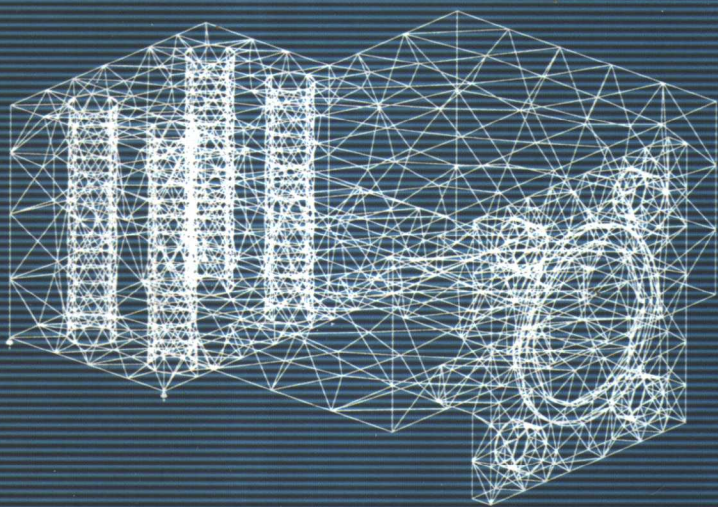


电子科学与技术



毫米波工程基础

薛良金 编著

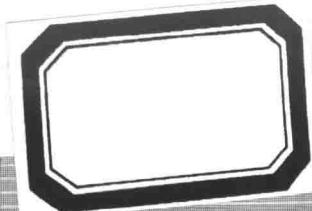


哈尔滨工业大学出版社

北京航空航天大学出版社 北京理工大学出版社

西北工业大学出版社 哈尔滨工程大学出版社

国防科工委「十五」规划专著



国防科工委“十五”规划专著

毫米波工程基础



薛良金 编著

哈尔滨工业大学出版社

北京航空航天大学出版社 北京理工大学出版社
西北工业大学出版社 哈尔滨工程大学出版社

内容简介

本书作者在总结自己与课题组 10 余年的科研成果基础上,着重讨论了平面传输线基本特性、分析方法和经验设计公式及毫米波混合集成电路设计的有关问题,同时,理论联系实际,给出了较多的工程设计图表和经过实验验证的电路方案,介绍了相对应电路已经达到的技术水平,反映了我国毫米波技术的研究现状。

本书可作为高等学校电磁场与微波技术专业研究生教学参考书,也可供雷达、制导、电子对抗、遥感技术、计量仪表等领域的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

毫米波工程基础/薛良金编著. —哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2004.3

ISBN 7-5603-1963-7

I. 毫… II. 薛… III. 极高频-微波技术
IV. TN015

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 099963 号

毫米波工程基础

薛良金 编著

责任编辑 尹继荣

哈尔滨工业大学出版社出版发行

哈尔滨市南岗区教化街 21 号(150006)

发行部电话:0451-86416203

E-mail:press@0451.com

黑龙江省地质测绘印制中心印刷厂印刷

开本:850×1168 1/32 印张:17.625 字数:459 千字

2004 年 3 月第 1 版 2004 年 3 月第 1 次印刷 印数:3 000 册

ISBN 7-5603-1963-7/TN·70 定价:23.00 元

国防科工委“十五”规划专著编委会

(按姓氏笔画排序)

主 任:张华祝

副主任:陈一坚 屠森林

编 委:王文生 王泽山 卢伯英 乔少杰

刘建业 张华祝 张近乐 张金麟

杨志宏 杨海成 肖锦清 苏秀华

辛玖林 陈一坚 陈鹏飞 武博祎

侯深渊 凌 球 聂 武 谈和平

屠森林 崔玉祥 崔锐捷 焦清介

葛小春



总 序

国防科技工业是国家战略性产业,是国防现代化的重要工业和技术基础,也是国民经济发展和科学技术现代化的重要推动力量。半个多世纪以来,在党中央、国务院的正确领导和亲切关怀下,国防科技工业广大干部职工在知识的传承、科技的攀登与时代的洗礼中,取得了举世瞩目的辉煌成就。研制、生产了大量武器装备,满足了我军由单一陆军,发展成为包括空军、海军、第二炮兵和其他技术兵种在内的合成军队的需要,特别是在尖端技术方面,成功地掌握了原子弹、氢弹、洲际导弹、人造卫星和核潜艇技术,使我军拥有了一批克敌制胜的高技术武器装备,使我国成为世界上少数几个独立掌握核技术和外层空间技术的国家之一。国防科技工业沿着独立自主、自力更生的发展道路,建立了专业门类基本齐全,科研、试验、生产手段基本配套的国防科技工业体系,奠定了进行国防现代化建设最重要的物质基础;掌握了大量新技术、新工艺,研制了许多新设备、新材料,以“两弹一星”、“神舟”号载人航天为代表的国防尖端技术,大大提高了国家的科技水平和竞争力,使中国在世界高科技领域占有了一席之地。党的十一届三中全会以来,伴随着改革开放的伟大实践,国防科技工业适时地实行战略转移,大量军工技术转向民用,为发展国民经



济做出了重要贡献。

国防科技工业是知识密集型产业,国防科技工业发展中的一切问题归根到底都是人才问题。50多年来,国防科技工业培养和造就了一支以“两弹一星”元勋为代表的优秀的科技人才队伍,他们具有强烈的爱国主义思想和艰苦奋斗、无私奉献的精神,勇挑重担,敢于攻关,为攀登国防科技高峰进行了创造性劳动,成为推动我国科技进步的重要力量。面向新世纪的机遇与挑战,高等院校在培养国防科技人才,传播国防科技新知识、新思想,攻克国防基础科研、高技术研究难题和生产当中,具有不可替代的作用。国防科工委高度重视,积极探索,锐意改革,大力推进国防科技教育特别是高等教育事业的发展。

高等院校国防特色专业教材及专著是国防科技人才培养当中重要的知识载体和教学工具,但受种种客观因素的影响,现有的教材与专著整体上已落后于当今国防科技的发展水平,不适应国防现代化的形势要求,对国防科技高层次人才的培养造成了相当不利的影响。为尽快改变这种状况,建立起质量上乘、品种齐全、特点突出、适应当代国防科技发展的国防特色专业教材体系,国防科工委全额资助编写、出版200种国防特色专业重点教材和专著。为保证教材及专著的质量,在广泛动员全国相关专业领域的专家学者竞投编著工作的基础上,以陈懋章、王泽山、陈一坚院士为代表的100多位专家、学者,对经各单位精选的近550种教材和专著进行了严格的评审,评选出近



200种教材和学术专著,覆盖航空宇航科学与技术、控制科学与工程、仪器科学与工程、信息与通信技术、电子科学与技术、力学、材料科学与工程、机械工程、电气工程、兵器科学与技术、船舶与海洋工程、动力机械及工程热物理、光学工程、化学工程与技术、核科学与技术等学科领域。一批长期从事国防特色学科教学和科研工作的两院院士、资深专家和一线教师成为编著者,他们分别来自清华大学、北京航空航天大学、北京理工大学、华北工学院、沈阳航空工业学院、哈尔滨工业大学、哈尔滨工程大学、上海交通大学、南京航空航天大学、南京理工大学、苏州大学、华东船舶工业学院、东华理工学院、电子科技大学、西南交通大学、西北工业大学、西安交通大学等,具有较为广泛的代表性。在全面振兴国防科技工业的伟大事业中,国防特色专业重点教材和专著的出版,将为国防科技创新人才的培养起到积极的促进作用。

党的十六大提出,当人类社会跨入21世纪的时候,我国进入全面建设小康社会、加快推进社会主义现代化的新的发展阶段。全面建设小康社会的宏伟目标,对国防科技工业发展提出了新的更高的要求。推动经济与社会发展,提升国防实力,需要造就宏大的人才队伍,而教育是奠基的柱石。全面振兴国防科技工业必须始终把发展作为第一要务,落实科教兴国和人才强国战略,推动国防科技工业走新型工业化道路,加快国防科技工业科技创新步伐。国防科技工业为有志青年展示才华,实现志向,提供了缤纷的舞台,



希望广大青年学子刻苦学习科学文化知识,树立正确的世界观、人生观、价值观,努力担当起振兴国防科技工业、振兴中华的历史重任,创造出无愧于祖国和人民的业绩。祖国的未来无限美好,国防科技工业的明天将再创辉煌。

张华祝



前 言

毫米波技术是当今微波技术界最为敏感的课题之一。20多年前开始的“毫米波热”，曾经在国内学术界和电子工程界掀起过一股来势很猛的浪潮。12年前，作者曾受命组织编写了《我国毫米波发展战略研究》报告。在此报告中，根据近100位有关专家和工程技术人员座谈讨论的意见，我们整理、编写了“国外背景材料”，“分析研究”和“发展战略建议”等三份材料，以供相关决策机构在工作部署时参考。之后，作者曾先后在中国电子技术和电子产业发展战略研讨会、微波学会第一届毫米波年会上，以“毫米波，亟待开发的频谱资源”为题作过专题报告。1995年底，应有关领导机关要求，作者又以“毫米波防卫电子系统设计中的一些问题”为题，结合作者所在课题组20余年的工作实践，对当时国内毫米波工程系统研制中面临的一些问题提出了一些看法，并在微波学会第二届毫米波年会、军事微波年会上，以特邀报告方式与同行作了交流。

毫米波技术的研究工作主要围绕军用系统的研制展开。鉴于其类光特性和准全天候工作能力，它能使防卫系统在采用小孔径天线时，获得较高的目标分辨力，毫米波雷达和弹载系统不易受到有源电子干扰，而且具有比微波系统高得多的精度，因而越来越



受到军方的重视。近年来,要求性能卓越的防卫电子系统带来的军用原型系统数量的增加,以及由于微波通信网出现的频谱拥挤带给人们早期的毫米波梦,正一步一步变为现实。

20世纪40年代至今,微波已成为电子武器系统中最为活跃和最具成果的应用技术之一。随着军用电子技术和信息技术的发展,战场环境中的电磁信号日趋密集,信号特征也日渐复杂,从而对现代武器系统中应用的电子设备提出了许多新的要求,例如小型化、轻量化、高机动性和可靠性,强抗干扰能力,精确跟踪和测量,有获得目标全面信息和成像能力,穿透等离子体以及全天候工作能力,保密性好,隐蔽性和战时生存能力强等等。由于频率较低,微波设备从体积、质量到电气性能都难于满足现代武器系统的上述要求,这就促使人们去探索、开发新的频谱资源。于是,毫米波就成为人们十分关注的频谱被提到研究日程上来。有鉴于此,世界各主要发达国家都把毫米波频段的开辟作为其军事电子发展的重要内容之一。事实证明,对这段电磁频谱的开发和占领,已成为军事大国在军备竞争中的热点。有人提出“毫米波年代已经到来”,“毫米波系统已对当今电子武器提出挑战”等论断。

本书以作者在电子科技大学为研究生开设的“毫米波技术”课讲稿为基础编写而成。鉴于毫米波系统可靠性和低成本制造技术的要求,毫米波元件和子系统一直沿着波导电路→混合集成电路→单片集成



电路向前发展。为此,本书不去讨论涉及毫米波技术课题的方方面面,而集中介绍与毫米波混合集成电路相关的内容。这也是作者及课题组成员近 10 余年科研工作的主要方向。书中第二章介绍毫米波固态源及其相关内容。众所周知,信号源是一个频段开发和发展的基础。尽管毫米波电子器件也是毫米波技术得以发展的重要支撑条件,而且对它们的研制报告也很多,但出于以集成电路设计为目的,我们不去讨论这部分内容。对此有兴趣的读者,可以从众多文献资料和专著中去获取所需。第三章介绍作为集成传输媒介之一的微带传输线。微带是一种平面传输结构,而且已在厘米波频段得到广泛应用。但频率升高必然导致对其中的高次模不容忽视。因此,将厘米波频段已有的近似设计图表资料用于毫米波电路设计显然是不合适的。本章从工程设计角度考虑,介绍一些在毫米波电路设计中有用的资料。第四章讨论另一种毫米波集成传输媒介,即鳍线(Finlines)的传输特性。这是一种为适应毫米波技术发展,由 P. J. Meier 在 1972 年提出的新型结构。至今,有关这种结构本身及其相关电路的论文已成千上万,各种毫米波鳍线电路和子系统也已成功应用于毫米波工程。作者及学生们在此领域的工作亦已受到国内外同行的关注。如同第三章一样,为便于读者查阅原始文献,我们以脚注方式提供了一些与正文对应的参考资料。第五、第六章讨论毫米波电路和子系统,仍然以混合集成技术为主。这两章内容除取自大量文献资料外,主要是



本书作者群体近 10 年科研工作的反映。这些电路已经过实验验证,通过原电子工业部组织的技术鉴定,有的已经获奖并已向相关单位提供了众多的工程实物,为我国毫米波技术的发展尽了我们的微薄之力。第七章介绍国外早期毫米波系统,取材于 P. Bhartia 和 I. J. Bahl 的《Millimeter Wave Engineering and Applications》。这些系统并不代表当今毫米波系统水平,但可供系统设计师参考。

毫米波系统除军事应用外,在诸如射电天文、民用通信、遥感技术、车船防撞、频谱学以及生物效应等方面的应用,近年也有不少文献报道。由于本书以基础电路设计为目的,其技术既可为军,亦可为民所用,因此,本书不涉及具体应用系统问题。

综合国外信息表明,在以各种战术、战略制导武器为主体的新武器技术革命中,军事电子学的重点将转移到毫米波频段。毫米波技术可能成为提高下一代武器系统作战能力的重要手段。估计 21 世纪前期,各种毫米波制导和控制的精确武器将投入使用。战场上将出现一批毫米波雷达和毫米波制导的新武器系统装备,电子对抗技术也将面临着毫米波的挑战。因此,为了对付这种即将面临的新局面,我们必须密切注视国外毫米波技术发展的新方向,瞄准世界的先进技术,迅速有组织有计划地开展相关的技术研究,以适应未来战争环境的要求。这就是本书作者编写此书的目的。

本书第一版由国防科技出版基金资助,国防工业



出版社 1998 年 9 月出版, 2001 年 9 月第二次印刷。
这次修订版在国防科工委组织和支持下完成。

本书出版四年多来, 在毫米波应用系统研制需求的推动下, 国外以三端器件为基础的毫米波单片器件发展极为迅速, 并已广泛用于集成化部件、组件和子系统。高质量单片振荡器、混频器、放大器、开关及其组合模块已屡见于国外相关公司的产品手册。国内毫米波系统研制也在军口不少部门广泛展开, 民用系统开始启动。此外, 第一版出书后, 同行专家教授提了一些有益的建议。这些都是促使作者对第一版进行修订的原因。

这次修订除增添第七章毫米波系统外, 第二章增加了集总参数源, 并将原第六章倍频器内容扩展后分成两节移至第二章, 第三章波导-微带过渡移至第五章, 对第六章集成前端部分作了删减并增加了一些新内容。这些变动使第一版第二、第五和第六章在编排上有较大的变动。

作者借本书此次再版的机会, 向关心此书的各级领导和专家教授, 特别是承担本书审稿的两位教授和负责编辑的同志表示诚挚的谢意, 并希望用过此书的同志们批评、指正。

编著者
2003 年 6 月

目 录

第一章 绪论	1
1.1 毫米波	1
1.2 毫米波的特点和应用	5
第二章 毫米波固态源	16
2.1 毫米波固态振荡器的一般理论	20
2.2 IMPATT 振荡器	25
2.3 Gunn 器件振荡器	39
2.4 毫米波集总元件 Gunn 振荡器和 VCO	50
2.5 二端器件倍频源	67
2.6 三端器件振荡器和倍频器	84
2.7 振荡器的调谐技术	102
2.8 功率合成技术	109
第三章 微带传输线	115
3.1 微带结构的一般形式	121
3.2 类微带结构的准静态分析	124
3.3 类微带线的特性阻抗和有效介电常数	132
3.4 微带线的损耗、功率容量和品质因数	137
3.5 有关微带电路设计的其他问题	143
第四章 集成鳍线特性	150
4.1 鳍线	150
4.2 电磁场方程	153
4.3 单面鳍线的谱域分析	157
4.4 基函数的选择	165
4.5 变单面鳍线	171



4.6	特性阻抗	175
4.7	谱域导抗方法	179
4.8	单面鳍线和双面鳍线的近似设计公式	187
4.9	一些有用的结论	199
第五章	平面无源电路	214
5.1	匹配网络	214
5.2	耦合电路	247
5.3	鳍线谐振电路	271
5.4	滤波电路	288
5.5	混合电路	315
5.6	不可逆电路	326
第六章	毫米波固态电路	341
6.1	鳍线振荡器	341
6.2	检波器	355
6.3	混频器	368
6.4	放大器	387
6.5	三端器件放大器	398
6.6	开关	415
6.7	移相器、衰减器、调制器和限幅器	424
6.8	集成前端	428
第七章	毫米波系统	452
7.1	毫米波传播特性	452
7.2	毫米波雷达	474
7.3	毫米波通信	517
7.4	辐射计、遥感和电子战中的毫米波问题	530

第一章 绪 论

1.1 毫 米 波

习惯上,我们把波长介于 $1 \sim 10 \text{ mm}$ 的一段电磁频谱称为毫米波频谱,它所对应的频率范围为 $300 \sim 30 \text{ GHz}$ 。有些国家也不完全照此定义,例如,美国电气与电子工程师学会规定的毫米波频率范围是 $40 \sim 300 \text{ GHz}$,而把 $100 \sim 1\,000 \text{ GHz}$ 一段称做近毫米波。实际应用中也常把毫米波低端降至 26 GHz 甚至 18 GHz 。从频谱分布来看,毫米波低端总与微波相连,而高端则和红外、光波相接。由此可以断定,本领域必然兼容微波、光波两门技术学科的理论、研究方法和技术,并将逐渐发展成为一门知识密集和技术密集的综合性分支学科。它的发展也必然同时为信息科学、微电子技术、大气物理和材料科学等方面的研究提供重要手段,从而将进一步促进这些学科的发展。

二次大战期间,厘米波技术,即我们通称的微波技术得到迅速发展。由于战争需要,先后研制出了 10 cm (S 频段), 3 cm (X 频段)和 1.25 cm (K 频段)波长的雷达设备。前两种雷达对预防敌机空袭和提高空军夜间作战能力做出了重大贡献,后者则是为提高目标拦截精度而设计的。20 世纪 40 年代至今,微波在电子武器发展过程中,以至商用和民用系统中都是最为活跃和最富成果的应用技术之一。制导、雷达、导航、电子战、通信以及众多的民用系统已涉及国民经济的各个部门。可以说,微波技术目前已十分成熟,尤其是上世纪 70 和 80 年代期间发生的一场重大变革,又把微波技术推向一个新的高峰。这就是,固态器件和微波集成电路的发



展导致了微波元部件乃至整个微波系统的小型化和轻量化。其中作为传输媒介的平面传输线的采用,在减小电路之间的寄生影响和电路多余接口方面起到了明显的推动作用。

近 10 多年来,用户剧增使微波频谱出现拥挤,加之,精确武器系统的发展要求促使人们把系统的工作频率往上延伸,从而导致毫米波频率的利用。但和其他技术分支一样,电子武器界对毫米波频谱的认识和利用,也有一段逐渐理解的过程。其中包括认真对待并逐步克服其发展过程中出现的困难和更认真对待毫米波系统研制面临的一些前沿课题。

我们不再对毫米波技术的发展历史作详细介绍,因为有关毫米波的发展过程问题,J. C. Wiltse 已作过详细讨论^①。

和微波频段一样,工程上经常采用一些英文字母来表示毫米波频谱中的某一频段,而且各国所作的规定不尽相同。图 1.1 是毫米波的频段分类和定义,而表 1.1 是文献中常见的一些频段代码及其对应的频率范围。

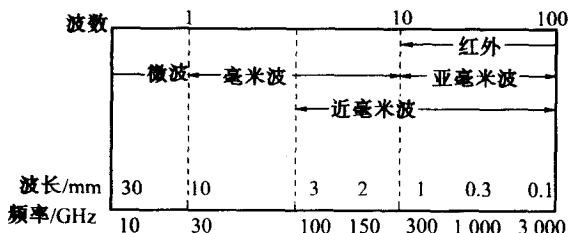


图 1.1 毫米波在电磁频谱中的位置

在毫米波频段,电磁能量在大气中传播时与大气中气体、悬浮微粒以及含水物质的相互作用要比它们与微波能量的相互作用强得多。这些相互作用通过三种机理,即通过吸收、散射和折射产生。

^① Wiltse J C. History of Millimeter and Submillimeter Waves. IEEE Trans; Microwave Theory Tech, Vol. MTT-32, No. 9, Sept. 1984. P1118 ~ 1127