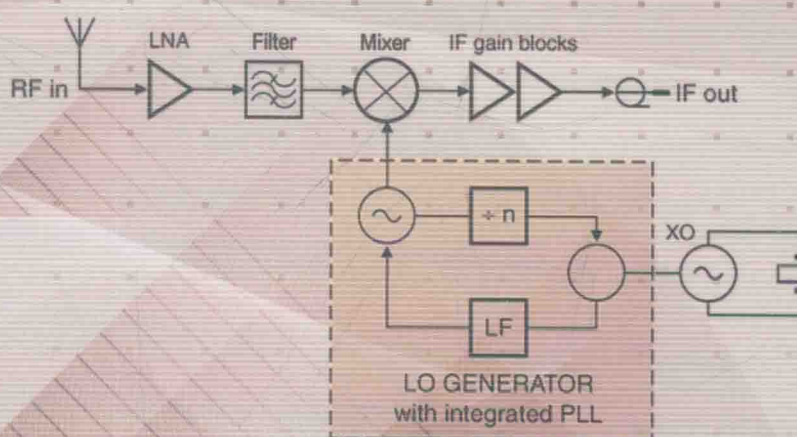


现代无线系统 射频微波平面电路

*Radio Frequency Microwave Planar Circuits
for Modern Wireless Systems*

陈 会 著



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

现代无线系统射频微波平面电路

陈 会 著

電子工業出版社·

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书以作者近年来在射频微波平面电路领域的研究成果为主线,详细论述了广泛应用于现代无线系统中的新型高性能、小型化射频微波电路与器件。在简单介绍了现代无线系统基本原理、组成结构、现代平面电路发展现状和平面传输线基本结构与理论之后,作者重点讨论和介绍了各种新型射频微波电路。本书主要涉及到平面带通、带阻和高通多模谐振器与滤波器,基于新型微带/共面波导和微带/槽线等综合传输线结构的高性能小型化双金属平面滤波器,以及平面功分器与功率放大器等内容。这些内容大部分是作者科研工作的总结和进一步完善,因此,不仅有一定的理论深度,而且也具有一定的工程应用价值。

本书适合从事电磁场理论和微波技术专业的高校师生阅读,同时也可供从事通信、雷达和遥感遥测等电子信息领域的科研和工程技术人员参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

现代无线系统射频微波平面电路 / 陈会著. —北京:电子工业出版社, 2016.12

ISBN 978-7-121-30176-6

I. ①现… II. ①陈… III. ①射频电路-微波电路-研究 IV. ①TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 254838 号

责任编辑:刘海艳

印 刷:涿州市京南印刷厂

装 订:涿州市京南印刷厂

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本:787×1092 1/16 印张:15.75 字数:413.3 千字

版 次:2016 年 12 月第 1 版

印 次:2016 年 12 月第 1 次印刷

印 数:1 500 册 定价:68.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010) 88254888, 88258888。

质量投诉请发邮件至 zlt@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式: lhy@phei.com.cn。

前 言

本书主要介绍和讨论基于单层介质基片的新型低成本小型化和高性能射频与微波平面电路。其中，单层基片的单面/共面和双面电路是本书讨论的重点内容，并提前在此做一个约定：如果没有特别说明，本书所指的电路都是基于单层介质基片，因此，本书研究内容主要涉及单面和双面电路。

在电路理论中，我们知道理想的电阻是个恒定值，与频率等参数无关。电路的阻抗和导纳等特性仅与集总元件 LC 的频率特性相关。但是，到了射频和微波频段，情况变得完全不同了。严格来讲，任何电路都与频率相关，也就是说，电路特性具有频率相关性。射频 (RF, Radio Frequency)，即无线电频率，通常的频率范围是 30MHz~4GHz。而微波频段通常所指的频率范围是 300MHz~300GHz，包括了毫米波频段。因此，射频与微波的低频段之间有一定的重叠，这也成为了行业内的惯用分类方法。本书涉及的内容主要集中在射频的高端 (300MHz~3GHz) 至微波的中低频端 (40GHz 以下) 之间的范围内。为了能够比较全面地表述本书的研究内容，用“射频微波”两个频率范围来界定是比较准确和科学的。

截至目前，国内外介绍射频和微波电路理论及应用的专著及教材有很多，它们各有侧重点且各有特色。本书是作者站在国内外同行的肩膀上并结合自身的科研与教学实践提炼出来的，既有继承又有发展，更有一定的创新。通常，由微带、CPW 以及槽线等传输线构成的平面电路因其小尺寸、低成本以及易集成等优点获得了广泛应用。但是，随着现代无线通信及雷达等电子系统的快速发展，这些传统的平面电路已经面临很大的问题：性能指标难以进一步提升，体积和重量难以进一步减小，电路的集成度也难以进一步提高。因此，新型高性能平面电路的研究受到了广大科研工作者的重视。其中，多线多路径的平面耦合、微带-CPW、微带-槽线、微带-DGS 等混合耦合结构得到了广泛研究，并取得了一定的成果。本书很大一部分内容正是基于这些新型复合结构展开的。

本书体系结构和主要内容安排如下：第 1 章，简单介绍现代无线系统与技术以及各种新型传输线构成的现代平面电路；第 2 章，主要介绍了各种平面传输线的基本结构和理论，涉及单面单导体传输线、多导体耦合传输线以及双面复合传输线等新型结构。这些传输线及其设计方程或等效电路模型，为后续章节深入讨论各种高性能的平面电路奠定了理论基础；第 3 章，重点介绍多模谐振器和滤波器，涉及多模谐振的基本概念、产生机理及其小型化多模谐振器滤波器应用；第 4 章，主要介绍双金属平面滤波电路，包括微带-CPW 低通滤波器以及超宽带滤波器、微带/槽线杂散抑制带通滤波器、带阻滤波器以及超宽带滤波器等内容；第 5 章，主要讨论了微带功分器和功率放大器，涉及 X 波段微带八路功分器的设计与实现以及 X 波段三级级联功率放大器的设计与实现；第 6 章，主要是对平面传输线及其电路实现的现状进行总结，并对其发展趋势进行了展望。

本书以作者近年来以平面传输线的研究工作为基础，主要介绍和讨论了单层介质基片的单面和双面传输线基本理论及其在射频微波平面电路中的应用等有关内容。由于新型电路层

出不穷、日新月异，要想完全覆盖所有的技术和电路是不可能的。本书的目的意在向广大读者和同行介绍这类技术和方法，只能是抛砖引玉，有兴趣的读者可以深入研究。由于书中内容大多涉及作者近年来开展的研究，因此对其中理论问题的介绍能给出思路及方法的细节，对射频微波电路与器件的研制也能给出其设计过程、具体结果、技术指标及实物照片等。这样安排全书内容，其目的是为了广大读者和技术同行在工程应用或开展进一步研究时参考。另外，本专著注重新型实用电路技术的引入与讨论，以拓展读者的学术视野。

本书论述的平面传输线电路涉及很多 PCB 加工、制作与实际测量等大量烦琐的内容，这些工作大部分是在成都赛英科技有限责任公司相关领导和技术人员的支持和帮助下完成的。因此，作者特别感谢成都赛英科技有限责任公司董事长、法人、原电子科技大学电路与系统学科学术带头人、学科组组长张玉兴教授。同时，一并感谢成都赛英有限责任公司的王伟、谭琪、姚宗诚、吴义华、赵宏飞等技术同行和专家对作者教学和科研工作的一贯支持和帮助。

由于目前市面上关于新型平面传输线（特别是双面复合传输线）在射频微波电路应用方面的专著还比较少，因此，本专著的出版也是对该领域理论和技术方面的又一补充，并希望它能对平面传输线的深入研究及应用起到“抛砖引玉”的作用。本专著的主要内容是作者最近几年来的最新研究成果，以独特视角和研究方法对平面传输线在射频/微波电路领域的应用展开讨论。其中，部分研究项目受到中国博士后基金和总装预研基金等机构的支持，在此一并表示感谢。另外，书中引用了一些相关著作、文献和图片，在此也对其原作者表示诚挚的谢意。限于成书时间以及作者的研究水平，书中不妥之处敬请广大读者和同行批评与斧正。

作者
电子科技大学
2016 年 9 月

目 录

第 1 章 现代无线系统与平面电路	1
1.1 引言	2
1.2 现代无线系统与技术概述	3
1.2.1 GSM 系统与原理	3
1.2.2 脉冲雷达系统与工作机理	5
1.3 现代平面电路概述	6
1.3.1 基于微带-共面波导双面结构的超宽带滤波器	7
1.3.2 基于微带-槽线双面结构的微波滤波器	11
1.3.3 基于微带-DGS 双面结构的双模发射机	12
1.3.4 基于微带-槽线的双面功分器	14
1.3.5 SIW 双面传输线与电路	15
1.3.6 双面平行传输线与电路	16
1.3.7 平衡(差分)传输线与电路	17
1.4 主要内容及安排	18
参考文献	19
第 2 章 平面传输线基本结构与理论	23
2.1 单面传输线结构	24
2.1.1 单导体传输线	24
2.1.2 多导体传输线	30
2.2 双面传输线耦合结构	34
2.2.1 微带-CPW 双面耦合传输线	35
2.2.2 微带-槽线双面耦合传输线	35
2.2.3 宽边耦合悬置微带线	35
2.3 传输线耦合理论	37
2.3.1 微带对称双导体耦合理论	37
2.3.2 微带不对称双导体耦合理论	38
2.3.3 微带对称三线耦合理论	45
2.3.4 DGS 通用电路模型	50
2.3.5 DMS 的建模与分析	56
2.4 小结	60
参考文献	60
第 3 章 多模谐振器与滤波电路	64
3.1 引言	65



3.2	多模谐振器理论	66
3.2.1	简并双模谐振器理论	67
3.2.2	非简并双模谐振器理论	71
3.2.3	多模谐振器理论	74
3.3	低损宽带高选择性的双模带通滤波器	77
3.3.1	三角形贴片谐振器的电磁场理论	77
3.3.2	正交开路支节加载的直角三角形双模贴片谐振器	80
3.3.3	修正的缺微双带隙谐振器	81
3.3.4	双模谐振滤波器的仿真与测量	84
3.3.5	结论	84
3.4	低损耗耦合线三模超宽带带通滤波器	85
3.4.1	耦合线三模谐振器	85
3.4.2	超宽带的三模谐振器滤波器	87
3.4.3	超宽带滤波器的仿真与测量结果	88
3.4.4	结论	89
3.5	高选择性三模三频带通滤波器	89
3.5.1	引言	89
3.5.2	三模谐振器	90
3.5.3	基于三模谐振器的三频滤波器	91
3.5.4	三频滤波器的仿真与测量结果	92
3.5.5	结论	92
3.6	高选择性椭圆函数响应的四模四频带通滤波器	93
3.6.1	引言	93
3.6.2	微带-槽线复合耦合的四模谐振器	93
3.6.3	基于四模谐振器的四频带通滤波器	97
3.6.4	四频滤波器的仿真与测量结果	98
3.6.5	结论	99
3.7	谐波抑制的宽阻带椭圆函数带通滤波器	99
3.7.1	引言	99
3.7.2	双模谐振器及其滤波器的分析与设计	100
3.7.3	双模宽带滤波器的仿真与测量	103
3.7.4	双模滤波器的小型化设计	103
3.7.5	结论	105
3.8	多模带阻滤波器	105
3.8.1	引言	106
3.8.2	单贴片双模带阻滤波器	106
3.8.3	双贴片双模带阻滤波器	110
3.9	低通-带通双模双频滤波器	110
3.9.1	引言	111



3.9.2	基本概念	111
3.9.3	附加传输零点的 LP-BPF	114
3.9.4	实验结果	115
3.10	微带-DGS 双模高通滤波器	116
3.10.1	引言	116
3.10.2	DGS 双模谐振器	117
3.10.3	双模高通滤波器	119
3.10.4	结论	121
3.11	微带-CPW 双模高通滤波器	121
3.11.1	非均匀 CPW 双模谐振器	121
3.11.2	双模高通滤波器	124
3.11.3	结论	126
3.12	小结	127
	参考文献	127
第 4 章	高性能双金属平面滤波电路	132
4.1	微带-CPW 低通滤波器	133
4.1.1	微带-CPW 槽线加载的 SI-LPF	133
4.1.2	微带-CPW 高选择性椭圆 LPF	135
4.2	微带-槽线杂散抑制带通滤波器	147
4.3	微带-槽线(超)宽带滤波器	149
4.3.1	微带-槽线 WB 滤波器	149
4.3.2	微带-槽线 UWB 滤波器	152
4.4	微带-CPW 超宽带滤波器	153
4.4.1	CPW-MMR 超宽带滤波器	154
4.4.2	微带-CPW 带外抑制超宽带滤波器	157
4.4.3	非均匀 CPW 带外抑制 UWB 滤波器	167
4.5	双面耦合带阻滤波器	170
4.5.1	微带-SGS 带阻滤波器	170
4.5.2	折叠微带-CPW 带阻滤波器	174
4.6	基片集成波导滤波器	178
4.6.1	基片集成腔体	178
4.6.2	SIW 滤波器	179
4.7	微带-CPW 双频宽带滤波器	180
4.7.1	引言	180
4.7.2	双频宽带滤波器的分析与设计	182
4.7.3	实验与分析	189
4.7.4	结论	190
4.8	极窄带陷的超宽带滤波器	191
4.9	微带-开环槽双频滤波器	194



4.9.1	引言	195
4.9.2	双频段带通滤波器的分析与设计	195
4.9.3	双频滤波器的仿真与测量结果	197
4.9.4	结论	198
4.10	小结	198
	参考文献	199
第 5 章	平面功分器与功率放大器	207
5.1	功分器/合成器概述	208
5.1.1	合成概念的演变	208
5.1.2	合成的基本原理	208
5.1.3	合成的网络特性	209
5.2	微带耦合线两路和三路功分器	212
5.2.1	基于折叠耦合双线结构的“两路”功分器	213
5.2.2	基于对称三线耦合结构的“三路”功分器	217
5.3	X 波段微带八路功分器	220
5.3.1	Wilkinson 功分器的基本理论	220
5.3.2	微带八路功分器的设计与实现	221
5.4	X 波段功率放大器	227
5.4.1	偏置电路概论	227
5.4.2	X 波段功率放大器的设计	230
5.4.3	X 波段功率放大器的实现	233
5.5	小结	236
	参考文献	236
第 6 章	结论与展望	239
	参考文献	242

现代无线系统与平面电路

众所周知,现代无线系统(如通信、雷达和遥感遥测等)是由若干电路模块构成的,包括基带信号处理单元、射频前端收发模块和天线等基本单元。通常,这些基本单元电路或模块是组成无线系统的重要部分,其性能的好坏、成本的高低以及工作的可靠性等对系统的应用和推广起到重要的决定作用。反过来,无线系统也会对各个子电路或模块提出这样或那样的限制和要求。因此,在现代无线应用领域,电路和系统之间的联系可以用“树木和森林”之间的关系来描述,如图 1.1 所示。其中,图 1.1 (a) 阐述的是一棵小树与一个基本电路(如一个滤波器)之间的映射/对应关系;而图 1.1 (b) 描述的则是一片森林与一个无线系统之间的对应/映射关系。需要指出的是,在实际的无线系统应用中,以软件支持的硬件平台搭建的各个子系统或功能模块是非常重要的电子部件,图 1.1 (b) 中所示的 60GHz 高速无线局域网(WLAN)发射机实物,它能够实现高达 2.8Gbps 的传输速率^[1]。

仿生学是一门研究生物外形和功能等应用的科学,它是 20 世纪 60 年代出现的一门新型边缘学科,并已经在很多领域取得了丰硕的成果^[2]。该门学科的研究对象是生物体的结构、功能和工作原理,并将这些原理移植到人造工程技术之中,用以发明和创造新技术。该学科的问世,为人类开辟了独特的制造技术发展道路——向生物界索取灵感的道路,大大开阔了人类的技术眼界,显示了巨大的发展潜力,是人类智慧的结晶。自仿生学诞生以来,人类开发的各种应用实例非常之多,例如,(1)模仿苍蝇的楫翅(又叫平衡棒——“天然导航仪”)制成了“振动陀螺仪”,这种仪器已经应用在火箭和高速飞机上实现了自动驾驶;(2)蛋壳与薄壳建筑;(3)北京奥运村的“鸟巢”体育馆;(4)利用青蛙的眼睛发明的电子蛙眼;等等。这样成功应用的仿生学实例实在太多,不胜枚举。尽管如此,但仿生学应用于现代电子系统特别是无线系统和电路领域则相对较少,我们能够例举的几个应用无外乎是:(1)类似于蝙蝠超声波探测目标的现代雷达系统;(2)“马蜂窝”与现代无线蜂窝通信系统;等等。因此,仿生学应用于现代无线系统的潜力还非常巨大,应用空间非常广阔。所以,开展这方面的研究是非常紧迫和必要的。图 1.1 给出的“树木森林”与“电路系统”的映射关系则是仿生学在现代无线系统中基本概念的又一次升华和推广。

尽管仿生学应用于现代无线系统的前景非常诱人,但本专著仅仅局限于讨论和研究无线应用背景下的射频微波平面电路,主要包括滤波器、放大器以及功分与合成电路等方面的内容。

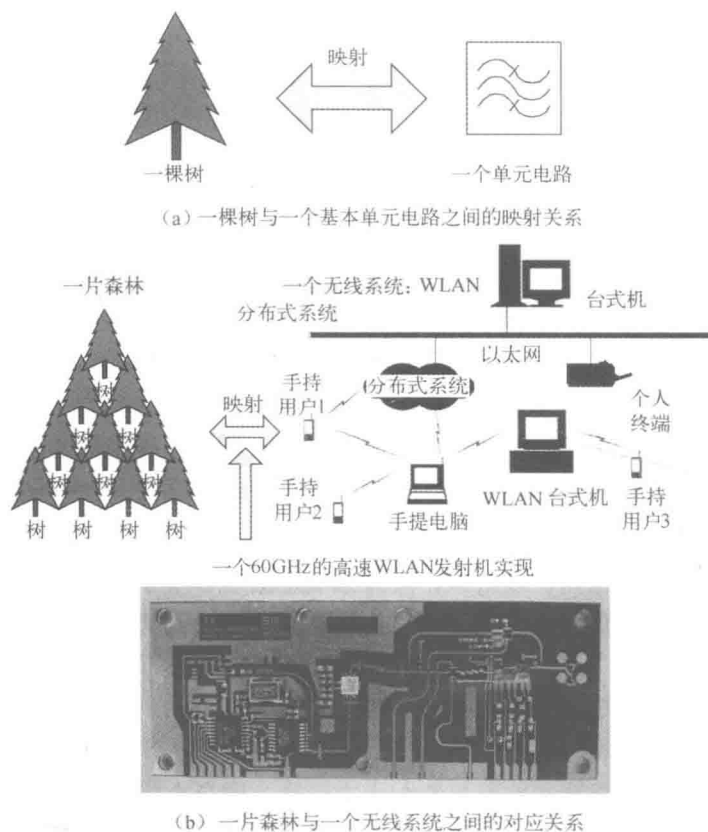


图 1.1 仿生学在现代无线系统中的概念应用和推广

1.1 引言

大家知道,平面电子电路(包括单基板“单面电路”和“双面电路”)是利用低成本和易实现的常规印制电路板(PCB)技术制造的器件,例如平面滤波器。这些电路或模块是构成射频/微波电路与系统的重要部件,其指标的好坏直接关系到系统性能与稳定。同时,不断更新的雷达以及无线通信系统对滤波器等电子部件的设计提出了前所未有的挑战:更高的性能指标、更小的尺寸、更轻的重量和更低的制造成本已成为新型平面电路必须满足的基本要求。近年来,各种新材料、新结构和新技术不断涌现,例如,高温超导(HTS)材料和左手媒质(LHM)、基片集成波导(SIW)结构、低温共烧陶瓷(LTCC)和微机械加工(MEMS)技术等,在射频与微波领域得到了广泛应用。同时,各种功能强大的全波电磁场仿真综合软件不断更新,使得各种新型高性能的射频与微波电路不断涌现^[3~43]。另外,随着频谱资源的高端开发,各种分布式射频/微波传输线特别是耦合传输线结构在实现高频信号或能量的传输以及构建射频/微波电路等方面起到越来越重要的作用。

近几年来,耦合传输线结构特别是基于双面布线的微带与共面波导(CPW)、微带与槽线以及微带与缺地结构(DGS)等新型复合传输线结构,受到国内外研究人员的广泛

关注^[6~27, 32~43]。由于这类双面复合结构具有比传统的单面单一耦合结构更好的频率特性, 因此, 基于该类新型耦合结构的双面电路表现出更好的电气性能, 尤其是滤波器, 它包括更低的带内插损、更高的回波损耗, 更宽、更深的带外衰减和抑制, 以及通带到阻带有更陡峭的过渡, 从而表现出更好的频率选择特性。同时, 由于该类新型复合结构是通过双面微波集成电路 (MIC) 来实现的, 采用的仍然是常规传输线及其制作工艺, 因而相对于高温超导 (HTS) 材料、低温共烧陶瓷 (LTCC) 和微机械加工 (MEMS) 技术等来讲, 在获得良好性能的同时还将大幅度地降低平面电路的设计和制造成本。

介于单基板的单面和双面射频前端电路在现代无线系统中具有重要地位和作用, 因此, 新型平面电路特别是混合集成电路的研究一直是人们关注的热点, 并取得了不菲的成果。本专著根据作者多年来对平面电路的潜心研究^[14, 15, 19~31], 并参考了业界同行的部分优秀成果撰写而成。下面分别介绍一下现代无线系统和平面电路的发展现状。

1.2 现代无线系统与技术概述

现代无线系统包括的内容相当丰富, 例如无线通信、雷达、射频识别 (RFID)、遥感遥测等。图 1.2 给出了一些涉及现代无线系统的实际应用产品^[4], 包括微波接入的全球互操作 (WiMax) 卡、手机、个人媒体播放器、全球定位系统 (GPS)、基站、卫星和军用无线电等。对于现代无线通信而言, 包括了当今主流的 3G 以及未来的 4G 通信、蓝牙、无线宽带或超宽带等技术。无线通信技术发展的总趋势大致是宽带化、个性化和多网融合等。关于无线技术与系统这方面的内容读者可以查找到很多资料, 限于篇幅这里就不再逐一展开讨论, 仅对常用的 GSM (全球移动系统) 通信系统和脉冲雷达系统进行简单介绍。



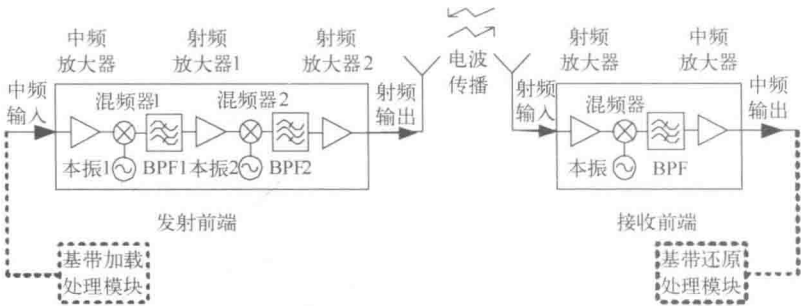
图 1.2 无线产品应用实例

1.2.1 GSM 系统与原理

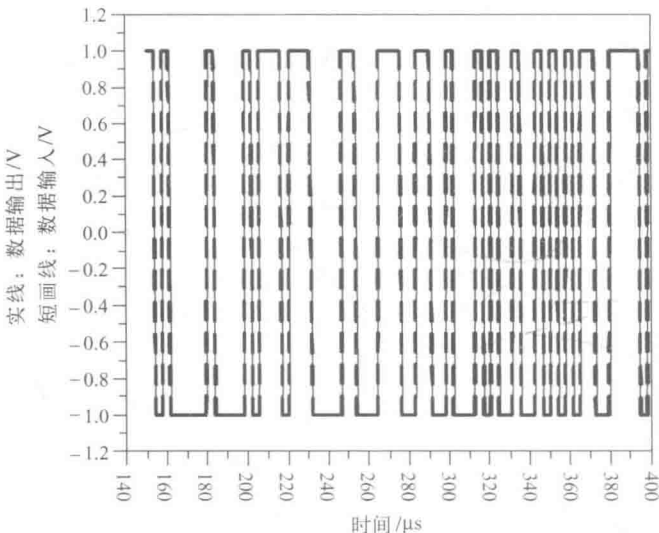
图 1.3 给出了 GSM 系统的功能框图和各级模块电路处理后的重要波形^[44, 45]。在图 1.3 (a) 中, 语音或文本等原始信息 (见图 1.3 (b) 中短画线) 通过基带加载处理模块后, 调制到

45MHz 的中频载波上，其频谱分布如图 1.3（c）所示，然后输送到发射前端模块进行射频处理。发射前端模块的第一射频滤波器 BPF1 的中心频率为 545MHz，第二射频滤波器 BPF2 的中心频率为 1900MHz；第一本振 1 的中心频率为 500MHz，而第二本振 2 的中心频率为 1355MHz；输入中频的中心频率为 45MHz。因此，当中频载波为 45MHz 的已调制信号经过中频放大器放大之后，由第一混频器 1 与本振 1 的信号上混频之后将中频信号搬移到载波频率为 545MHz 的信号，再送到 BPF1 进行滤波。放大后的射频信号通过第二次混频后，向上频谱搬移到 1900MHz 的载波频率，然后再由 BPF2 滤波，并通过射频功率放大器 2 进行功率放大，最后由发射天线辐射到自由空间进行无线电传播。

接收前端模块本振频率为 1830MHz，中频滤波器 BPF 的中心频率为 70MHz。接收天线将载波频率为 1900MHz 的射频信号输入低噪声放大器进行放大，再经下混频器与本振频率进行频谱的向下搬移，得到中频载波为 70MHz 信号，其频谱分布如图 1.3（d）所示。最后送到基带处理单元进行解调，以恢复原始的语音或文本信息，如图 1.3（b）中实线所示。

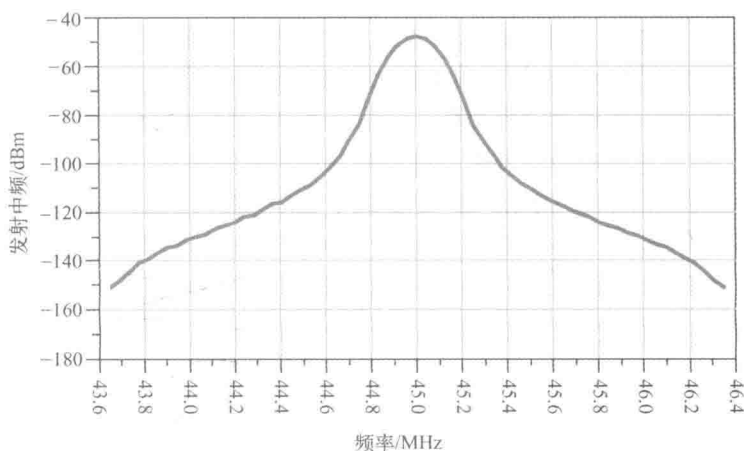


(a) GSM无线系统功能框图

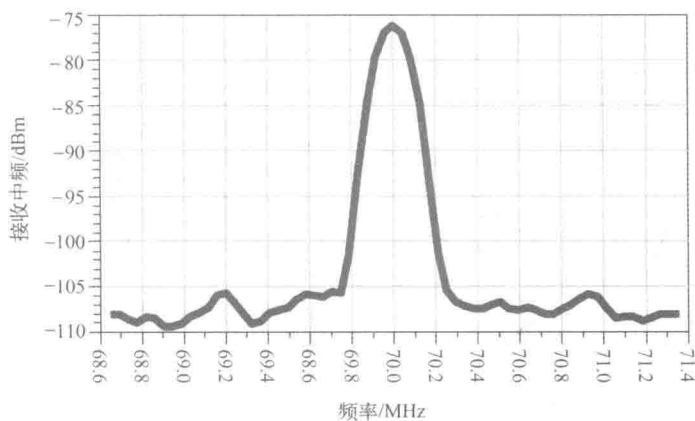


(b) 输入和输出数据波形

图 1.3 GSM 无线系统与波形处理



(c) 发射机中频输入信号



(d) 接收机输出中频信号

图 1.3 GSM 无线系统与波形处理 (续)

1.2.2 脉冲雷达系统与工作机理

典型脉冲雷达的工作机理是：通过测量脉冲微波信号的往返时间来确定目标的距离。图 1.4 (a) 是典型脉冲雷达系统的方框图，发射部分由一个单边带混频器组成，该器件的功能是通过载波频率 f_0 实现对中频 f_{IF} 的频谱搬移，其上混频后的输出频率为 $f_0 + f_{IF}$ ，然后由功率放大器进行放大，再通过天线辐射出去。收/发开关由脉冲发生器控制，该发生器能够产生一个发射脉冲：脉宽为 τ ，脉冲重复频率 (PRF) 为 $f_r = 1/T_r$ 。因此，发射脉冲由一个工作频率为 $f_0 + f_{IF}$ 的短时突发的微波信号组成。通常，典型的脉冲持续时间在 50ns~100ms 变化。一般，更短的脉冲将会产生更好的距离分辨率，但更长的脉冲在通过接收机处理之后将得到更好的信噪比 (SNR)。一般情况下，典型的脉冲重复频率在 100Hz~100kHz 变化，而更高的 PRF 将在每单位时间内会得到更多的返回脉冲数，这将有助于改进雷达整机性能。但是，当 $R > cT_r/2$ 时，较低的 PRF 有利于避免出现距离模糊。

在接收模式，返回信号被放大，并与频率为 f_0 的本振信号下混频产生所需的中频信号。本振既用于发射机模式的上变频，也用于接收机模式的下变频，这种一次性超外差结构不仅

简化了系统结构而且也避免了频率漂移的问题。如果使用收发不同的振荡器，则应该考虑频率的问题。中频信号被放大、检测，并被反馈到音频放大器/显示器。搜索雷达通常使用连续旋转天线以便进行 360° 的方位角覆盖。此时，显示装置将给出目标距离随角度变化的极坐标曲线。通常，现代雷达利用计算机处理检测到的信号和显示目标信息。

脉冲雷达中的发射/接收 (T/R) 开关实际上执行两种功能：一是，形成发射脉冲序列，如图 1.4 (b) 所示；二是，在收发机之间切换天线，后一种功能又被称为双工器。原理上，双工器能够利用一个环形器来实现，但为了在收发机之间提供高度隔离（大约 80~100dB）以避免发射机泄漏到接收机，这种泄露将淹没回波信号（或可能毁坏接收机）。由于环形器能够提供的典型隔离度仅仅为 20~30dB，因此，需要一些具有高度隔离的开关。如有必要，可以通过沿发射机方向的电路路径增设附加的开关以进一步改善隔离度。

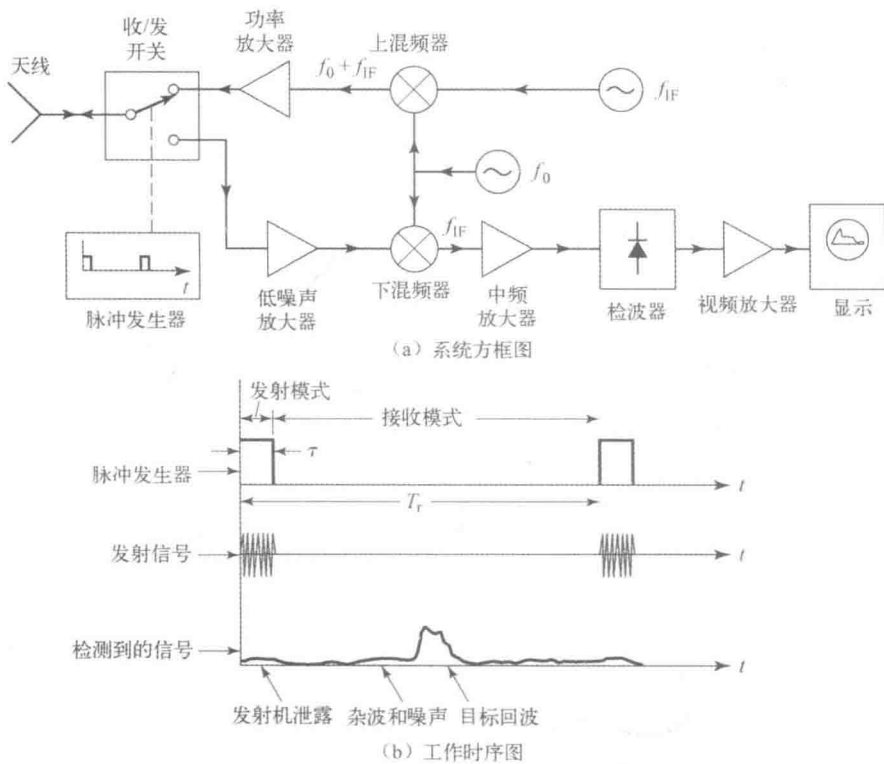


图 1.4 现代脉冲雷达原理及其工作时序

1.3 现代平面电路概述

近年来，随着工艺水平的不断提高以及分析与设计手段的不断进步，除了传统的单层金属平面（简称“单面”）电路继续得到改进和完善之外，还涌现出一些基于复合传输线耦合结构的新型微波电路与器件，特别是高性能滤波器。这里，就最近和最新的主要研究成果进

行简要介绍。

理论上讲,单面可以是无限大的,因此,其上的电路布局也可以是无限多的,如图 1.5 (a) 所示。但是,在工程实践中因受到各种实际因素的限制,例如,尺寸和重量等条件的制约,实际的电路 PCB 布线是在有限的区域内完成的,如图 1.5 (b) 所示。为了提高 PCB 电路布线的利用率,可能的途径是:(1) 增加电路布线的密度,但随之而来的问题是电磁干扰,因此,必须进行电磁兼容设计;(2) 增加布线的层数,即利用多层金属平面(简称“多面”)来解决电路布线的几何空间受限问题,但随之而来的是增加了设计复杂度、制造难度和生产成本。在多面电路设计中,双层金属平面(简称“双面”)因其采用的仍然是传统的单基板 PCB 工艺,所以在增加了电路布线密度的同时,设计和实现并不复杂,同时,生产成本也不会增加多少。因此,单基板双面 PCB 布线技术在现代射频微波平面电路设计中仍然占有很重要的地位,并将进一步发展和完善。

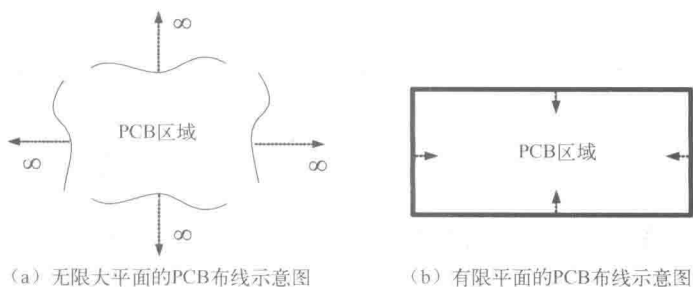


图 1.5 常规 PCB 平面布线结构

单面布线的 PCB 电路已经非常成熟,并且有很多成果可以展示,但限于篇幅,本书不再赘述,感兴趣的读者请参阅本章末的相关文献。

▶▶▶ 1.3.1 基于微带-共面波导双面结构的超宽带滤波器

微带线技术的成熟以及共面波导(CPW)传输线的诸多优点,使得人们开始把研究兴趣投向微带-共面波导混合结构的研究上,并在超宽带滤波器的应用方面取得了重大进展。

2004 年, L. Zhu 等人^[6]提出了具有频率相关特性的微带-共面波导新型宽频带过渡结构,如图 1.6 所示。图 1.6 中,顶部微带与底部对应的共面波导结构通过中间的介质材料进行宽边电磁耦合,从而获得关于该类过渡结构的宽带频率特性。作者通过建立该复合结构的全波矩量法(MoM)物理模型及其等效电路来进行理论分析,同时,还通过自校准物理模型以及相应的数值计算,阐明了在各种带线/槽尺寸下过渡结构的频率响应,并进一步揭示了该结构的低损耗和超宽带过渡特性(在 3.2~11.2GHz,该过渡结构的回波损耗优于 10dB)。

2005 年, H. Wang 等人^[7,8]提出了基于图 1.6 所示耦合结构的超宽带滤波器。作者首先通过构造共面波导多模谐振器获得了超宽带滤波器在低频、中频和高端的三个谐振模式,然后构建类似于图 1.6 所示的过渡结构,并通过电磁建模与仿真使滤波器中心频点附近的耦合达到最强,最后作者获得了一个五极点的超宽带滤波器并覆盖了整个超宽带频率范围(3.1~10.6GHz), S 参数及其群延时测量结果如图 1.7 所示。

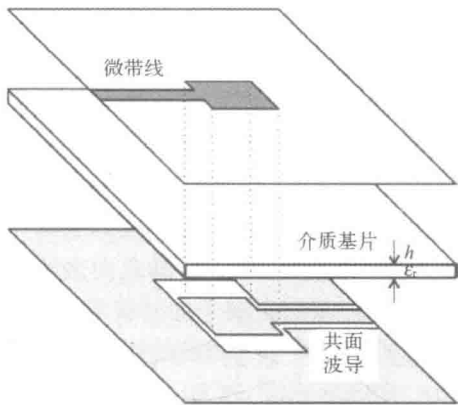


图 1.6 微带-共面波导电磁耦合的过渡结构 (3D 视图)

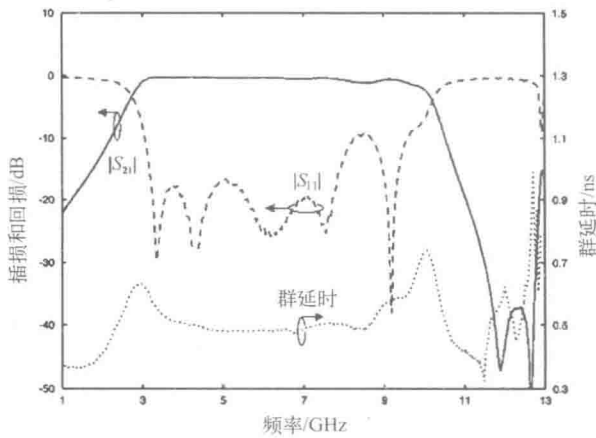


图 1.7 L. Zhu 等人提出的超宽带滤波器 S 参数及其群延时测量结果

2005 年, K. Li 等人^[9]提出了基于宽边耦合的微带-共面波导超宽带滤波器。该滤波器由耦合到共面波导开路谐振器的微带线组成, 而共面波导构建在微带线的接地层。构造的滤波器显示了超宽带特性: 10dB 带宽覆盖了 3.0~10.63GHz 的宽频率范围。作者设计的三级级联滤波器在中心频率附近的最小插损大约为 0.32dB, 带内群延时大部分集中在 0.42ns 附近, 其 S 参数和群延时测量结果如图 1.8 所示。

2006 年, T. N. Kuo 等人^[10]提出了基于微带-共面波导综合耦合结构的新型紧凑超宽带带通滤波器。文中紧凑的超宽带滤波器采用高通滤波器原型和过渡延伸支节分别构建低阻带和高阻带。特别地, 作者提出了一个新型微带-共面波导综合结构, 并由此实现了集总高通滤波器原型, 而该原型是设计超宽带滤波器的关键。最后, 作者获得了一个五极点的超宽带滤波器, 其 S 参数与群延时的仿真与测量结果如图 1.9 所示。同时, 由于采用了准集总元件, 因此设计得到的滤波器表现出慢波特性, 而且结构比先前报道的宽带滤波器更为紧凑。