

全国毫米波计量测试技术发展研讨会

论 文 集

中国计量测试学会

1988.8 北京

全国毫米波计量测试技术发展研讨会

论 文 集

PROCEEDING OF NATIONAL SYMPOSIUM ON DEVELOPMENT OF
MM-WAVE MEASUREMENT (NSDMM 88)

中国计量测试学会

1988.8 北京

中国计量测试学会电子专业委员会

ELECTRONICS TECHNICAL COMMITTEE, CHINESE
SOCIETY FOR MEASUREMENT

委 员：（以姓氏笔划为序）

于汇东	王承武	戈锦初	刘丰焜	刘全宝	汤世贤
任守勤	孙圣和	李世雄	李锦林	张世箕	陈成仁
邵学明	周清一	范懋本	赵 基	侯连堂	顾 及
郭允晟	唐家明	诸维明	席德熊	黄存礼	董树义
董鸿勋					

主任委员： 汤世贤

副主任委员： 张世箕 王承武 席德熊

秘 书： 陈成仁

全国毫米波计量测试技术发展研讨会

论文集编辑委员会

委 员：	汤世贤	席德熊	陈成仁	倪伟清	冯新善
	胡希平	蔡新泉	梁文烈	徐文恬	杨川涛

责任编辑： 陈成仁

目 录

序.....	林为干 (1)
前言.....	汤世贤 (2)

毫米波技术综述

1 毫米波传输线综述.....	李嗣范 (4)
2 毫米波技术的回顾与展望.....	薛良金 (8)
3 毫米波技术的发展和我们的对策.....	陈增圭 (14)
4 毫米波辐射安全问题探讨.....	黄志洵 (25)
5 毫米波固体器件的现状与发展.....	顾世惠 (33)
6 毫米波天线技术的新发展.....	都世民 (41)

毫米波计量测试

7 军用毫米波技术及其对计量测试的要求.....	乔石琼、叶德培、赵 蓁 (51)
8 苏联的毫米波计量概况.....	张 伦 (61)
9 毫米波技术及发展我国毫米波计量测试的建议.....	 陈成仁、席德熊、梁文烈 (72)
10 发展我国毫米波功率计量测试的建议.....	冯新善 (98)
11 发展我国毫米波传输和反射计量测试的建议.....	胡希平 (113)
12 发展我国毫米波噪声计量测试的建议.....	徐文恬 (122)

毫米波测量仪器

13 毫米波测试概况、趋势与当前的计量任务.....	董树义、赵永久 (133)
14 对我国毫米波仪器的研制与发展的建议.....	黄伟嘉 (144)
15 国内外毫米波测量仪器的概况及发展.....	汪显尧、贾道敏 (153)
16 毫米波测量仪器的发展趋势.....	陈成仁、杨川涛、梁文烈 (158)
17 发展我国毫米波网络分析仪的建议.....	赵希尧 (177)
18 国内外标量网络分析仪及其系统发展的现状.....	陈增范 (183)
19 毫米波扫频反射计及其宽带元件发展概况.....	屈大信 (195)

毫米波国内现状

- 20 上海科技大学的毫米波研究.....徐培源 (203)
- 21 清华大学的毫米波研究.....高葆新、冯正和 (208)
- 22 3mm 频段关键部件的研究.....
.....吴正德、唐小宏、王少庆、刘太君、张登国、朱 江、夏 喻 (211)
- 23 国营七六八厂毫米波技术开发概况.....王义举 (226)
- 24 上海无线电26厂毫米波测量仪器和元器件的现状与动向.....林月轩 (233)
- 25 短毫米波元件的几个进展.....匡龙海 (237)

毫米波测量问题

- 26 毫米波相位噪声测量.....徐德忠 (239)
- 27 毫米波微带介质基板上微波复介电常数带状线测试方法和系统.....
.....张其勋、曹 江 (250)
- 28 毫米波材料特性参数测量技术.....廖承恩、蒲国胜 (256)
- 29 Ka波段六端口反射计的研制.....徐秉椿、陈兆武 (258)
- 30 毫米波大功率真空器件计量测试的若干问题.....张 伦 (268)

毫米波技术应用与要求

- 31 毫米波成像与计检.....张澄波、路益惠 (273)
- 32 非电量的毫米波检测法.....李 英 (279)
- 33 毫米波技术在电子对抗中的应用.....龚金檀 (298)
- 34 毫米波在反坦克武器中的应用.....刁育才 (314)
- 35 毫米波在等离子体诊断方面的应用.....喻 红 (322)
- 36 毫米波通信的现状和发展及其对计量测试的要求.....王惠功 (326)
- 37 国内外毫米波传播研究中计量测试技术应用简述.....赵家启、张 威 (334)
- 38 国外毫米波雷达与测量技术.....刘崇云 (344)
- 39 毫米波技术与目标特性.....陶 巍、胡扬学 (355)

附 录

- I 毫米波矩形波导代号..... (362)
- II 毫米波波导法兰代号..... (363)
- III IEC标准矩形铜波导($\sigma = 5.8 \times 10^7 \text{ S/m}$)的理论衰减图表..... (364)
- IV 国际毫米波产品公司一览表..... (365)

序

毫米波(30-300CHz)的发展有过一段兴衰历程。40-60年代,毫米波技术除50年代有所发展外,由于技术、工艺和材料方面的困难以及认识上的限制,与微波技术相比,其发展是较缓慢的。特别是60年代初期,由于激光和红外技术的崛起以及毫米波远距离通信的衰落,使毫米波研究处于低潮。

60年代末至70年代初期,诸如Gunn管、IMPATT管、Schotky管之类的新型固态器件和回旋管等大功率电真空器件的出现与实用化,以及毫米波传输线、基础材料和加工工艺的发展,特别是毫米波有着比微波和红外、可见光等更优越的特性,毫米波重新引起了世界各国的关注。迄今,国际上出现了一股“毫米波热潮”。在美国商务部对左右21世纪经济的高技术预测中,毫米波技术被列为重要分支学科之一。

毫米波的特点、毫米波技术的国内外现状和发展趋势,以及它在国民经济和军事科学技术领域的广泛应用,本次学术讨论会的作者们作了许多深入的专题介绍。毫米波段这一重要的电磁频谱资源的开发利用,方兴未艾。我国的毫米波研究工作起步较晚,与国际水平差距较大。如何发展我国的毫米波技术,是一个有待深入探讨的重要问题。但是,我很同意一些论文作者的观点:近代计量测试技术,是使新技术趋于成熟的关键。本次由中国计量测试学会电子专业委员会组织的《全国毫米波计量测试技术发展研讨会》,对于推动我国毫米波技术的发展是适时和必要的。

学部委员、教授

林为干

1989.7.1.

前 言

波长为为 $10\text{--}1\text{mm}$ (相应频率 $30\text{--}300\text{GHz}$)的电磁波,称为毫米波。与较低频率的微波相比,主要有如下特点:(1)可利用的频带宽,信息容量大。(2)天线易实现窄波束和高增益,因而测量目标的精度和分辨力高,抗干扰性能好。(3)低径向速度目标引起的多普勒频移大,使测速灵敏度提高。(4)穿透等离子体的能力强。(5)利用大气衰减峰值吸收波段的大气不透明性,可用于反窃听高保密通信,在卫星间通信和星际通信中,屏蔽地面射频与电子干扰。与红外和可见光相比,受自然光和热辐射源的影响小;在云、雾、烟、尘及大气传播中的损耗小等。鉴于毫米波具有上述一些固有的突出特点和优点,使毫米波技术得到广泛应用。在军事方面,毫米波雷达、通信、导航、精密制导具有极其重要的地位,是军事大国军备竞争异常激烈的领域,在遥感、遥测、射电天文、医学、生物学、等离子体诊断等方面亦得到广泛应用。毫米波技术的研究和发展,将为信息科学、材料科学、生物工程、能源开发、环境保护、天文学等等提供重要的手段,有力地促进这些学科的发展。这次学术讨论会,有许多文章就毫米波技术的这些应用进行了专题论述。本世纪七十年代以来,毫米波频段的加工工艺、各类器件、元部件、传输线、材料、大功率源等基础性研究取得了重要突破,讨论会对这些进展亦有不少论述。近十年来,毫米波频段的开发利用,无论是基础理论还是应用技术,都取得了重大进展。各个领域的实用化系统的发展,又促进了毫米波工业的繁荣。正如林为干教授所述,毫米波将成为左右21世纪经济的高技术领域的重要分支学科之一。

毫米波技术的飞跃发展,给当代计量测试提出了新的课题和挑战。例如,随着毫米波固态器件的大量涌现,以及混合集成电路和单片集成电路的发展,向计量测试提出的新课题,将是提供可以评价基片上新元件和传输线特性的测量方法和标准。

有7~8位作者介绍了毫米波测量仪器和系统的进展。具有高精密度、多功能、宽广量程和频率范围的近代毫米波测量系统，要求提供相应的国家标准，以及保证这些系统正常工作的校准服务，这对我们的能力将是一个严重的挑战。

科学、技术和测量技术始终是共栖交融的。新的测试和测量方法，将促进新技术的发展并使之趋于成熟。例如，七十年代初期发展的天线近场测量的扫描技术，极大地促进了卫星通信系统的发展。该技术在有效的自动控制情况下，可测量出辐射图形和天线特性的详尽结果。从而可以确定卫星互不干扰的最小距离，继而预测地球同步轨道的饱和度。同时，该技术还可以用于测量相控天线阵的辐射图形，以及寻找故障阵元的诊断工具。

我们如何应付毫米波技术快速发展给计量测试带来的挑战，正是这次专题学术研讨会的宗旨。作者们从战略角度到具体措施提出了许多建设性意见。必将促进毫米波计量测试技术与毫米波技术的发展。毫米波计量测试包括众多的参数、宽广的频域和量程，需要我国计量界、毫米波理论界和技术界的协同努力。

中国计量测试学会常务理事
电子专业委员会主任委员

教授



毫米波传输线综述

李明范

(东南大学)

(原南京工学院)

一、概述

毫米波指波长为 $10\sim 1\text{mm}$ 的电磁波,这个频谱介于微波与亚毫米波之间。因而,毫米波传输线的类型既包含向高频延伸的原属于微波使用的传输线,又包含向低频延伸的属于亚毫米波使用的传输线。同时,近二、三十年来毫米波段有源器件进展迅速,由单一的电真空器件,变成电真空器件与固态器件并存的局面,而且,除大功率系统以外,固态器件使用范围更为广泛。电路形式也不断更新,过去是单一的波导、同轴线立体电路,现在出现混合集成平面电路与单片集成电路。毫米波传输线随着固态器件的推广应用与平面电路的迅速发展而随之发展。立体电路中的波导、同轴线已有半个多世纪历史,当前大多数毫米波测量线及元件还是采用波导、同轴线,多数毫米波振荡器为了获得高频率稳定度也采用波导腔。所以,虽然波导同轴线比较古老,但仍有应用前景,不能偏废。不过,波导、同轴线到了毫米波段尺寸很小,机械加工成本上升,需要较多调谐装置,耐振、耐冲击等能力较低,同时,不易与梁式引线的毫米波半导体器件相配。由于存在上述缺点,因而促使人们寻觅各种新型毫米波传输线。本文将依次介绍MMIC混合集成电路中使用的平面传输线,MMIC使用的共面传输线,以及毫米波高端使用的介质波导的现状与展望,最后就毫米波测量技术问题提出一点不成熟的意见。

二、毫米波平面传输线

微带线。微带线在微波混合集成电路中得到广泛的使用,种类有标准微带线与悬置微带线两大类。所用的介质基片材料有 Al_2O_3 、陶瓷片与石英片。前者相对介电常数在 $9\sim 10$ 之间,标准值 9.6 。微带线电路用照相光刻工艺制成。这类微带线的特性阻抗50年代用Wheeler提出的保角变换法,60年代用Weiss与Bryant提出的介质格林函数法,两种方法均假定微带线传输准TEM波。微带线的衰减常数用增量电感法计算。计算结果用于FET放大器等有源电路的CAD,结果十分接近实测结果。进入毫米波段,由于频率上升,波长缩短,电路尺寸减小,尤其到毫米波段高频端,电路尺寸太小,增加工艺的难度,故采用低介电常数的介质基片代替高介电常数的介质基片。例如双面敷铜箔的Duroid基片,在 10GHz 时介电常数为 2.2 ,损耗角正切 $\tan\delta=0.0004$ 。最近几年,这类基片国内也正在试制。目前,精确的介电常数与损耗角正切在毫米波段尚无数据

可查，必须利用测量法确定，这是毫米波测量领域中一个有实际意义的课题。随着频率的升高，不允许再假定准TEM波，介质基片必然引发TE与TM模共存，即所谓混合模。因而分析毫米波微带线特性阻抗、色散特性，必须利用全波分析法。毫米波段微带线不连续性对电路的影响更不容忽视，如拐角，阶梯，间隙等等。有的不连续性还被用来作为元件的基础组成部分，如悬置微带线间隙耦合的滤波器、标准微带线的阻抗匹配器等。计算毫米波段微带线不连续性的等效模型，是一项十分重要而又使许多学者感兴趣的前沿课题。

鳍线。这类微带线一面接地，适宜作三端口固态器件混合电路使用，如FET放大器，使用效果良好。但在毫米波段，初期只有二端口器件，如Schottky二极管、PIN管、变容管等，而且陶瓷管壳封装管逐渐被性能更好的梁式引线二极管所代替。于是鳍线应运而生，最早由Meier提出。经过10多年使用与发展，目前鳍线已有单侧，双侧，对拓等多种类型。在毫米波混频器、开关、电调衰减器、移相器、滤波器、定向耦合器中获得广泛应用。当前国际上鳍线电路多使用Duroid介质基片，介电常数低的有2.2，高的为10，厚度有0.127，0.254mm等多种规格。由于毫米波固态源输出接口仍为矩形波导法兰，故鳍线电路均封于矩形波导中，用过渡段联接。鳍线中不连续性更是一个不容忽视的因素，如E面纵向膜片、阶梯等等。均匀鳍线与不连续性均用全波分析法分析。由于鳍的存在，鳍线的特性阻抗一般要比同尺寸的矩形波导低，单模的工作频带较宽，因而易与固态二极管匹配。

槽线。槽线与微带结构互补。在天馈线中应用较广。电路做在介质基片的一面。其色散特性与特性阻抗均用全波分析法分析，有数据可查。这类传输线在毫米波电路中应用尚未见大量报导。

用全波分析法分析微带、鳍线及槽线是一个复杂的电磁边值问题，近一、二十年来，解决了大量这类问题，同时也发展了电磁理论本身，目前有各种分析途径，如奇异积分方程法，变分法，谱域法，直线法，矩量法，有限元法，边界元法，横向谐振法等等，或是几种方法的混合使用。

三、介质波导传输线

60年代末介质波导作为光传输线使用，材料为特种玻璃纤维，故又称光纤。经过10多年研究，不论是传输理论还是材料工艺，都获得很大发展。光纤从研究阶段进入到开发实用阶段，并且应用范围日益扩大，已成为现代通讯中一个十分有效的手段。

到了70年代初期，介质波导作为毫米波传输线重新引起人们的兴趣。由于有成熟的光纤理论与制造工艺作为基础，又有优质的介质材料可资利用，出现了多种形式毫米波介质波导，成为从光波、亚毫米波向毫米波段延伸的传输线。最初分析的是平板型介质波导，这类波导边界条件相对来说较简单，它的色散特性与衰减都可用严格方法解出，但实用性较差。圆柱介质波导是一条直径为 d 的介质圆柱体，周围被另一种

低介电常数的包层包围。这类介质波导更接近了光纤,分析方法也类似,但由于介质内部介电常数均匀,故不象光纤分析那样复杂。常用波导模分析法,利用介质表面切向场强连续条件获得色散特性的特征方程、场强分布与辐射引起的衰减。但到目前为止,很少报导这类介质波导的实用例子。目前,有实际应用例子的是微带线与无辐射H波导。前者是置于接地平面上的矩形介质波导,分析方法有等效介电常数法与模匹配法及若干数值方法等。利用微带线构成的定向耦合器有结构工艺较为简单的优点。无辐射H波导是利用平板传输线截止波长原理,使沿介质波导传输的电磁波不会向外辐射,从而减少损耗。无辐射H波导既可作为毫米波元件也可作为天线使用,是毫米波高频端一种有开发前景的介质波导。

四、单片集成电路中使用的传输线

单片集成电路中的器件、传输线与集总参数元件均集成在GaAs芯片上,多年来多以微带线作为传输线。在微波频率用微带线制作各种电路显得十分灵活。但一旦频率升高到毫米波段,微带线就显示出缺点,缺点之一是有源器件需要接地孔,而在毫米波段接地孔将引入可观的电感量,从而使电路性能下降。

有人曾经建议用共面波导代替微带,取消接地孔。但由于一个并未证实的结论使共面波导未获得广泛应用,这个结论是共面波导的导体损耗天生要比微带高。毫米波段共面波导的主要优点是适宜与FET配合,因为毫米波段器件的高频接地点必须靠近器件,而共面波导接地点就在介质片边缘,用不着打接地孔。

根据全波分析法结果[1],当介质基片厚度与材料给定时,微带线特性阻抗仅取决于微带宽度,而共面线特性阻抗却取决于中心导带宽度与两条接地导带之间的间隔宽度之比。有一个具体例子,当介电常数为12.8,频率为60GHz,金属带线为铜时,在中心导带一个较宽的变化范围内,共面线的损耗(介质损耗约占10%,主要为导体损耗)低于微带线的总损耗。如用特性阻抗表示,共面线的损耗在较宽的阻抗范围内损耗比微带低。最低损耗发生在共面线特性阻抗为60Ω时。如果低于60Ω,共面线损耗也会高于微带,微带最低损耗发生在微带特性阻抗等于25Ω时。以上这些数据虽然都是在特定条件下的计算结果,但可以看出共面线损耗天生高于微带线的结论并不可信。

单片集成电路的基片目前多为GaAs单晶片,经过掺杂等半导体工艺,形成多层结构,其中有源层是有耗介质,在计算传输线色散特性与特性阻抗时,介质损耗不能略而不计,这就使计算过程变得复杂。目前计算方法已解决,但公开发表的计算结果不多,尤其是集成电路的线间耦合影响、不连续性模型等三维电磁问题的计算结果,公开发表的数据尚不多。单片集成电路依靠CAD,故传输线问题尚有大量问题待研究。

五、毫米波测量

当前国际毫米波测量发展方向是自动化,数字化,宽带化。有半个世纪历史的调

量线不断被多种类型的网络分析仪(标量、矢量、自动、半自动)、六端口反射计及频谱分析仪所取代,最高工作频段已进入75-110GHz。毫米波测量方法也日新月异在进步。但遗憾的是越是频率高的仪器,在国际上越是对我封锁禁运。作者认为,当前我国毫米波测量仪器首先应抓Ka波段到W波段的扫频源,固态的、电真空的能上就上。关于测量仪器可以重点开发六端口结反射计,因为技术基础较好,研制周期比网络分析仪短,价格也较便宜。但开发六端口结反射计,毫米波高性能Schottky二极管要跟上,六端口结材料供应及参数测试要跟上,最后校准标准要跟上。

参 考 文 献

- [1] B.W.Jackson, IEEE Trans. on MTT, p.1450-1456 Dec. 1986

毫米波技术的回顾与展望

薛良金

(成都电讯工程学院应用物理所)

一. 导论

近年来,电子武器研制部门对毫米波频段的兴趣普遍出现一种复苏趋势。有关这一频段的器件,元件及收发系统的研究取得了重大进展,其中相当一部分成果已用于雷达,通讯,辐射计,遥感,导弹制导以及射电天文和频谱学方面。很明显,毫米波的开发与利用已成为无线电电子学发展的一个重要方面。

在电磁频谱中,毫米波介于微波和红外之间,其频率范围是30-300GHz,对应波长为10至1毫米。美国电气和电子工程师协会(IEEE)根据频段特性,曾颁布40-300GHz为毫米波段,而把100-1000GHz称为近毫米波(Near millimeter waves)。由此可见,毫米波频段的高端实际上已与光学中的“极远红外”(Extrase far infrared)相重。

毫米波的发展由其本身的特点所确定。其中,短波长,宽频带以及与大气成份的相互作用是促进毫米波发展的三个基本因素。

与微波相比,毫米波的波长较短。因而其设备尺寸小,重量轻,机动性好。这些特点正是导弹和各种飞行器所必须具备的。同时,在同样口径的天线下,短波长能实现窄波束,低副瓣,进而在目标跟踪和识别上能提供极高的精度和分辨力,能提高低仰角下的探测和跟踪能力而不出现严重的地面杂波干扰。窄波束还可提高隐蔽和抗干扰能力,天线增益的提高也使对发射机功率和接收机灵敏度的要求降低。

一个12厘米直径天线,在94GHz时能获得 1.8° 的波束,而在10GHz时它的波束宽度将增大十倍。由此可见,与微波雷达相比,毫米波雷达的分辨能力将大大提高。

根据大气衰减特性,毫米波频段有四个大气“窗口”,它们是35, 94, 140和220GHz,对应可用带宽分别为16, 23, 25和70GHz。由此可见,这些频段几乎可以把包括微波在内的所有低频段容纳在一窗口之中。

利用这些宽频带特性,在雷达系统中可用窄脉冲和宽带测频获得目标的细部特征,或在通讯系统中传输更多的信息,为更多用户提供互不干扰的通道,并能对各种应用系统提供高质量的电磁兼容特性。

与光波或红外相比,毫米波在传输窗口的大气衰减较弱,夜间也能照常工作。特别在烟尘等战争环境或云雾等恶劣气候条件下,毫米波有较强的穿透能力,因而具有准全天候的工作性能。反之,利用大气对毫米波的吸收还能进行保密通信和使雷达战获得良好的隐蔽特性。

二. 毫米波源, 传输线和元部件

人们最初的目的只是提供能供检测用的毫米波源。例如,1895年P.N.Lebedew报导了用谐振腔从火花放电器中筛选出了6毫米波长的能量,1896年Lampa用同样的方法检测出的能量达到了4毫米波长,1920年A.Gingolew和Arkadiewa发表了介绍毫米波频谱仪的论文,并用粒子团的辐射产生了毫米波。尽管如此,由于这些毫米波源的相位是不相干的,因而当用适当的谱仪器中选出一狭窄的频谱时,其谱仪器的制作是相当困难的。

第二次世界大战期间,厘米波技术得到了迅速发展,先后研制出了10厘米,3厘米和1.25厘米波长的雷达设备。在战争中,前两种雷达对于预防敌机空袭和提高空军的夜间作战能力作出了重大贡献。从作战效果考虑,1.25厘米波长设备不如前两种波长的设备好,因为必然存在的大气水汽汽谱吸收将会使这种设备的工作距离受到限制。战争的冲击使40年代后期的研制工作向9毫米频段发展。现在看来这个频段是一个可以实际利用的“窗口”频段。

1.25厘米设备虽然在战争中未派上用场,但研制过程中所积累的资料以及此后在更短波长上卓有成效的研究所取得的成果,对战后十年微波频谱的开发起了显著的推动作用。在此期间,谱仪信号源制造者R.H.Ohl与频谱学家W.Gordg协作完成了6毫米到0.5毫米整

个频段的测量工作。

事实证明，电磁频谱中一个新频段的开辟和利用必须具备两个基本因素，必须研制出相当功率的相干信号源和验证它们在科学上，工业上或军事上应用的可能性。正是由于确经证实的应用基础不足，加之60年代初激光和红外技术的兴起，才使得毫米波技术的发展暂时进入了一个低潮时期。

毫米波源主要分为两大类，电真空器件和固态源。目前毫米波源研制的频率已覆盖整个毫米波频段。

毫米波电真空器件有慢波型和快波型两种。前者如速调管、磁控管、行波管和返波管等。它们发展较早，主要是由相应的微波器件缩小结构尺寸得到，因而原理上不反映新技术。尺寸的缩小可提高使用频率，但同时也使功率容量降低。有些器件由于制造公差无法达到，实际上是无法实现的。因此这些器件大部只能在毫米波段的低端使用。此外，毫米波磁控管的工作寿命也比较短，一般最高工作频率可达到100GHz，其峰值功率为1千瓦，而寿命只有100-200小时。在慢波型器件中，EIO(Extended Interaction Oscillator)是一种很有希望的管种，由于它的电子束不取决于频率的机构来收集，因而使用寿命可望比磁控管高一个数量级。

返波振荡器(BWO)也是常用的器件之一。这类器件的频率分布从厘米波中段一直扩展到毫米波与亚毫米波段。其功率分布一般为数十和数百毫瓦，特点是具有较宽的调谐范围，甚至可在整个波导频段内调谐，还可作一般信号源使用。回旋管(Gyrottron)因能产生极高的脉冲功率和连续波功率，近年来已受到普遍重视。对这种器件的研制工作已进行多年。有关这个课题和相对论电子学方面的详细资料，可以参考“*Infrared and Millimeter Waves*”第一卷。概括地讲，目前回旋管已经复盖整个毫米波频段。它能以大于30%的极高效率提供数兆瓦的脉冲功率和数十瓦的连续波功率。通常，回旋管需要很高的工作电压(60-100千伏)和很强的磁场，后者意味着需要性能特别优良的磁钢。因此，回旋管所要求的磁屏蔽和电源条件是极为苛刻的。另一个问题是此类器件的输出结构一般都是用圆波导的TE₀₁模，因而必须转换至常用矩形波导使用。

毫米波技术的迅速发展自然和固态源的利用分不开的。相对于电真空器件来讲，虽然固态源提供的功率不大，但它们的总体尺寸比较小，而且所要求的电压和驱动功率比真空器件要小得多。过去几年，固态源最明显的改进是输出功率和可用频率的提高两个方面。另外，还有一些看来不那么突出，但对毫米波系统却很重要的改进，包括频率稳定和相位锁定的信号源，注入锁定的IMPATT放大器和Gunn倍频振荡器。

这些进展使电子武器设计师有可能把全固态脉冲压缩和相干动目标探测雷达的工作频率提高到94GHz。同样，全固态接收机也正在向200GHz的频段延伸，全固态有源辐射计的工作频率至少可扩展到140GHz。

体效应振荡器也称Gunn振荡器。1963年由IBM研究所的J.R.Gunn发明，1967年用外延生长法制成了实用Gunn管。此后对它的研制和生产迅速发展，并已作为一种固态振荡器成功地代替了小功率速调管。由于Gunn振荡器的频谱比较纯净，在4-60GHz范围内已广泛用作接收机本振，信号源以及小功率发射源。目前砷化镓体效应振荡器的连续波输出功率，在40GHz时约为200毫瓦，在100GHz时约为20毫瓦。砷化镓材料更适用于毫米波频段工作，估计它的工作频率极限可达120GHz。

雪崩二极管(IMPATT)是另一种常用的毫米波固态器件。硅和砷化镓是它们的两种重要材料，但硅的频率特性更好。砷化镓在频段高端的效率较低，56GHz时约为8%，60GHz时下降到4%。而硅在上述频率下能保持8-9%的效率，雪崩振荡器有比耿氏振荡器高的输出功率，因而常用作主动式制导的发射机。但其噪声较高，微经滤波后偶尔用作接收机本振。

单个固态器件的输出功率一般受散热和阻抗限制。为了提高输出功率可采用合成技术。功率合成技术有四种类型：芯片合成，电路合成，空间合成以及上述三种技术的组合。电路合成又可分为谐振型和非谐振型两种。前者包括矩形和圆柱腔合成，后者包括桥路合成，圆波导合成，径向耦合腔和Wilkinson合成。

谐振型合成以窄带应用更为适合，其相对带宽约为2%，目前已作到200GHz。非谐振型合成以3dB电桥合成最为典型。目前已有60GHz合成器研制成功的报导。应用点接触合成

术可以在94GHz 得到40瓦的脉冲峰值功率, 合成效率可高达80-90%。

在毫米波段, 电磁波在有界空间—传输线中的传输也与其它频段不同。由于波长缩短, 金属波导损耗加大, 功率容量降低, 机械加工困难, 重复生产的一致性差, 因而在毫米波段寻找适合的传输方式成为突出的问题。

过模(Overmode Waveguide), 即波导尺寸远比只用于传输主模时的尺寸大的波导, 可降低衰减和提高功率容量。但制造中的不连续性和不均匀性会造成不必要的模式转换, 它消耗主模能量从而降低传输功率。同时由于各模式的相速不同, 还会造成信号的失真。

毫米波系统需要各种适用的而且便于集成的技术。微带(Microstrip)和鳍线(Fin-line)等平面或准平面传输线都具有这种特点。但在100GHz以上这些波导的损耗明显增大。介质波导, 如镜像线(Image line), 绝缘镜像线(Insulated image line), 可降低传输线中的欧姆损耗, 但由于它们是开放型结构, 在弯曲或不连续处容易产生辐射和不必要的耦合, 而且与有源器件的耦合也有困难。H-波导(或Groove波导)由夹在两平行导电板之间的介质条组成。它的 PM_{10} 模有特殊的场结构, 因而波导的衰减能随频率的升高而降低。这种情况类似于圆波导中的 TE_{01} 模, 因而使用频率可以高达300GHz。

以上各种波导目前尚未达到完善的地步。现有波导的真实状态离我们的要求还有不少差距。因此, 为了提高毫米波元件以及系统的竞争地位, 寻求一些性能优良, 电路制作容易的传输媒介就显得十分必要。

有关元件的研究正在加紧进行。耦合器, 移相等工作频率已可超过100GHz。然而, 由于传输线的衰减较大, 这些元件的插入损耗比较严重。特别是磁性器件(如隔离器, 环行器等), 在10--15dB隔离度下可以达到140GHz, 再往较高频段拓展就会因其尺寸太小和材料损耗而受到苛刻的限制。与十多年前的情况相比, 毫米波混频器的噪声温度已下降了一个数量级。低噪声混频器的进展已为提高雷达, 通讯和其它毫米波接收系统的性能向前推进了一大步。

毫米波天线正向两个方面发展: 射电天文和卫星通信使用的大而精密的面天线和适合于战术导弹使用的小天线。后者用介质波导或周期结构产生辐射的电扫描, 以具有特定的方向图或具备特殊的搜索能力。用介质镜像线制成的单脉冲天线可以用到95GHz。

还必须指出, 为了适应高空飞行体的需要, 所有毫米波元件和天线, 还必须保证能在剧烈振动, 高温, 高加速度等恶劣环境条件工作。

三. 毫米波系统

毫米波应用系统遍及电子武器, 诸如雷达, 通信, 制导和电子对抗与反对抗的各个方面。此外, 它在射电天文, 受控热核反应以及生物医学方面也有着广泛的应用。

毫米波雷达的发展是鼓舞人心的。因为天线孔径决定了波束宽度, 毫米波雷达的波束窄, 因而能提供高质量的水平分辨率; 同时, 利用高的重复脉冲可作成象应用; 此外窄波束也使敌方难于拦截和干扰。

目前的毫米波雷达主要用于近程目标的高精度分辨和识别。例如, 装在直升飞机上的目标收集; 对低空飞行器, 导弹和地面目标的探测; 近程武器的火力控制以及外层空间对卫星和其它飞行目标的探测等。这些雷达一般采用双频(35和94GHz)工作。在民用方面, 毫米波雷达的应用包括港口或市内的交通控制, 铁路枢纽的调度, 机场的地面检测和交通工具的防撞等。

采用固态源的雷达系统典型作用距离为3到10公里。

新近研制的雷达之一是名为STARTLE 的美军坦克控制系统(一种作为监视坦克方位和作战性能, 并能进行目标探测的雷达)。把这种雷达安装在坦克上就能同时在晴天或恶劣环境(如雨, 雾, 烟, 尘)下提供探测和跟踪目标(其它坦克和装甲车辆)的能力。两家相互竞争的承包商都已建成了这种系统的全固态样机, 其系统参量如下表。样机之一使用的是一部双模雷达, 采用相干动目标显示(MTI), 以探测径向移动和实现固定, 蠕动以及切向移动目标的区域性动目标显示。

STARTLE雷达系统参量

频率: 94GHz

波束宽度: 11毫弧度
平均功率: 0.1-0.5瓦
天线孔径: 35.56厘米
视野: $15^{\circ} \times 7.5^{\circ}$ (宽); $5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ (窄)
帧时间: <2秒
探测距离: 3000米 (在100米能见度下)
跟踪精度: 在2公里处为0.5毫弧度 (在100米能见度下)。

对导弹和火箭制导是毫米波应用系统最为活跃的领域之一。当前研究的重点在战术空对地导弹的末制导方面。在这类系统中,有效天线孔径是10.16--20.31厘米。因此,为了获得所需的窄波束,就必须使用30--140GHz的频率。考虑到毫米波的大气衰减特性,通常选用35或94GHz两个“窗口”频率。由于毫米波天线具有窄波束,高分辨率以及小的地物杂波,从而使导弹的终端制导能获得准确的投放点。

导弹的寻的装置通常有两种工作方式:主动式和被动式。前者实质上是一种搜索雷达,适宜于远距离寻的;后者基本上是一个辐射计,适用于近距离寻的和跟踪。目前,用两种方式组合的寻的器已研制成功。开始时用主动寻的,当接近目标时锁定在一个合适的距离上。当目标的反射,多路径干扰或其它因素使主动寻的器无法工作时,便自动转接到被动寻的器工作。这时得到的信号是经目标反射的空间辐射。

被动寻的器对信号处理有特殊要求。因为目标的背景(如河流,平坦路面等)会反射回来与目标反射同样,甚至更多的能量,因而要从不同背景中区别出金属物的反射信号。一旦捕捉目标以后,寻的器还要控制导弹姿态,以保持目标在自己的视野范围之内。美国陆海空三军和国防部高级研究计划局对毫米波制导技术非常重视。研究机构有陆军军械研究和局,陆军导弹实验室,空军反装甲武器系统规划局等。为了加强毫米波制导技术的统一管理,美国还成立了执行委员会,由国防部研究与工程副部长兼委员会主席。

美国空军早在1975年就与 Woneywell 签订合同,开展战术毫米波反导弹系统的设计和研制。目前的工作主要是研制空空,空地导弹用的双模寻的器,即主动式雷达和被动式辐射计组合或主动式雷达和被动式红外传感器组合等,以增强恶劣环境下的制导能力。

美国海军1978年开始研制用于17.78厘米直径的空一空导弹的双模制导技术,其中主动式寻的器采用毫米波技术,被动式寻的器为微波接收方式。把这些寻的器用在空地导弹上,是一种非常有效的现代雷达武器,用来消灭雷达和制导雷达。

美国陆军和国防部高级研究计划局在1978年4月与 Sperry 公司签定了空地反装甲武器的毫米波制导技术研究合同。该公司还接受了美国国防部提出的空地,地地导弹(用于反装甲群)用主动/被动式制导技术的研究课题。

近年来,美,苏,英,法等国研制的毫米波制导武器有数十种,其中大都用于对付坦克和装甲目标,包括反坦克弹,遥感反装甲弹,制导炮弹等。此外,作为战略弹道导弹,战略巡航导弹,反弹道导弹的毫米波制导系统,也已取得重大进展。其中毫米波制导的反弹道导弹由于有很高的命中精度,从而有可能使用非核弹头,改变迄今为止以核弹反核弹的反弹道导弹的发展现状。

毫米波制导系统大量生产的主要问题是成本太高,特别对于一次性使用的导弹和炮弹制导,由于使用量大,生产费用高而难以承受。降低毫米波制导系统成本的主要途径是采用混合集成电路和单片集成电路。近年来,美国一些厂商在毫米波混合集成电路方面做了不少工作,如Hughes公司为制导系统研制的50--94GHz低成本雷达,作用距离300米,价格只有200-800美元。为了实现更低的成本,美国军方和一些公司都在努力发展GaAs毫米波单片集成电路。如Alpha公司和喷气电子系统公司已决定联合投资,发展制导炮弹用的毫米波单片集成电路。这点,从87年MTT年会上也能清楚看出。

毫米波通信是近年来国外通信开发的主要频段。其主要原因在于:(1)通信容量大,可以作到图象,数字,话音兼容,数模兼容。因为工作频率高,设备的绝对带宽就宽。例如,在300GHz的工作频率上,1%的相对带宽就有3GHz,而在3GHz工作时,1%的相对带宽只有30GHz。众所周知,带宽宽意味着通信系统中传输的信息量大。毫米波通信容量可比厘米波高1-2个数量级,因而为高速大容量通信提供了一条可贵的途径;(2)相对来讲,系统体积

小,重量轻。由于采用全固态结构,因而可以采用低压供电,而且可以比红外和激光具有更好的全天候工作能力;(3)保密性能和抗干扰能力胜过其它频段的设备。

毫米波通信包括地面通信和卫星通信两个方面。前者要求小天线,窄波束。这类系统可以进一步分成载波频率选在低大气衰减区,即“窗口”区(30-40, 75-110GHz)和高大气衰减区(60GHz左右)两类。第一类可以使信号衰减至最小,而第二类则能提供高度保密性能。

国外已研制成功的一种点对点通信系统是工作在30GHz的短距离(9-37公里)双向系统。35GHz的铁路通信系统也已研制成功。

频率选在大气衰减较大的区间时,信号穿透能力低,而且可以隐蔽工作。当然,对某一个给定的频率来说,这种系统的设计需要留有更大的余地,即必须使用更大的发射功率和增益,灵敏度更高的接收机,以弥补大气衰减造成的损失。把窄波束和高衰减作通盘考虑就可提供可靠通信。这种通信在被拦截和干扰环境中工作时具有相当大的自由度。

近年来,毫米波技术的突出成就之一是有关卫星通信网的研究。美国国家航空与宇宙航行局(NASA)和军事服务机构已进行过大量的分析和实验装备的研究工作。

早期在30到35GHz之间的卫星通信实验已通过NASA的应用技术卫星及其地面站完成。星-星之间的中继网络也已完成设计,而且为了防止地面接收机的拦截,大部分空间网络都采用大气衰减很高的60GHz频段。稍后,工作于37GHz的星-星网络在Lincoln建成,并成功地完成了轨道运行实验。一个与Lincoln同样的卫星1976年3月被送入地球同步轨道工作了好几年。这些卫星都有一种可以控制的,波束宽度大约 1.2° 的天线和一台能提供0.5瓦输出功率的雪崩放大器。这样,就可以在40000公里高空使用10kbit/s的网络。

最近还考虑过很多卫星网络,其部分原因是由于频谱拥挤,成本有利和满足防卫上的需要。可以预言,毫米波卫星通信在不久的将来将会有更大的发展。

基于此,美,日,欧洲共同体都投入了相当力量从事毫米波通信的开辟工作。美军电子装备规划部81年对毫米波通信的投资经费已超过两亿美元。目前已定型的系统有美国AN/GRC-209通信系统,法国Tomson TFH720移动电台,美国海军研究室研制的舰艇秘密通信收发机。

另据报导,频率58.5-60.1GHz,码速200Mbit/s,通信距离5公里,采用FSK方式工作的保密通信和美国国防部与其10公里范围内附属部门之间的保密通信设备已投入使用。有关毫米波星-星,星-地通信,在“Infrared and Millimeter Waves”Vol.9, chap.1, P73-89中有详细报导。

四. 对国内毫米波研制现状的估计, 结语

我国毫米波频段的开拓也经过几次反复。1979年,在有关部门的领导下,在石家庄举行了第一次年会。之后,“毫米波热”迅速扩展。8毫米辐射,炮弹测速雷达先后制成。经过“六.五”的努力,导弹末制导,通信原理样机,成像技术都在不同程度上取得了良好的结果。器件,元件,材料的研制陆续在全国数十个单位展开。毫米波年会86年三月已在上海举行了第三届。不少理论成果也陆续在各种期刊杂志上出现。可以说,这一频段的复苏趋势在我国也得到同样反应。但目前的情况是基本电路还都是低水平的全面重复。由于基本关键电路不配套,可靠性差,天线对准问题尚待解决,就给系统研制工作造成了不少困难。另外,元器件研制工作未能很好跟上,国外对我禁运也给系统研制增添了许多麻烦。突出的问题是测试仪表缺乏,少数转手进口的设备也很不配套。此外,资金分散等也是一些客观原因。这样,就导致当前形成的都想上都不能上的局面。

毫米波频段开辟的关键技术在于高频段前端,中放以后的终端可以借用现有技术,高频部件包括接收集成前端和功率合成技术。单项技术有高稳定振荡器,高性能混频器,线性调频源,控制电路(开关,移相器,调制器等)以及隔离器,环形器,放大器等。这些单个部件,经过“七.五”其间各个部门的努力,估计某些方面会有较大的突破。

综上所述,我们可以结论如下:毫米波是急待开发的频谱之一。从二次世界大战期间提出毫米波到当今的实用阶段,曾经经历过激光的冲击和信号源跟不上而冷落下去的阶段。鉴于激光系统对恶劣环境的适应不如毫米波,加之毫米波半导体器件的突破,使得它在70