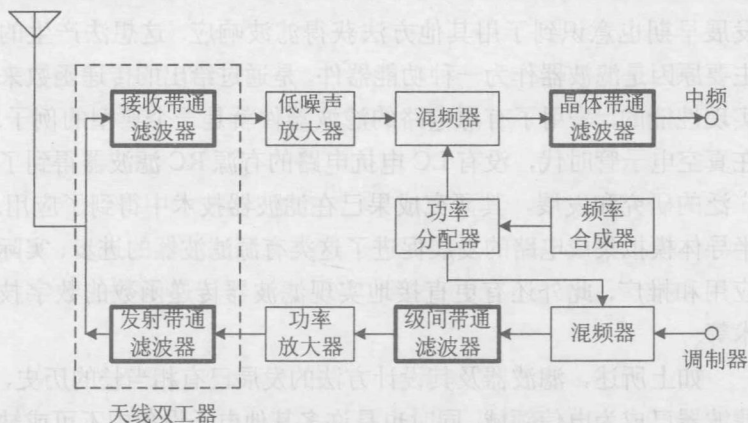


图 1.1 一种类型的移动电话射频电路方块图

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，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，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