

喇东升 马雪莲 著

# 微带滤波器 结构与amp;设计



东北大学出版社  
Northeastern University Press

# 微带滤波器结构与amp;设计

喇东升 马雪莲 著

东北大学出版社

· 沈 阳 ·

© 喇东升 马雪莲 2019

图书在版编目 (CIP) 数据

微带滤波器结构与设计 / 喇东升, 马雪莲著. — 沈阳: 东北大学出版社, 2019. 5

ISBN 978-7-5517-2140-0

I. ①微… II. ①喇… ②马… III. ①微波滤波器—结构 ②微波滤波器—设计 IV. ①TN713

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 104480 号

---

出版者: 东北大学出版社

地址: 沈阳市和平区文化路三号巷 11 号

邮编: 110819

电话: 024-83687331(市场部) 83680267(社务部)

传真: 024-83680180(市场部) 83680265(社务部)

网址: <http://www.neupress.com>

E-mail: [neuph@neupress.com](mailto:neuph@neupress.com)

印刷者: 沈阳航空发动机研究所印刷厂

发行者: 东北大学出版社

幅面尺寸: 170mm×240mm

印 张: 12.5

字 数: 255 千字

出版时间: 2019 年 7 月第 1 版

印刷时间: 2019 年 7 月第 1 次印刷

策划编辑: 汪子琨

责任编辑: 石玉玲

责任校对: 汪子琨

封面设计: 潘正一

---

ISBN 978-7-5517-2140-0

定 价: 63.00 元

# 前 言

随着无线通信技术的发展,大量无线电发射机和雷达产生很强的谐波、杂散电磁辐射,这种辐射如果控制不好,可能引起设备系统失控、飞机操作系统失稳、雷达天线跟踪位置偏移等。为了抑制谐波、杂散电磁辐射等,作为关键射频器件的滤波器的作用变得越来越重要,对性能的要求将越来越高。无线通信设备的小型化要求微波滤波器在尺寸与结构上具有电路占用空间小、质量轻、易于集成化等特点,因此,对滤波器的小型化和高性能研究非常有意义。

笔者多年致力于微带滤波器理论与设计的研究,本书对微带滤波器的基础理论及笔者最新研究成果,包括 DGS 结构滤波器、DMS 结构滤波器、双模谐振器滤波器、异向介质结构滤波器和平行耦合线滤波器给出全面、深入的阐述,为滤波器等微波器件的深入研究提供基础。本书中绝大部分内容取材于笔者近期在国际、国内高端学术期刊和重要国际学术会议发表的论文和课题成果,全面、系统地展示了研究结果和进展。

本书主要对微带滤波器理论与设计加以介绍,在结构上分为 7 章。

第 1 章简要介绍了微波滤波器的分类、应用,以及本书中用到的几种提高微波滤波器的一些新技术,阐明了此次研究的重要意义。

第 2 章详细分析了 DGS 结构的阻带特性和等效电路,首先提出了补偿环形 DGS 结构,设计了补偿环形 DGS 结构带通滤波器,讨论了它们的传输特性。在分析分形结构的基础上,提出了 Koch 岛分形 DGS 结构和 H 形开路枝节结合形成低通滤波器。然后提出了两种  $\Phi$  形缺陷地结构,同样将其与 H 开

路枝节结合设计了低通滤波器,给出了它们的传输特性。最后在分析 M 形 DGS 结构带阻滤波器的基础上,设计了两种蛇形 DGS 结构带阻滤波器,对结构参数进行了仿真研究,给出了结构参数和谐振频率之间的关系。研究发现,实现同样频率的带阻滤波器,蛇形 DGS 结构要比 M 形 DGS 结构小很多。另外,蛇形 DGS 结构带阻滤波器有两个传输零点存在。

第 3 章研究了一种新型缺陷微带结构(DMS)的阻带特性及其与 DGS 结构的区别。根据电磁仿真结果和等效电路原理,提取了相应的集总参数。DMS 结构更容易与有源微波电路集成,同时避免了电磁波从接地板的辐射。设计了多种 DMS 结构的带阻滤波器,并基于 HFSS 分析了相关结果。在此基础上,结合 DMS 结构和 DGS 结构,设计了单阻带滤波器和双频带带阻滤波器。最后基于单一 DMS 结构,设计了双频带带阻滤波器。

第 4 章在分析双模贴片谐振器的基础上,将分形结构应用于双模微带贴片滤波器的设计中。分别设计了分形结构的正方形滤波器和正六边形滤波器。分形结构能够更好地激励简并模的耦合,改善通带特性。然后在正方形、正六边形和圆形双模谐振器上刻蚀槽形结构或者切口设计带通滤波器。接着在环形双模谐振器加载开路枝节设计带通滤波器。最后基于渐变阶梯阻抗谐振器,设计了带阻滤波器。双模谐振器结构能够降低滤波器原有的谐振频率,有利于滤波器的小型化。

第 5 章讨论了用于开发人工异向介质材料的重要组成单元——金属开口环(SRR)和互补口环谐振器(CSRR),研究了它们的谐振特性及基于这两种结构的平面带通滤波器。提出将互补开口环谐振器刻蚀在微带线或者金属地上,从而充分地利用电场进行有效激励,降低了谐振器的谐振频率,拓宽了通带带宽。在此基础上,设计了多种一维 CSRR 带通滤波器,CSRR 滤波器均具有较宽的带宽和较深的阻带特性。最后基于电场耦合器和平行耦合线,设计了宽带带通滤波器。

第 6 章讨论了传输线理论和奇偶模理论,分别运用传输线理论和奇偶模理论,设计了多个滤波器,研究了它们的谐振特性。从理论、仿真和测试方面研究所设计滤波器的性能。仿真和测试结果验证了理论的可行性。

第 7 章给出了相关结论。

本书具有以下鲜明特色。

(1)完整性。内容丰富全面,结构合理,体系完整,阐述微带滤波器理论与设计的五个方面,包括DGS结构滤波器、DMS结构滤波器、双模谐振器滤波器、“左手材料”结构滤波器和平行耦合线滤波器,进行全面且系统的介绍。

(2)实用性。结合射频微波器件的特点,将最新技术应用于微带滤波器的理论和设计研究中,给出具体的应用实例,具有很强的实用性。

(3)学术性。本书具有一定的理论高度和学术价值,书中绝大部分内容取材于笔者近期在国际、国内高端学术期刊和重要国际会议发表的论文,全面展示了大量的关于微带滤波器理论与设计方面的最新科研成果,具有很高的学术参考价值。

本书适合我国电子和通信领域的教学、科研工作和工程应用。既可以供通信、电子、信息等相关专业的研究生和大学高年级学生作为教材或教学参考书,也可以供研究人员、工程师等技术人员参考。

笔者的研究工作得到国家自然科学基金项目(61501100)的资助,在此表示深深的谢意!在写作本书过程中,研究生关鑫做了大量细致而辛苦的工作,在此一并表示衷心的感谢!

由于笔者水平有限,加之微带滤波器理论与设计的研究仍处于不断深入过程中,新的研究成果不断涌现,书中错误和不足之处在所难免,恳请专家、读者予以指正。

著者

2018年12月

# 目 录

|                                |    |
|--------------------------------|----|
| 第 1 章 绪 论 .....                | 1  |
| 1.1 引 言 .....                  | 1  |
| 1.2 微波滤波器的发展历史和研究现状 .....      | 2  |
| 1.2.1 历史简单回顾 .....             | 2  |
| 1.2.2 应用分类 .....               | 3  |
| 1.2.3 发展趋势 .....               | 4  |
| 1.3 无线通信中的微带滤波器 .....          | 5  |
| 1.4 提高微带滤波器性能的新技术及其应用 .....    | 7  |
| 第 2 章 缺陷地结构滤波器设计 .....         | 10 |
| 2.1 缺陷地结构 .....                | 10 |
| 2.1.1 缺陷地结构的提出和发展 .....        | 10 |
| 2.1.2 缺陷地结构的特性和应用 .....        | 12 |
| 2.1.3 各种缺陷地结构简介 .....          | 12 |
| 2.1.4 缺陷地结构等效电路 .....          | 14 |
| 2.2 补偿环形缺陷地结构带通滤波器设计 .....     | 15 |
| 2.2.1 补偿环形缺陷地结构及其谐振特性研究 .....  | 15 |
| 2.2.2 补偿环形缺陷地结构带通滤波器设计 .....   | 18 |
| 2.3 Koch 岛分形缺陷地结构低通滤波器设计 ..... | 20 |
| 2.3.1 Koch 岛分形结构 .....         | 21 |

|                                  |                                  |           |
|----------------------------------|----------------------------------|-----------|
| 2.3.2                            | 一次迭代 Koch 岛分形缺陷地结构 .....         | 21        |
| 2.3.3                            | 一次迭代 Koch 岛分形缺陷地结构低通滤波器设计 .....  | 23        |
| 2.3.4                            | 二次迭代 Koch 岛分形缺陷地结构 .....         | 25        |
| 2.3.5                            | 二次迭代 Koch 岛分形缺陷地结构低通滤波器设计 .....  | 26        |
| 2.4                              | 方形 $\Phi$ 形缺陷地结构低通滤波器设计 .....    | 30        |
| 2.4.1                            | 方形 $\Phi$ 形缺陷地结构谐振特性研究 .....     | 30        |
| 2.4.2                            | 一单元方形 $\Phi$ 形缺陷地结构低通滤波器 .....   | 31        |
| 2.4.3                            | 级联方形 $\Phi$ 形缺陷地结构低通滤波器设计 .....  | 32        |
| 2.5                              | 改进圆形 $\Phi$ 形缺陷地结构低通滤波器设计 .....  | 35        |
| 2.5.1                            | 改进圆形 $\Phi$ 形缺陷地结构谐振特性研究 .....   | 35        |
| 2.5.2                            | 改进一单元圆形 $\Phi$ 形缺陷地结构低通滤波器 ..... | 36        |
| 2.5.3                            | 改进圆形 $\Phi$ 形缺陷地结构低通滤波器设计 .....  | 37        |
| 2.6                              | 弯曲线缺陷地结构带阻滤波器设计 .....            | 40        |
| 2.6.1                            | M 形缺陷地结构带阻滤波器设计 .....            | 40        |
| 2.6.2                            | 蛇形缺陷地结构谐振特性研究 .....              | 42        |
| 2.6.3                            | 蛇形缺陷地结构带阻滤波器设计 .....             | 48        |
| 2.7                              | 本章小结 .....                       | 49        |
| <b>第 3 章 缺陷微带结构带阻滤波器设计</b> ..... |                                  | <b>51</b> |
| 3.1                              | 引言 .....                         | 51        |
| 3.2                              | 双 U 形缺陷微带结构带阻滤波器设计 .....         | 52        |
| 3.2.1                            | 双 U 形缺陷微带结构参数与频率特性的关系 .....      | 52        |
| 3.2.2                            | 双 U 形缺陷微带结构带阻滤波器设计 .....         | 54        |
| 3.3                              | M 形缺陷微带结构带阻滤波器设计 .....           | 57        |
| 3.3.1                            | M 形缺陷微带结构参数与频率特性的关系 .....        | 57        |
| 3.3.2                            | M 形缺陷微带结构带阻滤波器设计 .....           | 60        |
| 3.4                              | 蛇形缺陷微带结构带阻滤波器设计 .....            | 62        |
| 3.4.1                            | 蛇形缺陷微带结构参数与频率特性的关系 .....         | 62        |
| 3.4.2                            | 蛇形缺陷微带结构带阻滤波器设计 .....            | 64        |
| 3.5                              | $\pi$ 形缺陷结构带阻滤波器设计 .....         | 65        |
| 3.5.1                            | $\pi$ 形缺陷结构参数与频率特性的关系 .....      | 65        |

|            |                                |           |
|------------|--------------------------------|-----------|
| 3.5.2      | $\pi$ 形缺陷结构带阻滤波器设计 .....       | 67        |
| 3.6        | $\delta$ 形缺陷结构带阻滤波器设计 .....    | 69        |
| 3.6.1      | $\delta$ 形缺陷结构参数与频率特性的关系 ..... | 69        |
| 3.6.2      | 级联 $\delta$ 形缺陷结构带阻滤波器设计 ..... | 71        |
| 3.6.3      | 不同形式缺陷结构带阻滤波器设计 .....          | 73        |
| 3.7        | 基于单一缺陷微带结构的双频带带阻滤波器设计 .....    | 75        |
| 3.7.1      | 曲线缺陷微带结构谐振特性分析 .....           | 75        |
| 3.7.2      | 曲线缺陷微带结构滤波器设计 .....            | 77        |
| 3.8        | 本章小结 .....                     | 78        |
| <b>第4章</b> | <b>双模谐振器滤波器设计 .....</b>        | <b>79</b> |
| 4.1        | 引言 .....                       | 79        |
| 4.2        | 分形结构的正方形贴片滤波器设计 .....          | 80        |
| 4.2.1      | 单个分形结构的正方形滤波器 .....            | 80        |
| 4.2.2      | 两个分形结构的正方形滤波器 .....            | 82        |
| 4.2.3      | 正方形分形缺陷结构位置对滤波器性能的影响 .....     | 85        |
| 4.3        | 分形结构的正六边形贴片滤波器设计 .....         | 86        |
| 4.3.1      | 单个分形结构的正六边形滤波器 .....           | 86        |
| 4.3.2      | 两个分形结构的正方形滤波器 .....            | 88        |
| 4.4        | 槽形缺陷结构贴片滤波器设计 .....            | 91        |
| 4.4.1      | 中心刻蚀槽形结构的正方形滤波器 .....          | 91        |
| 4.4.2      | 一侧刻蚀槽形结构的正方形滤波器 .....          | 93        |
| 4.4.3      | 中心刻蚀槽形结构的正六边形滤波器和圆形滤波器 .....   | 95        |
| 4.5        | 输入端切口贴片滤波器设计 .....             | 97        |
| 4.5.1      | 刻蚀切口结构的正方形滤波器 .....            | 97        |
| 4.5.2      | 刻蚀切口结构的圆形滤波器 .....             | 99        |
| 4.6        | 基于奇偶模理论的环形滤波器设计 .....          | 101       |
| 4.6.1      | 内部开路枝节圆环滤波器设计 .....            | 102       |
| 4.6.2      | 外部开路枝节环形滤波器设计 .....            | 106       |
| 4.7        | 渐变阶梯阻抗谐振器带阻滤波器设计 .....         | 110       |
| 4.8        | 本章小结 .....                     | 113       |

|                                   |     |
|-----------------------------------|-----|
| <b>第 5 章 异向介质谐振器滤波器</b> .....     | 114 |
| 5.1 引言 .....                      | 114 |
| 5.2 基于 CSRR 结构的微带带通滤波器设计 .....    | 118 |
| 5.2.1 微带 CSRR 结构谐振特性分析 .....      | 118 |
| 5.2.2 级联 CSRR 结构带通滤波器设计 .....     | 120 |
| 5.3 单侧 CSRR 带通滤波器设计 .....         | 123 |
| 5.3.1 单侧 CSRR 谐振器谐振特性分析 .....     | 123 |
| 5.3.2 级联单侧 CSRR 结构带通滤波器设计 .....   | 125 |
| 5.4 CSRR based 带通滤波器设计 .....      | 127 |
| 5.4.1 CSRR based 结构谐振特性分析 .....   | 127 |
| 5.4.2 CSRR based 滤波器设计 .....      | 128 |
| 5.5 基于平行耦合线的 CSRR 结构带通滤波器设计 ..... | 129 |
| 5.6 电场耦合器宽带带通滤波器设计 .....          | 131 |
| 5.6.1 电场耦合器 .....                 | 131 |
| 5.6.2 基于电场耦合器的带通滤波器设计 .....       | 131 |
| 5.7 本章小结 .....                    | 133 |
| <b>第 6 章 平行耦合线滤波器设计</b> .....     | 134 |
| 6.1 平行耦合线带通滤波器设计 .....            | 135 |
| 6.1.1 等阻抗平行耦合线带通滤波器设计 .....       | 135 |
| 6.1.2 不等阻抗平行耦合线带通滤波器设计 .....      | 137 |
| 6.2 单枝节平行耦合线带通滤波器设计 .....         | 139 |
| 6.2.1 单枝节平行耦合线带通滤波器等效电路分析 .....   | 139 |
| 6.2.2 单枝节平行耦合线带通滤波器仿真和测试 .....    | 145 |
| 6.3 双枝节平行耦合线带通滤波器设计 .....         | 147 |
| 6.3.1 双枝节平行耦合线带通滤波器等效电路分析 .....   | 147 |
| 6.3.2 双枝节平行耦合线带通滤波器仿真和测试 .....    | 150 |
| 6.4 单枝节平行耦合线差分滤波器设计 .....         | 152 |
| 6.4.1 非对称结构差分带通滤波器的电路结构分析 .....   | 152 |
| 6.4.2 非对称结构差分带通滤波器设计 .....        | 156 |

|                                |     |
|--------------------------------|-----|
| 6.4.3 对称结构差分带通滤波器的电路结构分析 ..... | 159 |
| 6.4.4 对称结构差分带通滤波器设计 .....      | 163 |
| 6.5 本章小结 .....                 | 166 |
| 第7章 结 论 .....                  | 167 |
| 参考文献 .....                     | 171 |

# 第1章 绪论

## 1.1 引言

在通信发展的早期阶段,滤波器在电路中起着重要的作用。1910年,一种新型的多路通信系统的出现,在通信领域引发了一场彻底的技术革命,开创了通信技术的新时代。新的通信系统要求发展能在特定的频带内提取和检出所需信号的新技术,这种技术的发展进一步加速了滤波器技术的研究和发展。当今信息社会的发展依赖于通信的发展,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,对性能的要求将越来越高<sup>[1]</sup>。

微波滤波器是一个典型的二端口网络,它通过在滤波器通带频率内提供信号传输并在阻带内提供衰减的特性,用以控制微波系统中某处的频率响应<sup>[2]</sup>。滤波器由两个或者多个谐振器组成。谐振器包括应用于低频的集总元件和应用于高频的分布式元件。一种现代的设计微波滤波器的方法是插入损耗法。该方法采用网络综合技术设计出有完整的特定频率响应的滤波器。通过从使用阻抗和频率归一化的低通滤波器原型开始,该设计过程得到了简化,然后进行转换,以便将设计原型变换到所希望的频率范围和阻抗值上去。对于微波应用,一般通过理查德变换和科洛达恒等式变换到由传输线段组成的分布元件<sup>[3]</sup>。

在无线通信中,滤波器可以用于滤去镜频干扰、衰减噪声、频分复用,也可以用在高性能的振荡、放大、倍频和混频电路中。随着无线通信的个人

化和宽带化发展,需要人性化和高性能的终端设备,促使了滤波器向微型化和高性能方向发展。因此滤波器的微型化和高性能研究非常有意义。

## 1.2 微波滤波器的发展历史和研究现状

### 1.2.1 历史简单回顾

微波滤波器的理论和实践开始于第二次世界大战前几年,开拓者有 Mason、Sykes、Darlington、Fano、Lawson 和 Richards。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,美国的 G.A.Cambell 发明了另一种后来以镜像参数法而知名的设计方法<sup>[4]</sup>。随着这些技术的发展,许多科研人员包括 O.J.Zobel、R.M.Foster、W. Cauer 和 E.L.Norton 开始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<sup>[4]</sup>。该方法的效率和结果是很好的,现在所采用的很多滤波器设计技术就基于此设计方法。

不久,滤波器设计由原先的集总元件 LC 谐振器扩展到分布元件同轴谐振器和波导谐振器<sup>[5]</sup>。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 提出了介质谐振器,它利用了介质块的电磁谐振,有小尺寸和高品质因子两个显著的特点,然而由于当时的材料温度稳定性比较差,使该种滤波器没有能够用于实际。在 20 世纪 70 年代,具有优异的温度稳定性和高品质因子的陶瓷材料得到发展,增加了介质滤波器应用于实践的可行性。随着陶瓷材料的快速发展,滤波器的应用得到迅速发展。在现有的射频和微波器件中,介质滤波器已成为最重要、最常见的谐振元件之一。到了 20 世纪 80 年代,由于无线通信的飞速发展,不仅增加了微带滴波器的需求,同时对其性能提出了更高的要求,比如高性能、小型化和低成本等。新技术和新材料也刺激了滤波器设计的快速发展,其中包括:高温超导技术、低温共烧陶瓷技术、微波单片集成电路技术等<sup>[6-9]</sup>。许多研究人员开始致力于它们的实际应用。

传统的滤波器设计基本上都是采用网络综合的方法。所谓网络综合,指

的是用网络去实现预先规定元器件特性的一个过程。它大致包括三个步骤：①提出目标，即理想响应；②选用可能的函数去逼近目标；③实现具有逼近函数特性的网络。根据采用的逼近函数，一般有 Butterworth 函数综合、Chebyshev 函数综合、椭圆函数综合等经典的滤波器综合设计方法<sup>[10-11]</sup>。

在微波滤波器理论的研究和开发过程中，许多专家和学者做了重要的工作。G.L.Matthaei 在专著中对微波滤波器的经典设计方法做了全面和系统的介绍<sup>[5]</sup>；S.B.Cohn 在集总低通原型的基础上第一次提出了简单实用的直接耦合谐振式滤波器设计理论；L.Young 在分布低通原型的基础上把该理论推广到宽带和低波纹情况<sup>[12]</sup>；R.Levy 综合了前两种方法的优点，给出了简单而准确的原型元件推导公式<sup>[13]</sup>；S.O.Scanlan 建立了线性相位滤波器设计理论<sup>[14]</sup>；S.B.Cohn 第一次把计算机优化技术用于微波滤波器的设计；H.J.Orchard 提出了用于微带滴波器综合的迭代分析法<sup>[15]</sup>；A.E.Atia 和 R.J.Cameron 先后提出了用耦合矩阵来设计滤波器的方法<sup>[16-18]</sup>；S.Amari 给出了耦合矩阵的梯度优化以及具有源和负载耦合的滤波器综合的迭代技术<sup>[19-20]</sup>，这些都是微带滴波器发展史上的重大突破。

随着计算机技术的发展，各种商业电磁全波仿真软件陆续出现，滤波器的设计变得相对容易。一些商业软件可以进行滤波器的原理电路综合，另外一些商业软件可以进行滤波器的结构优化。这些商业软件的使用不仅降低了设计难度，而且缩短了研制周期。目前，微波射频领域主要的 EDA 工具包括 Ansys 公司的 HFSS、Designer 软件和 Agilent 公司的 ADS 软件，此外还有 CST、Microwave Office、Zeland、XFDTD、Sonnet 等其他商业软件。为了解决微带滴波器调试的难度和调试的效率，在滤波器的设计中引入了计算机辅助调试技术，减少了调试对于工程经验的依赖性<sup>[21]</sup>。

### 1.2.2 应用分类

根据滤波器的幅度频率响应特性，可以分为四种基本类型：低通滤波器、高通滤波器、带通滤波器和带阻滤波器。在设计方法上，一般以低通滤波器原型为基础，通过频率变换实现高通滤波器、带通滤波器和带阻滤波器的设计。而在结构形式上，主要有如下几种类型：集总元件滤波器、声表面波滤波器、螺旋滤波器、同轴滤波器、梳状线滤波器、微带滤波器、陶瓷介质滤波器和波导滤波器等<sup>[23-24]</sup>。

集总元件滤波器是一种历史最久、应用最广的低频滤波器，它的理论比较完整，结构非常简单，是设计其他类型滤波器的基础。集总元件滤波器工作频率较低，当频率高于 1 GHz 时，由于分布参数影响严重，应用受到限制<sup>[22]</sup>。声表面波滤波器具有小型化、高性能、便于批量生产、性价比高等优点，已经广泛用于射频前端和中频系统，并可满足多模、多频段移动终端需求。声表面波器件的缺点包括插入损耗较大，难于集成，高频（大于 2 GHz）下难以适应大功率<sup>[23]</sup>。螺旋滤波器可以覆盖高频到微波低端的频段。由于内导体采用螺旋慢波结构而得名，功率容量大，但是加工难度大<sup>[24-25]</sup>。同轴滤波器具有高品质因子、电磁屏蔽好、低损耗和小尺寸等优点，广泛用于通信、雷达等系统，但是在 10 GHz 以上使用时，制作精度难以达到<sup>[26-28]</sup>。梳状线滤波器体积小、品质因子适中、高端寄生通带较远。微带滤波器的尺寸小，容易加工，容易与其他微波电路集成<sup>[29-30]</sup>。陶瓷介质滤波器是用微波陶瓷介质按 TE、TM 等模式要求制成的圆环、圆柱等形状的介质滤波器。其性能优良，插损小，有较高的功率承受能力，并可与天线集成，原则上可用于很高频率，且价格低廉<sup>[31-32]</sup>。波导滤波器主要应用在通信、电子战、雷达、自动测量设备等微波设备中<sup>[33]</sup>。它易于与波导天线的馈电装置连接，适于高功率应用，具有高品质因数和低损耗特性，加工方便<sup>[34-39]</sup>。

在微波滤波器的工作机理上，可以分为交叉耦合滤波器<sup>[28]</sup>、直接耦合滤波器<sup>[13,40]</sup>、双通带（多通带）滤波器<sup>[41-44]</sup>、可调滤波器<sup>[45-48]</sup>、双模滤波器<sup>[49-53]</sup>和超宽带滤波器<sup>[54-58]</sup>等。但是这种分类没有特别严格界限，而且往往相互交叠。例如：超宽带直接耦合滤波器<sup>[30]</sup>、双模双通带滤波器<sup>[59-60]</sup>、双模超宽带滤波器<sup>[61-62]</sup>等。

### 1.2.3 发展趋势

在射频和微波技术的快速发展中，微波滤波器的主要发展趋势总结如下。

(1) 从个别应用到普遍应用。在早期，作为微波滤波器设计的基本单位，单个空腔谐振器得到广泛应用。可随着技术的发展和设备要求的提升，在微波系统中，电子设备越来越多，频谱变得极其拥挤，在这种情况下，各种结构的滤波器在通信系统中越来越受重视，应用范围变广。

(2) 设计流程由粗糙到精细，由简单到复杂。如果还使用过去对电磁场

的分析方法分析现在的微波结构、设计新的微波系统,会十分困难。于是,现在的电脑仿真软件,强大的网络综合理论对于研究、分析、设计复杂结构的滤波器具有很重要的作用。

(3)表现形式多样化、标准化、小型化。滤波器已经从极少数的几种类型朝着更加复杂、更加多样、更加标准的方向而去,体积越来越小,集成度越来越高,种类也是数不胜数。

(4)滤波器应用频段越来越高。移动通信的频段越来越高,微波通信技术的理论也越来越成熟,像红外、太赫兹的滤波技术的研发设计也已经被提上日程。

(5)与其他元件的集成越来越密切。微波滤波器已经成为微波元件中的重要元件之一,除了完成自己本身任务的同时,还会代替其他的一些元件,提供相应的功能,因为半导体技术的成熟,元器件也向着更高频率去发展,使得各种滤波器的技术也应用于各种半导体的器件中。

(6)新材料新技术的应用。材料技术的发展给微波器件的发展提供了很大的空间,铁电体、微波铁氧体、等离子体等材料的应用,极大提高了滤波器的性能。

移动技术和微波器件是“共生”关系,移动技术给微波器件提供坚实的理论技术,微波器件为移动技术提供创新活力,二者相互促进、共同发展。

### 1.3 无线通信中的微带滤波器

各种各样的滤波器用于无线通信中。本书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、功能及微型化的必要性<sup>[1,24]</sup>。

图 1.1 是一种基于频分多址-频分双工系统的移动电话射频电路方块图,是第一代移动通信中通用的射频电路系统。在图 1.1 中,接收机是双超外差系统,从天线接收到的信号经过接收端带通滤波器滤去噪声后,经过低噪声放大器放大,通过混频器进行频率转化以后,经过石英晶体带通滤波器传送到中频段。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<sup>[1]</sup>。

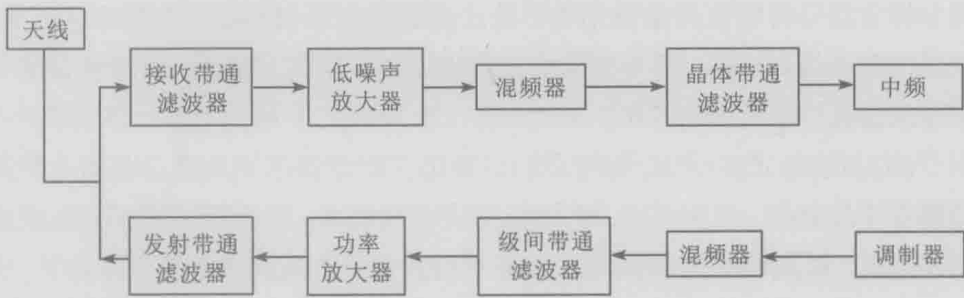


图 1.1 一种移动电话射频电路方块图

图 1.1 中发射部分采用上变频系统处理中频信号。通过发射端带通滤波器滤除变频器输出的信号中各种各样的无用信号，最后以电磁波的形式从天线发射信号。

由此可见，滤波器是重要的无线通信设备，在射频电路中输入输出各级之间普遍存在，每一个滤波器都有不同的功能和特性要求。接收端带通滤波器的功能是避免接收器前端饱和，除去如镜频一类的干扰信号，减小来自天线端的本地振荡器的功率泄漏。所以接收端带通滤波器的最佳性能包括高衰减特性，同时减少带通插损。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边沿衰减、好的群时延等特点，以及作为窄带滤波器，具备良好的温度稳定性<sup>[1]</sup>。发射端带通滤波器的基本功能是减少杂散辐射功率，这些无用信号的主要成分包括发射信号频率的二、三次谐波和本地振荡。另一个很重要的功能是衰减掉接收频率段内的噪声，抑制其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，同时能维持低的通带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，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轻巧，因此对于射频电路的微型化有很大的需求。较低频段的中频和基带电路采用数字大规模集成电路，这些电路的微型化会随着半导体技术的发展而进步。在射频部分，虽然单片微波集成电路的出现使得射频有源电路如调制器、放大器、频率转换器的微型化变得越来越有可能<sup>[1]</sup>，但是对射频滤波器和振荡器等器件中的谐振器电路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研究方向。并且很有可能在电路理论、材料、精密工艺技术、精确的设计方法等方面开创新的前沿。