

高等工科院校电子、信息类教材

# 微波固态电路

Microwave Solid State Circuit

薛正辉 杨仕明 李伟明 任武 编

 北京理工大学出版社  
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

# 微波固态电路

薛正辉 杨仕明 编  
李伟明 任 武

 北京理工大学出版社  
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

版权专有 侵权必究

---

**图书在版编目(CIP)数据**

微波固态电路/薛正辉等编. —北京:北京理工大学出版社,  
2004. 4

高等工科院校电子、信息类教材

ISBN 7 - 5640 - 0225 - 5

I. 微… II. 薛… III. 微波电路:固态电路-高等学校-教材  
IV. TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 005533 号

---

出版发行 / 北京理工大学出版社

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010)68914775(办公室) 68912824(发行部)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

电子邮箱 / [chiefedit@bitpress.com.cn](mailto:chiefedit@bitpress.com.cn)

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 北京国马印刷厂

开 本 / 787 毫米 × 1092 毫米 1/16

印 张 / 20.75

字 数 / 490 千字

版 次 / 2004 年 4 月第 1 版 2004 年 4 月第 1 次印刷

印 数 / 1 ~ 5000 册

责任校对 / 陈玉梅

定 价 / 29.00 元

责任印制 / 李绍英

---

图书出现印装质量问题,本社负责调换

# 前 言

本书是为信息技术、通信、雷达、电子对抗、电子科学与技术 and 遥感遥测等专业的工科高年级本科生编写的教材，供微波电子电路、微波有源电路和微波固态电路课程使用。

本书的参考学时为 64 学时，其主要内容是介绍微波电子电路中主要无源元器件、有源元器件以及它们组成的各种功能电路的基本原理、基本结构、基本功能和基本分析方法。无源元器件部分以微带类型为主，有源元器件仅介绍半导体（即“固态”）器件，电路以微带类型的混合集成电路为主。考虑到微波无源和半导体元器件在各种功能电路中的多种用途，本书首先单独介绍了这部分内容；随后各章中按照核心元件的类型分别介绍了各种主要的功能部件。全书共分为 7 章，第 1 章介绍微波电路中常用的微带无源元件。第 2 至第 6 章是本书的主要部分，分别介绍微波半导体元器件、微波频率变换器、微波放大器、微波振荡器以及微波控制电路，内容上均注意了与前修课程知识的衔接。第 7 章简单介绍了作为当前迅速发展的新一代微波电路的微波集成电路（MIC）和微波单片集成电路（MMIC）的基本知识。各部件基本按照工作原理、指标体系与基本分析、电路结构等的的内容顺序排列，在条件适合的章节，本书采用了一些微波 CAD 手段得出了分析结果（如微波无源元件部分采用了 MW-Office 工具），同时综合了当前微波器件和电路的发展，引入了一些新内容和分析方法。第 1 章至第 6 章后还附有习题可供选用。

根据编者多年来讲授本课程的认识与体会，考虑到本书涉及的知识面较广，数学手段与工具要求较高，同时本科生教学目的定位具有自己的特点，以及教学学时有限，本书力求在能覆盖微波电子电路各方面问题的基础上，突出对物理概念、工作原理和结论的介绍，而尽量简化繁复的理论分析与数学推导过程。在内容取舍上也贯彻了以介绍基础知识和必备手段为中心的原则，不求大求全，以用作教科书为主、技术参考书和工程手册为辅。因此，本书侧重介绍性内容，着重“分析”，基本没有涉及“综合与设计”，其目的仅是使学生在微波电子电路方面的研究和开发上具有一个比较扎实的基础，故仅依靠本书的内容还远不能完全掌握微波电子电路的知识和手段。当然，这种思路与尝试在本书中的实现程度和效果还有待教学实践去检验。

本书是在编者多年讲授本课程所用讲稿的基础上整理、补充、完善而成的。在此之前的讲稿和本书的编写过程中，编者参阅和引用了多本统编教材及各高校教材，如吴万春教授的《集成固体微波电路》，黄香馥、陈天麟、张开智教授的《微波固体电路》，赵国湘、高葆新教授的《微波有源电路》，言华教授的《微波固态电路》，邓绍范教授的《微波电子线路》，王蕴仪教授的《微波器件与电路》等。它们都是本学科卓有声誉和成果的前辈专家、教授集合多年教学和科研实践的结晶之作，因此这些专著和教材理论基础扎实，讲述循序渐进、由浅入深，逻辑清晰、前后呼应、例证丰富，具有很高的水平。在此，编者要对他们表示由衷的感谢，正是站在了这些前辈的肩膀上，我们才得以把视野放远，才能不断进步。

在本书编写过程中，得到了北京理工大学信息科学技术学院、电子工程系及电磁场与微波技术教研室领导和老师的热情指导、积极支持和帮助，在此，编者一并表示感谢。

清华大学电子工程系高葆新教授对全书作了十分认真、细致的审阅，提出了许多重要、宝贵的修改意见，编者谨此表示衷心感谢。

由于编者的水平有限，编写时间较紧，书中难免还存在错漏和不足之处，殷切希望广大读者批评指正。

编 者  
2003 年 11 月

# 目 录

绪论 .....	(1)
0.1 微波波段 .....	(1)
0.2 微波电子电路与微波固态电路 .....	(4)
0.3 本书的主要内容和章节安排 .....	(5)
第1章 无源微波元器件 .....	(8)
1.1 普通集总参数元件 .....	(8)
1.1.1 金属引线 .....	(8)
1.1.2 电阻器 .....	(9)
1.1.3 电容器 .....	(11)
1.1.4 电感器 .....	(13)
1.2 微波电路基片材料及传输线元件 .....	(14)
1.2.1 微波电路基片材料 .....	(14)
1.2.2 微波集成电路传输线元件 .....	(15)
1.3 集总参数元件的微带实现 .....	(15)
1.3.1 微带电感与电容 .....	(16)
1.3.2 微带支线电感与电容 .....	(17)
1.3.3 平面微带螺旋线电感 .....	(18)
1.3.4 微带缝隙电容 .....	(19)
1.3.5 微带交指电容 .....	(20)
1.4 微带线分支元件与电桥 .....	(21)
1.4.1 微带T形接头 .....	(21)
1.4.2 微带十字接头 .....	(22)
1.4.3 微带线三端口功率分配耦合器 .....	(22)
1.4.4 微带环形电桥 .....	(24)
1.4.5 分支线电桥 .....	(26)
1.5 微带线定向耦合器 .....	(27)
1.6 微带线谐振器 .....	(30)
1.6.1 终端短路微带线谐振器 .....	(30)
1.6.2 终端开路微带线谐振器 .....	(32)
1.6.3 其他平面结构谐振器 .....	(33)
1.7 微带线滤波器 .....	(34)
1.7.1 微带线低通滤波器 .....	(35)
1.7.2 微带线带通滤波器 .....	(36)

1.7.3 微带线带阻滤波器 .....	(37)
1.8 微带线阻抗变换器与阻抗匹配网络 .....	(38)
1.8.1 四分之一波长阻抗变换器 .....	(40)
1.8.2 四分之一波长阶梯阻抗变换器 .....	(40)
1.8.3 渐变线阻抗变换器 .....	(41)
1.8.4 单株线阻抗变换器 .....	(41)
1.8.5 滤波阻抗变换器 .....	(44)
1.9 微带线平衡-不平衡转换器 .....	(44)
1.9.1 双面微带线巴仑 .....	(44)
1.9.2 共面微带线巴仑 .....	(45)
习题 1 .....	(46)
<b>第 2 章 固态有源微波元器件 .....</b>	<b>(47)</b>
2.1 半导体基础 .....	(47)
2.1.1 半导体特性 .....	(47)
2.1.2 PN 结 .....	(55)
2.1.3 金属与半导体的肖特基接触 .....	(62)
2.1.4 金属与半导体的欧姆接触 .....	(65)
2.1.5 N 型砷化镓 (GaAs) 半导体特性 .....	(66)
2.1.6 异质结 .....	(69)
2.2 肖特基势垒二极管 .....	(70)
2.2.1 结构 .....	(70)
2.2.2 等效电路 .....	(71)
2.2.3 伏安特性 .....	(71)
2.2.4 特性参量 .....	(73)
2.3 变容二极管 .....	(75)
2.3.1 结构 .....	(75)
2.3.2 等效电路 .....	(75)
2.3.3 特性 .....	(76)
2.2.4 特性参量 .....	(78)
2.4 阶跃恢复二极管 .....	(80)
2.4.1 结构 .....	(80)
2.4.2 工作原理及特性参量 .....	(80)
2.4.3 等效电路 .....	(82)
2.5 PIN 二极管 .....	(83)
2.5.1 结构 .....	(83)
2.5.2 特性 .....	(84)
2.5.3 等效电路 .....	(86)
2.6 雪崩渡越时间二极管 .....	(87)

2.6.1	结构 .....	(87)
2.6.2	工作原理及特性参量 .....	(87)
2.6.3	等效电路 .....	(90)
2.6.4	其他雪崩管结构及工作模式简介 .....	(91)
2.7	转移电子效应二极管 .....	(93)
2.7.1	结构 .....	(94)
2.7.2	工作原理与特性 .....	(94)
2.7.3	等效电路 .....	(97)
2.8	结型晶体管 .....	(97)
2.8.1	工作原理 .....	(98)
2.8.2	等效电路与结构 .....	(99)
2.8.3	特性 .....	(100)
2.8.4	异质结双极型晶体管 .....	(112)
2.9	场效应晶体管 .....	(113)
2.9.1	结型场效应晶体管 .....	(114)
2.9.2	金属氧化物半导体场效应晶体管 .....	(118)
2.9.3	金属半导体场效应晶体管 .....	(126)
2.9.4	异质场效应晶体管 .....	(131)
2.10	SiGe HBT 与 SiGe MOSFET 简介 .....	(133)
	习题 2 .....	(134)
<b>第 3 章</b>	<b>微波频率变换器 .....</b>	<b>(136)</b>
3.1	概述 .....	(136)
3.2	非线性电阻微波混频器 .....	(137)
3.2.1	电路工作原理与时-频域关系 .....	(137)
3.2.2	电路功率关系与变频损耗 .....	(145)
3.2.3	噪声特性 .....	(154)
3.2.4	混频器的其他电气指标 .....	(158)
3.2.5	单平衡混频器 .....	(159)
3.2.6	双平衡混频器 .....	(163)
3.2.7	非线性电阻微波混频器的基本电路 .....	(164)
3.3	参量变频器 .....	(172)
3.3.1	小信号和频上变频器的的工作原理与方程 .....	(173)
3.3.2	参变网络及和频上变频器的一般能量关系 .....	(176)
3.3.3	小信号和频上变频器的性能 .....	(179)
3.3.4	小信号和频上变频器的电路结构 .....	(185)
3.4	变容管功率上变频器 .....	(186)
3.4.1	变容管的电压-电荷特性 .....	(187)
3.4.2	变容管功率上变频器的电路和电路方程 .....	(188)



3.4.3	变容管功率上变频器的性能 .....	(189)
3.4.4	变容管功率上变频器的电路结构 .....	(190)
3.5	变容管倍频器 .....	(191)
3.5.1	变容管倍频器的等效电路及电路方程 .....	(191)
3.5.2	变容管倍频器的性能 .....	(192)
3.5.3	变容管倍频器的电路结构 .....	(197)
3.6	阶跃管倍频器 .....	(198)
3.6.1	阶跃管倍频器的工作原理及分析 .....	(198)
3.6.2	阶跃管倍频器的电路 .....	(206)
3.7	场效应晶体管混频器 .....	(207)
3.7.1	单栅场效应晶体管混频器 .....	(208)
3.7.2	双栅场效应晶体管混频器 .....	(210)
3.8	场效应晶体管倍频器 .....	(212)
3.8.1	场效应晶体管倍频原理 .....	(212)
3.8.2	场效应晶体管倍频器电路 .....	(214)
习题 3	.....	(215)
<b>第 4 章</b>	<b>微波放大器</b> .....	<b>(217)</b>
4.1	概述 .....	(217)
4.2	微波参量放大器 .....	(218)
4.2.1	可变电抗中能量转换与放大的物理过程 .....	(218)
4.2.2	参量放大的一般能量关系 .....	(220)
4.3	微波晶体管放大器 .....	(221)
4.3.1	微波晶体管放大器的基本分析 .....	(221)
4.3.2	微波晶体管放大器的结构 .....	(239)
4.3.3	微波晶体管放大器的 CAD 简介 .....	(241)
4.4	微波晶体管功率放大器 .....	(242)
4.4.1	微波晶体管功率放大器的指标体系 .....	(243)
4.4.2	微波晶体管功率放大器的结构 .....	(245)
4.4.3	功率合成的基本概念 .....	(246)
习题 4	.....	(246)
<b>第 5 章</b>	<b>微波振荡器</b> .....	<b>(248)</b>
5.1	概述 .....	(248)
5.2	雪崩渡越时间二极管振荡器 .....	(249)
5.2.1	负阻振荡器的一般理论与基本分析 .....	(249)
5.2.2	雪崩渡越时间二极管振荡器的基本电路 .....	(258)
5.3	转移电子效应二极管振荡器 .....	(260)
5.3.1	转移电子效应二极管振荡器工作模式 .....	(261)

5.3.2 转移电子效应二极管振荡器电路结构 .....	(266)
5.4 微波晶体管振荡器 .....	(267)
5.4.1 微波晶体管振荡器的起振分析 .....	(267)
5.4.2 微波晶体管振荡器的电路结构 .....	(269)
习题 5 .....	(270)
<b>第 6 章 微波固态控制电路 .....</b>	<b>(271)</b>
6.1 概述 .....	(271)
6.2 PIN 管微波开关 .....	(271)
6.2.1 PIN 管微波开关的基本分析 .....	(271)
6.2.2 PIN 管微波开关的基本电路结构 .....	(281)
6.3 场效应晶体管微波开关 .....	(282)
6.4 微波限幅器 .....	(285)
6.4.1 肖特基势垒二极管限幅器 .....	(285)
6.4.2 变容二极管限幅器 .....	(285)
6.4.3 PIN 管限幅器 .....	(285)
6.5 微波电调衰减器 .....	(287)
6.5.1 PIN 管电调衰减器 .....	(287)
6.5.2 金属半导体场效应晶体管电调衰减器 .....	(293)
6.6 微波电控移相器 .....	(294)
6.6.1 开关线型移相器 .....	(295)
6.6.2 负载线型移相器 .....	(296)
6.6.3 定向耦合器型移相器 .....	(299)
6.6.4 平衡式移相器 .....	(300)
6.6.5 四位移相器 .....	(302)
习题 6 .....	(303)
<b>第 7 章 微波集成电路简介 .....</b>	<b>(304)</b>
7.1 概述 .....	(304)
7.2 单片微波集成电路的材料与元件 .....	(304)
7.2.1 单片微波集成电路的基片材料 .....	(304)
7.2.2 单片微波集成电路的无源元件 .....	(305)
7.2.3 单片微波集成电路的有源元件 .....	(307)
7.3 单片微波集成电路的设计特点 .....	(307)
7.4 微波集成电路的加工工艺简介 .....	(309)
7.4.1 微波集成电路工艺流程简述 .....	(309)
7.4.2 单片微波集成电路工艺流程简述 .....	(310)
7.4.3 微波集成电路新技术简介 .....	(313)
7.5 微波及毫米波集成电路应用实例 .....	(315)

---

7.5.1	微波及毫米波集成电路在雷达领域的应用 .....	(315)
7.5.2	微波及毫米波集成电路在电子对抗领域的应用 .....	(317)
7.5.3	微波及毫米波集成电路在通信领域的应用 .....	(318)
主要参考资料 .....		(321)

# 绪 论

电路的产生和开始应用可以追溯到 18 世纪晚期和 19 世纪早期。1800 年，意大利物理学家亚历山德罗·伏达 (Alessandro-Volta, 1745—1827) 发明了第一块电池——伏达电池，由于这种电池可以提供比较稳定的直流 (Direct Current, DC) 功率，最初的电路雏形才得以出现和发展。但是很快人们又发现低频的交流 (Alternating Current, AC) 可以提高电能的传输效率，减小传输单位距离的电能损耗，并且可以通过工作于法拉第电磁感应定律下的变压器实现能量转换。随后，在诸如查理斯·斯坦梅茨 (Charles Steinmetz)、托马斯·爱迪生 (Thomas Edison)、沃纳·西门子 (Werner Siemens) 和尼古拉斯·特斯拉 (Nikolas Tesla) 等电磁领域的先驱们的共同努力下，电能的产生和传送作为一个产业迅猛发展，电迅速走入了人们的日常生活中。1864 年，英国物理学家詹姆斯·克拉克·麦克斯韦 (James Clerk Maxwell, 1831—1879) 提出了电和磁通过空间耦合导致电磁波的重要假设；1887 年，德国物理学家亨利希·鲁道夫·赫兹 (Henirich Rudolf Hertz, 1857—1894) 第一次通过实验证明了电磁波通过空气辐射和接收，高频能量脱离了电线的束缚进入了无线空间。这一重大发现促成了无线通信和射频技术的飞速发展，20 世纪 20 年代出现了无线电广播，30 年代诞生了电视，40 年代诞生了雷达，一直发展到 80 年代出现了个人移动电话，90 年代出现了全球卫星定位系统，到今天人类社会已经进入信息时代，高速、大容量、覆盖全球范围的信息流动更是要依赖电磁波尤其是高频电磁波的产生、传播和处理，而这种高频能量的利用除了要依靠高频天线等装置外，更为核心的是高频电路的设计、制造和应用。高频 (微波) 电子线路的产生和发展正是适应了无线通信的飞速发展，成为高频和微波技术及工程应用的一个重要方面，受到越来越密切的关注。

为适应雷达、通信、导航、遥测遥感等系统的需求，电子线路的工作频率逐渐提高，已经进入微波、毫米波甚至亚毫米波波段，首先传统上采用的低频电路与系统的分析与设计理论受到极大挑战。众所周知，基尔霍夫 (Kirchhoff) 类型的电压电流定律这一分析与设计工具仅适用于直流到低频率的集总参数电路，当工作频率扩展到射频和微波波段，由于电路参数的分布化，基尔霍夫定律一般是失效的。另一方面，也由于工作频率的提高，电磁波能量的传输居于主导地位，在电路组成结构和元器件上也大异于低频系统。微波电子电路课程正是针对在高频和微波波段电子电路的组成、元器件的选用、电路性能的分析、功能部件的设计等具有特异性的基本问题而设置的。

## 0.1 微波波段

微波段是电磁波谱的一个重要组成部分。过去的一百年来，人们对电磁波谱进行过多种分类尝试，但是第一个被工业界和政府部门广泛接受的分类方法诞生于第二次世界大战后，由美国国防部提出。目前被广泛采用的分类方法是美国电气电子工程师协会 (IEEE) 提出并推广的，见表 0-1。

表 0-1 电磁波谱划分表

频率范围	波长范围	频段名称	波段名称
30~300 Hz	10 000~1 000 km	极低频 Extreme Low Frequency, ELF	
300~3 000 Hz	1 000~100 km	音频 Voice Frequency, VF	
3~30 kHz	100~10 km	甚低频 Very Low Frequency, VLF	超长波 Ultralong Wave
30~300 kHz	10~1 km	低频 Low Frequency, LF	长波 Long Wave
300~3 000 kHz	1 000~100 m	中频 Medium Frequency, MF	中波 Medium Wave
3~30 MHz	100~10 m	高频 High Frequency, HF	短波 Short Wave
30~300 MHz	10~1 m	甚高频 Very High Frequency, VHF	超短波 Ultrashort Wave
300~3 000 MHz	100~10 cm	超高频 Ultrahigh Frequency, UHF	微波 Microwave
3~30 GHz	10~1 cm	特高频 Superhigh Frequency, SHF	
30~300 GHz	10~1 mm	极高频 Extreme High Frequency, EHF	
300~3 000 GHz	1~0.1 mm	丝米 Decimillimeter	
	0.75 mm~0.76 $\mu\text{m}$		红外线 Infrared
	0.76~0.39 $\mu\text{m}$		可见光 Visible Light
	0.39~0.005 $\mu\text{m}$		紫外线 Ultraviolet Radiation
	0.005~10 <sup>-8</sup> $\mu\text{m}$		X 射线 X Radial
	10 <sup>-8</sup> $\mu\text{m}$ 以下		$\gamma$ 射线 $\gamma$ Radial

由表中可见, 微波一般是指电磁波谱中频率从 300 MHz~3 000 GHz 的一段, 对应的波长范围为 1 m~0.1 mm, 覆盖超高频、特高频、极高频和丝米频段。在雷达和通信等应用中还常用一些波段代号和习惯称谓来表示微波中一些特殊波段, 这些波段代号是在第二次世界

大战中英美为保密而采用的，今天也还在沿用，见图 0-1 和表 0-2。

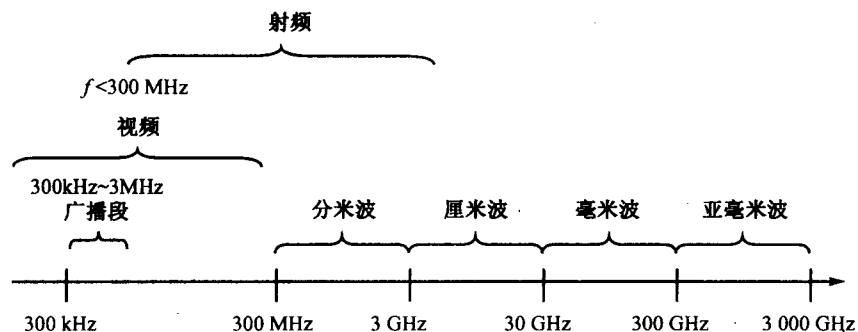


图 0-1 波段习惯称谓示意图

表 0-2 微波波段代号表

波段代号	习惯称谓	频率范围	波长范围
P 波段		0.23 ~ 1 GHz	130 ~ 30 cm
L 波段		1 ~ 2 GHz	30 ~ 15 cm
S 波段	10 cm 波段	2 ~ 4 GHz	15 ~ 7.5 cm
C 波段	5 cm 波段	4 ~ 8 GHz	7.5 ~ 3.75 cm
X 波段	3 cm 波段	8 ~ 12.5 GHz	3.75 ~ 2.4 cm
Ku 波段	2 cm 波段	12.5 ~ 18 GHz	2.4 ~ 1.67 cm
K 波段	1.3 cm 波段	18 ~ 26.5 GHz	1.67 ~ 1.13 cm
Ka 波段	8 mm 波段	26.5 ~ 40 GHz	1.13 ~ 0.75 cm
毫米波段		40 ~ 300 GHz	7.5 ~ 1 mm
亚毫米波段		300 ~ 3 000 GHz	1 ~ 0.1 mm

以上这些波段的划分并不是惟一的，还有其他许多种不同的波段划分方法，它们分别由不同的学术组织和政府机构提出，甚至在相同的名称代号下有不同的范围，因此波段代号只是指大致的频率范围。其次，以上这些波段的分界也并不严格，工作于分界线两边临近频率的系统并没有质和量上的跃变，这些划分完全是人为的，仅是一种助记符号，不存在物理上的差别。

微波在电磁波谱中的重要地位突出体现在它在广阔的军用和民用领域的应用。首先由于微波波长短，容易通过聚束天线实现窄波束定向辐射，因而为无线电探测和定位提供了有效的手段，目前广泛采用的各种军用、民用雷达，包括远程和超远程警戒雷达、火力控制和炮瞄雷达、火箭和导弹等的制导雷达、飞机导航雷达、气象雷达、车辆防撞及倒车雷达等几乎都工作在微波波段。其次，由于微波频率高、频带宽、信道容量大，因此在通信系统中也获得了广泛应用，包括个人移动通信系统、卫星通信系统、高速大容量数据传输系统、语音和图像广播系统、无线互联网络综合业务系统等。再次，由于微波是视距直线传播，同中低频率电磁波和光波比较，它几乎可以全天候穿透云雾、丛林甚至电离层，可以在地球和太空之间开辟一个窗口，这为人类进入太空和探测太空提供了技术手段，如射电天文学就是建立在

微波技术发展的前提下，它比光学望远镜系统探测得更深远，也更不容易受到气候和天气状况的制约。

由于这样一些优势，20世纪50年代前后，分米波和厘米波的应用得到了充分的发展。60年代之后，人们又开始向毫米波和亚毫米波开拓。由于毫米波和亚毫米波波长更短、频率更高，因此天线更小巧，具有更好的抗干扰能力，对多普勒频移效应更灵敏，能提供更宽的频带和更好的分辨率。其次，虽然毫米波和亚毫米波具有一定的似光性，但相比较于光波，它们对于云雾烟尘等具有较好的穿透力，全天候性能突出。此外，由于整个系统具有体积小、质量轻、结构灵巧等特点，毫米波段和亚毫米波段特别适合于机动通信、空间通信和制导等系统。

今天，微波系统已经不止在工作频率和应用领域上有了极大的扩展，而且随着信息化时代的来临，向着大规模和超大规模集成化、数字化和普及化发展，成了信息流动的重要手段和运载工具，在推动人类科学技术的进步和提高生活水平上扮演着越来越重要的角色。

## 0.2 微波电子电路与微波固态电路

微波电子电路一般泛指构成微波系统中各种功能模块的元器件与电路结构，也称为微波有源电路，以区别于由微波传输线和其他各种微波无源元器件组成的微波无源电路。回顾微波技术的发展史，在20世纪五六十年代以前的20多年时间里，由于对半导体材料研究的水平较低和工艺技术的不足，整个微波领域几乎全部使用微波电真空器件，也就是通称的电子管，包括速调管、行波管、返波管、磁控管和正交场放大管等，由这些电子管组成的微波电子电路被称为微波电真空电路。自20世纪60年代以来，微波半导体材料技术和工艺水平得到了飞速发展，先后出现了金属半导体二极管、硅双极晶体管、砷化镓-金属-半导体场效应管、雪崩二极管、耿氏二极管、隧道二极管和PIN管等微波半导体器件，并在微波系统中获得了广泛应用，这种以半导体管为核心组成的微波电子电路就称为微波固态电路。在微波半导体器件发展的同时，采用平面微波传输线（微带线）和薄膜淀积与光刻技术的微波混合集成电路（MIC）和单片集成电路（MMIC）也取得了迅速发展。利用单片集成工艺甚至可将微波电路淀积在一个半导体芯片上，不需要调整就可达到性能指标，因此能够大量生产以降低成本。经过多年来的发展，单片GaAs集成电路现在已经成熟，低噪声放大器、混频器-中频放大器组件以及中功率放大器等单片组件已经研制成功，目前已经向着大规模和超大规模微波集成电路化迈进。目前不仅微波接收机已集成化和固态化，而且中功率以下的微波发射机也已经固态化，几乎全部取代了微波电真空器件及电路，仅在大功率设备中微波电真空器件和电路还被采用。本书仅研究微波固态电路及其相关问题，关于微波电真空器件和电路的理论与应用可参看其他参考文献。

与微波电真空电路相比，微波固态电路的主要优点有以下几个方面：

- 系统具有固有的高可靠性，其平均无故障工作间隔时间可达 $10^5 \sim 10^6$  s。究其原因，一方面是由于微波固态器件本身具有高可靠性，另一方面是由于固态电路可在实际运用时设置备份系统，这样也提高了系统的可靠性。
- 固态电路体积小、质量轻。
- 成本低。当固态组件作为标准件大量生产时，其成本较低，而且一致性较好。

● 系统设计快速简便。由于各种功能和性能指标的固态组件或模块已经基本商品化，因此系统设计者只需合理选择使用即可构成完整的系统。

按照技术和应用水平不断提高的顺序以及电路元器件形态的不同，微波固态电路可以分为三个类型：分立集总元件电路、混合集成电路及单片集成电路。在分立集总元件电路中，电路采用的无源和有源元器件都是集总参数的和分立的，如电阻、电感、电容、二极管、三极管等，在组装电路时把这些元件分别装配于电路板上，情况与低频电路类似，由于当工作频率高到 GHz 范围时，这些集总元件尺寸太小以至于无法研制和加工，同时由于其他各种寄生参量的影响，使得分立集总元件电路一般只能适用于 L 波段之下。混合集成电路是把常用的微波无源元件，如传输线、电阻、电感、电容等，以分布参数方式制作在塑料、陶瓷、蓝宝石或铁氧体等介质基片上，然后把分立微波固态器件装配于这些介质基片上构成的，其优点是电路结构紧凑，可以实现小型化，它是目前微波固态电路最常用的形式。但是当工作频率达到毫米波或更高时，这种混合集成电路安装元件之间的连接便成了大问题，有时甚至不可能做到，这时单片集成电路成为了主要电路形式，它把微波半导体固态器件和无源元件都制作在半导体基片上，其性能稳定、电路制作一致性很强，结构更加小巧，因而微波单片集成电路成为毫米波以上微波固态电路的主要发展方向。

### 0.3 本书的主要内容和章节安排

为了直观全面地了解本书的结构和内容，先从几个典型系统的框图入手了解典型的微波、毫米波系统的组成。图 0-2 所示的是一个通用的个人移动通信系统的简化框图，如个人蜂窝移动电话和无线局域网网关等，统称为无线收发信机系统。

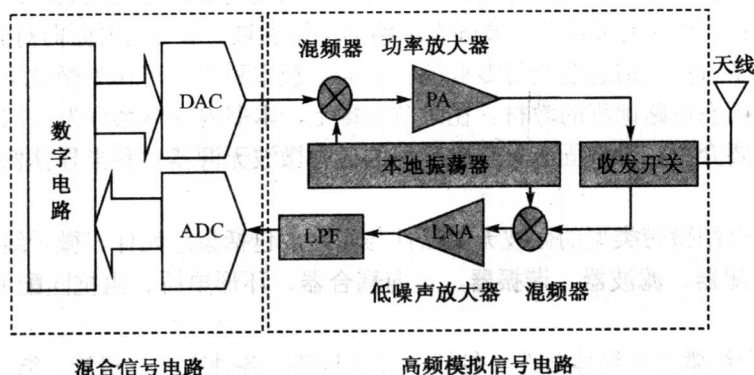


图 0-2 通用射频系统原理简化框图

这里并不关注这一系统的功能讨论和工作原理，仅需注意在高频模拟信号电路部分除了传输线以外，包含了几种功能模块：对信号完成上下变频的各种混频器、提供高频（微波）信号的振荡器、对信号完成放大作用的功率放大器和低噪声放大器、控制天线与收发回路连接的开关等控制组件、低通滤波器等，这些是组成高频（微波）电路的基本单元。

图 0-3 给出了一个工作于 35 GHz 的典型脉冲制辐射计式探测器的原理方框图。



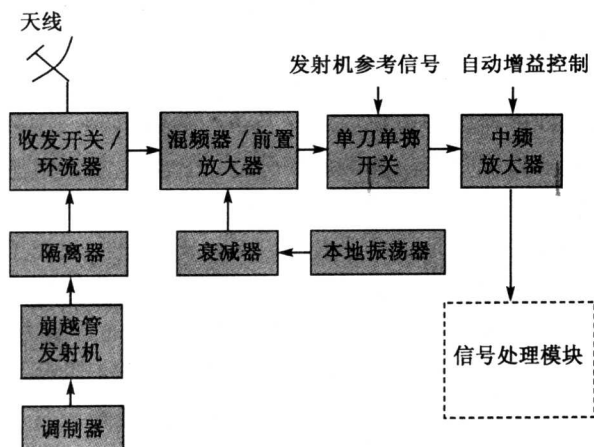


图 0-3 典型脉冲制辐射计式探测器原理框图

从这一框图中，可以看到在系统中除信号处理模块外，其组成也包括无源元件、振荡器、放大器、混频器、控制器件等。

前述的这些功能模块就是组成各种军民用途的微波毫米波系统的基本单元，要进行系统的分析与设计离不开对这些单元的掌握和运用。

本书介绍以微带微波传输线、传输线元件和微波半导体器件组成的微波有源电路组件的基本工作原理、基本电路结构和基本分析设计方法，电路形式以混合集成电路为主，以分立元件电路为辅，简单介绍单片集成电路；介绍了微波固态频率变换器、微波固态放大器、微波固态振荡器和微波固态控制电路四方面主要内容，以及构成这些功能组件的各种微波无源和有源器件与电路，基本上覆盖了微波固态电路的应用领域。本书主要面向对象是信息技术、通信、雷达、电子对抗和遥感遥测等专业的工科高年级本科生，可作为微波电子电路、微波有源电路和微波固态电路课程的教材。在章节安排上，本书内容体系分为三部分共 7 章。

第一部分主要介绍在微波固态电路中常用的各种微波无源器件和半导体器件，包括第 1 和第 2 章。

- 第 1 章介绍微带类型的微波无源器件与网络，包括集总元件、微带线集总元件、分支元件和功率分配器、滤波器、谐振器、定向耦合器、环形电桥、阻抗匹配网络、平衡-不平衡转换器等。

- 第 2 章介绍微波半导体器件，包括半导体基础、各种微波二极管、微波双极晶体管、微波场效应晶体管等。

第二部分是本书的核心部分，主要介绍微波固态频率变换器、微波固态放大器、微波固态振荡器和微波固态控制电路的基本工作原理、基本电路结构和基本分析设计方法，包括第 3 到第 6 章。

- 第 3 章介绍微波固态频率变换器，包括微波阻性下变频器、参量上变频器、变容管功率上变频器、微波倍频器、场效应晶体管混频器与倍频器等。

- 第 4 章介绍微波固态放大器，包括参量放大器、双极晶体管和场效应晶体管放大器、功率放大器与功率合成器等。