

毫米波系统中的集成电路*

薛良金**

(电子科技大学物理应用所 成都 610054)

【摘要】 讨论了毫米波精导武器和信道化接收机中的集成电路。低成本和批量生产能力是对这类系统 RF 硬件提出的主要要求。可以采用两种方式,即混合集成和单片集成来实现这些硬件。说明为了获得最好的性能价格比,将混合集成和单片集成技术综合使用是一种值得推荐的模式。

关键词 毫米波系统; 集成电路; 混合集成; 单片集成

中图分类号 TN454; TN773

毫米波频段是目前军事电子技术开拓的主要频段。精确制导和寻的雷达、电子战及军用卫星通信发展极为迅速。毫米波精导武器(PGW)和精导炸弹(PGM)、侦察雷达和电子战测频系统已成为西方武器装备的重要组成部分。精导武器攻击的目标包括坦克、军械库,装甲运输车辆,自行榴弹炮、防空系统以及混凝机场跑道等。海湾战争和最近北约对南联盟军事攻击的战例表明,这一类武器具有极高的命中率。

高杀伤概率武器除必须具有强大战术摧毁力外,还有诸多因素必须考虑。其中之一是由于敌方地面火力可能以极为迅速的手段先发制人,因而必须采用精确制导手段迅速加以抑制。虽然精导武器的投入比非制导武器或常规弹药要高,但从它集检测、跟踪和摧毁目标,即所谓发射后不管(fire-and-fergot)的综合战术能力考虑,这类武器更具成本效益优势。

毫米波系统研制面临的主要问题是可靠性和低制造成本。1985年6月MTT年会的mmW专题研讨会上,美国TRW公司的Horton和Oxley曾经指出“毫米波技术的成功发展和应用取决于RF元部件低成本生产的可行性”。在一定程度上讲,初期分立电路成本过高曾经给系统装备带来阻力,特别对一次性使用的弹载系统更是如此。为了保证毫米波系统的小体积,轻重量和高可靠性,并尽可能实现低成本批量生产,毫米波元部件和子系统一直沿着波导立体电路→混合集成电路→单片集成电路在向前发展。现今,国外装备的毫米波弹载系统采用的都是混合集成技术,而且Ka频段的开关,混频器,放大器已有商品性单片电路可供。一些多功能组件,如本振-混频-前中组件,也已有单片成果报道。美国军方已将500美元的制造成本作为实用导引头单片的最终成本目标。

为了寻求一种有生命力的解决方案,美国国防部(DOD)高级研究计划局早在70年代初就安排了一大批有关毫米波平面电路和子系统的预研项目。由数十名专家组成的平面电路研制小组,开展了包括基片材料,器件,元部件和组合电路的研制工作,完成了数百页研制技术总结报告。

毫米波长短,频带宽,与大气相互作用比微波更为严重。因而其系统具有波束窄,精度高,抗干扰和战时生存能力强,系统体积小,重量轻,而且具有穿透云雾、烟尘能力。相对EO/IR传感器,它能提供不受气候和环境制约的武器系统。毫米波技术的发展一直受军事需求牵引,其中精导武器是它最为活跃的应用领域。

国外从70年代开始了对毫米波精导武器的研制,80年代已有大量文献资料和研究成果报导。西方各国的一些主要军火公司,如Hughes M/A-COM, Alpha, Boeing, Maconi, Thomson-CSF, MARTIN, Toshiba以及俄罗斯的一些研究院所都投入相当人力物力从事这方面的技术开发工作。不少型号如SEA TRACS, FLYCATCHER, mini-RPV, STARTLE等警戒与目标拦截雷达, TRASK, SEA ARCHER, TRS906等火控跟踪雷达, Wasp, SADARM, STAFF,“长剑”, SA-10等导弹上的制导雷达,以及数十种型号的毫米波电子战系统都已经装备部队。

1999年3月14日收稿

*国防科工委预研基金项目

**男 63岁 大学 教授

对于毫米波系统, 特别对 PGW 传感器来说, 关键问题在于它能否在可接受的价格和规定期限内形成批量生产能力。这正是本文讨论毫米波集成元件和子系统的前提条件, 只有这样, 传感器的批量装备和成本目标才能得到满足。

1 毫米波集成电路

在 mmW 系统中, RF (或前端) 电路都由一些无源和有源功能部件组成。

从国外的发展过程和国内十余年的实践经验来看, 毫米波功能部件和子系统低成本批量生产必须采用集成技术来实现。有关集成电路在毫米波系统中的地位问题, 已有不少作者作过评述。Cardiasmenos 是低成本接收机平面电路的早期倡导人^[1], Kuno 也提出过“最终要学会如何重复制造毫米波部件(特别是 IMPATT 源), 以及如何把现有功能部件组合成多用途的雷达传感器”问题^[2]。Poul 介绍过一种 60 GHz 在 Gunn 振荡器基础上自混式“低成本”传感器^[3], Seashore 和 Singh 对精导武器中毫米波 ICs 作过详细的综合介绍^[4]。现在的问题是这些主张应得到系统设计师和主管部门的认可。这是因为在相当长的一段时间, 他们都认为建立在大批量、高性能和低成本基础上的毫米波元件的实际生产能力尚不具备。

集成电路包括混合集成(Hybrid Integrated)和单片集成(Monolithic integrated)。表 1 从工程应用角度把这两种集成电路特性作了对比。广义上讲, 混合集成代表的是“目前”方法, 而单片集成则被看作是“未来”的方法。它们的共同特点是所提供的收发系统必须以平面形式在单一基片上实现, 并尽可能多的实现多种功能的组合。在毫米波频段, 实现器件和电路的混合设计是一种难度很大的工作。这是由于相对于成熟的低频模拟和数字集成电路设计来讲, 毫米波频段器件和材料条件尚不够成熟, 致使集成电路设计更为困难。

表 1 混合集成和单片集成电路特性比较

混合集成	单片集成
1) 绝缘基片上制作 RF 电路, 并在规定位置焊装半导体器件;	1) RF 电路和有源器件都在半导体基片上一次集成
2) 在保证低成本制作前提下, 电路设计相对比较灵活;	2) 在半导体基片上实现多功能电路组合;
3) 整体电路集成之前, 模块中每个功能部件可以单独计算、制作和测试;	3) 批量生产成本低, 但研制期内投入资金多;
4) 相对研制经费少。	4) 工艺难度大, 单个功能部件检测困难。

根据精确制导系统的要求, 毫米波集成电路设计应遵循如下原则: 1) 系统中 RF 功能模块应最大限度地采用 IC 技术实现; 2) 应针对多部件组合功能模块设计, 以便最大限度地利用基片面积; 3) 在平面几何图形确定的前提下, 采用特殊材料和梁式引线封装技术, 实现最小体积和重量; 4) 波导接口应减至最少, 以保证战术环境下的高可靠性; 5) 为消除高劳动强度手工操作引入的不一致性, 提高电路成品率, 应制定电路组装和测试方案。

在现有技术和工艺条件下, 采用混合—单片组合技术是实现毫米波 RF 前端电路的一种最佳选择。而且, 由于实际系统组成和性能指标上差别很大, 采用上述组合电路无疑会带来极大方便。

2 混合集成技术

如前所述, 武器装备中的毫米波集成电路必须具有低成本和批生产能力。对于混合集成方案, 选择传输媒介的原则应是能保证电路指标并可实现多功能电路组合。这就意味着可以用一块公用基片同时制作有源和无源电路。很多传输媒介, 如微带、鳍线、共面线、介质镜象线都是毫米波混合集成电路潜在的选择对象。表 2 是这些集成传输线的定性比较。表中所列数据表明, 介质镜象传输

损耗最低,但它难于同时集成有源和无源部件。而且,由于镜象中传输的不是 TEM(或准 TEM)模,电路分析和最佳设计都很困难。共面线和鳍线是有实用价值的集成传输线,但它们不是真正的平面结构而是准平面结构。因为它们的实际电路都以带波导腔的形式出现。微带在毫米波高端损耗较大,但在充分考虑高次模影响情况下,可以实现有源和无源电路的同时集成,其工作频率也可高达 100 GHz。

对于精导武器中的毫米波收发系统,为便于加工制作、提高成品率和降低制造成本,选择软基片材料比较合理,可供选用的毫米波基片材料有多种,但人们普遍采用的软基片材料是 Duroid,其最佳基片厚度按最低 TM 模截止频率考虑,在 Ka 频段(26~40 GHz),这种基片厚度为 0.254 mm,而在 W 频(75~110 GHz),Duroid 基片的最佳厚度为 0.127 mm。表 3 是几种基片材料在 94 GHz 时对 50 Ω 微带线的实则损耗数据。

表 2 毫米波集成传输媒介的定性比较

特 性	集成传输媒介			
	微带	共面线	介质镜像线	鳍线
传输损耗	中等	高	最低	低
工作频率/GHz	高达 100	< 20	> 70	30~100
特性阻抗范围/ Ω	20~125	40~150	— 26	10~400
辐射损耗	低	高	中等	低
色散	低	高	中等	低
多模情况	潜在多模	多模	严重多模	潜在多模
有源、无源器件兼容性和集成性	1)困难 2)容易	容易	1)难 2)难	容易
成本	低	低	中等	低

表 3 对几种基片材料微带线损耗测量值¹⁾

基片	介电常数 ϵ_r	损耗测量值
石英	3.78	1.1
Duroid	2.22	2.7
Cu-clad217	2.17	2.5
Cu-Flon	2.00	0.9

注: 1) 微带 $z_0=50\Omega$, 基片厚度为 0.127 mm, 频率固定在 94 GHz 上测量。

在毫米波频段上,软基片微带的色散特性可用谱域方法进行精确计算^[5]。也可用一些近似方法来处理^[6]。对于 $\epsilon_r=2.22$ 的 Duroid 软基片,近似计算和实测结果误差在 5% 以内,从而确定了这种软基片微带可以在一定精度内延伸使用到 30~100 GHz。因此,在毫米波收发电路中,微带作为一种电路排列紧凑,电性能和制作成本都具优势的传输结构是很有用的。当然,由于上述传输线都有它们各自的优点,故在电路设计时用其所长,将它们组合使用是值得推荐的一种手段。

鉴于现有商品性毫米波测试设备都采用标准矩形波导作为输入接口,因而毫米波部件性能检测必须采用低损耗转换装置与之连接。宽带转换接头可以采用多种渐变器实现。在 Ka 频段,这些转换器的 SWR 已可作到 1.2,插损 0.3 dB 左右,在 W 频段,驻波 1.25,插损 1.0 dB 的结果已有文献报道^[7]。

微带线的低阻抗特性对匹配低阻抗封装毫米波 Gunn 器件十分有利。输出 CW 功率 300 mW 的机调微带 Gunn 振荡器已有报道。采用硅变容二极管作调谐器件的 Ka 频段 Gunn VCO 已能实现 2GHz 调频带宽,若用 GaAs 变容二极管,其调谐带宽可以作到 4 GHz。

图 1 表示利用软基片 Duroid 研制的 35、60 和 4 GHz 微带 Gunn 振荡器测量数据。在设计 60 GHz 以上集成振荡器时,Bosch 指出此时振荡器的工作模已不是基模。因此,在 W 频段二极管振荡器设计时,必须仔细分辨它的工作模式,并对不希望的工作模式予以合理抑制。

毫米波混频器已在几个频段得到实现。通过电路的最佳化设计,利用 GaAs 梁式 Schottky 二极管,针对最小噪声系数和最小本振注入功率对电路阻抗进行匹配优化,是这类混频器的设计关键。

图 2 代表这类混频器 Ka、V 和 W 频段所得的测试结果。图中所示指标对雷达接收机已经足够,但对辐射计还有些不足,除非同时在带宽和综合时间两方面都有所提高。

由此可见,软芯片微带可以有效地用来制作单信边或多信边平面接收机和实现短距离雷达的固定 Gunn 本振源。

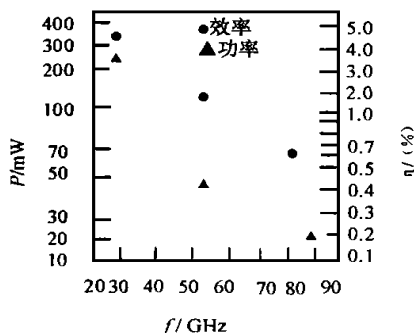


图 1 毫米波微带 Gunn 振荡器输出功率和频率随率的变化关系

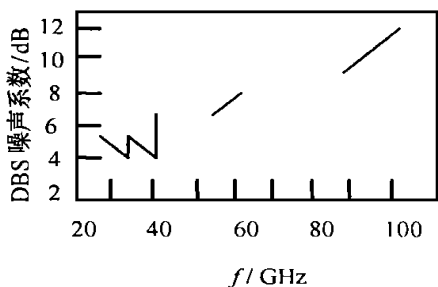


图 2 毫米波微带混频前放的噪声系数

3 单片集成电路

以 GaAs 半导体基片为基础的单片集成电路正从微波频段向毫米波频段延伸。美军早在 80 年代初已对许多基础性研究工作作过安排。Temml 也已对单片集成电路特点作过综合研究,并得出了单片技术在成本,体积,重量和性能等方面的优势。前已指出,这些优点只能在一块单一基片上集成多个功能部件时才能在毫米波频段体现。生产高性能单片集成电路产品的重要因素是:高质量器件;高性能无源部件;有源和无源元件值的分配;元件对电路特性的敏感程度;芯片尺寸。

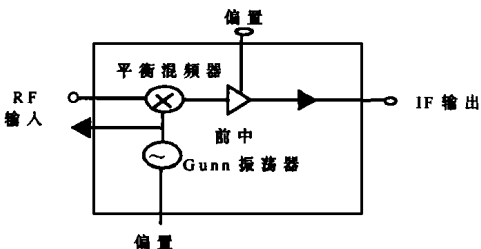


图 3 FMCW 或脉冲雷达中的单片下变频器

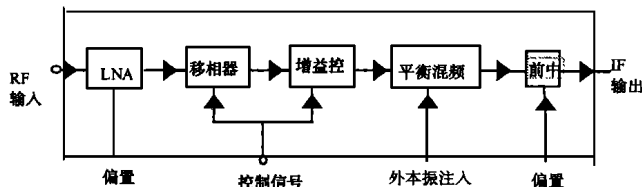


图 4 相控阵雷达中的单片接收模块

毫米波接收系统的关键单片模块见图 3。这种芯片结构包括 Gunn 振荡器、功分器、Schottky 平衡混频器以及以级联 FET 为基础的前置中频电路。对于采用超外差接收的各种毫米波传感器来说,这是最基础的模块。相控阵雷达中的单片接收模块示于图 4。这是一种以三端器件为基础的电路,因而只有在 FET 器件突破毫米波频段制约极限之后才能实现。这类 RF 组件是构成包括更为复杂的 T/R 模块在内的相阵接收机的核心。

单片电路的另一个例子是由 Chao 在 Honeywell 上报导的 35GHz 单片平衡混频器。它采用一块 1.27 cm × 1.09 cm 的混频器芯片在 31 ~ 39 GHz 频带内获得的双边带 NF 小于 6 dB。这就为我们早先的预测提供了证明,即在毫米波频段,设计优良的单片集成电路在电性能上可以与对应的波导结构指标相比拟。这样,采用分立波

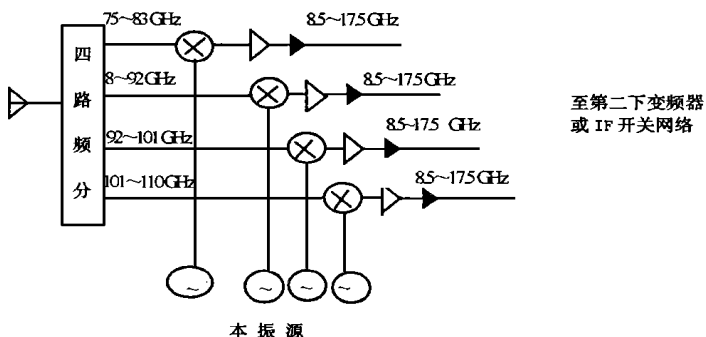


图 5 W 段单片接收机原理图

导电路所能获得的指标就可以作为毫米波单片电路最终能否在武器系统中应用的参考标准。

图 5 是 80 年代末的研制的一种宽带 W 频段信道化单片侦察接收机的组成方块。它由一个四信道频分器, 四个平衡混频器, 四个 IF 放大器和 4 个本振源组成。所有这些元部件均以单片形式分别集成在三块芯片, 即一块四信道下变频芯片和两块双信道本振芯片上。它们完成宽带接收前端的局部功能。每个功能模块都应着重考虑性能, 低成本和批量生产的重复性, 其排列布局还必须与整个单片接收机前端布局保持一致, 下面介绍这些功能模块中的关键技术:

1) 四信道频分器(Four channel Multiplexer)

频分器的作用是把接收机的工作频带分成几个相邻但又分隔的信道。在宽带 EW 接收机中, 频分器的设计至关重要, 因为它应该使假目标引入的混频器交叉调制失真减至最小。在微波和毫米波频段, 通常采用的频分方法有图 6 所示的三种形式。

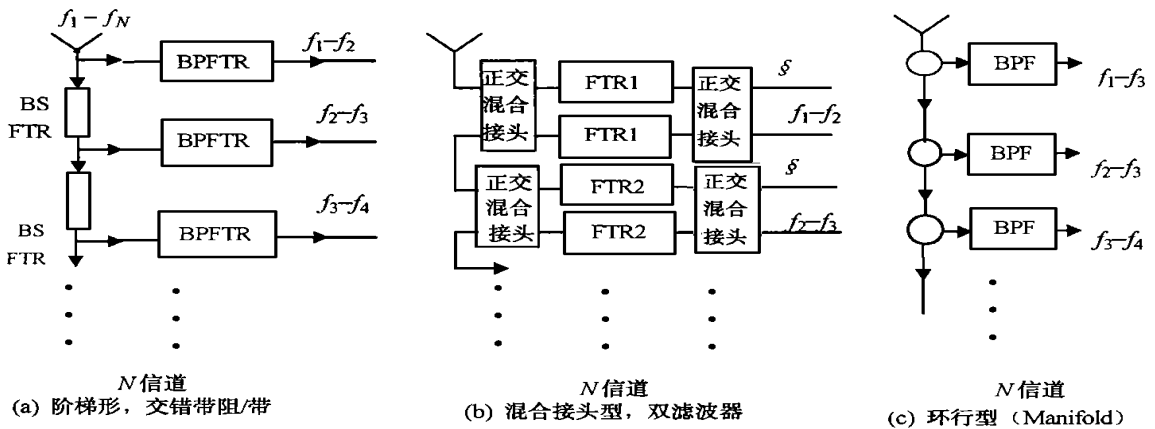


图 6 常用频分方法

采用环行器结构是频分器设计的一种传统方法, 对每个信道滤波器, 环行器的引入可以消除信道间的相互影响。这种方案的主要缺点是体积大、笨重、与单片制造工艺不相容, 而且环行器插损不可能做到很小。由于这些原因, 环行器频分器一般不在单片接收机中采用。

阶梯型和混合接头型频分器更适合于单片集成电路。在阶梯型结构中, 频分器由特定连接的双工器组成。双工器把输入频带分成两个子频带。一个理想的双工器由集总元件低通和高通滤波器构成, 并具有无限延伸的阻带和通带。实际平面滤波器一般都由半集总元件构成。在 W 频段, 由于阶梯型集总元件频分器损耗较大, 所以本接收机选择正交混合接头结构作为单片四信道频分器研制的基础。这类频分器的关键元件是 Lange 耦合器和带通滤波器的设计。

2) 朗格耦合器和带通滤波器(Lange Coupler and Bandpass Filter)

我们首先考虑朗格耦合器和边耦合滤波器。为了评估宽带单片电路特性, 需要首先设计一个低插损, 宽带微带一波导过渡, 针对 W 频段单片部件的情况, 本接收机采用的是波导—同轴—微带(WCM)过渡方案。在 75 ~ 110 GHz 频段, 两个背对背的 WCM 过渡探针的典型插损大致为 2 ~ 3 dB。所有部件的测试, 包括单片 Lange 耦合器, 滤波器, 频分器和混频器都利用 WCM 装架完成数据检测。

有关 W 频段四个频率通道, 即 75 ~ 83 GHz, 83 ~ 92 GHz, 92 ~ 101 GHz, 101 ~ 110 GHz 的 Lange 耦合器已完成设计, 制作和性能检测。所有 Lange 耦合器都在一块 0.10 mm 厚的 GaAs 基片上制作, 其空载线横向接至微带。这些耦合器的实测结果表明其插损大约为 0.5 ~ 1 dB。直通臂和耦合臂频响非常平衡。

针对每个信道设计的与腔边耦合带通滤波器也已完成研制, 以第一信道为例, 包括测试装架损耗在内的插损大约为 2 ~ 3 dB, 95 GHz 处的信号抑制电平(含插损)为 30 dB。

3) 频分器的设计(Multiplexer Design)

在耦合器和滤波器研制基础上,我们用 0.10 mm 厚的 GaAs 基片设计和制作了 W 频段的四信道单片频分器,其芯片尺寸为 6.22 mm×7.24 mm。每个信道都由 2 个 Lange 耦合器和 2 个平行耦合(边耦合)滤波器组成。隔离端口终端用 1 个接至 1/4 开路分支的 50 Ω (TaN 表面贴装电阻来实现。每个信道的平均插损为 5 dB,偏离通带 3 GHz 处的抑制大于 25 dB。

4) 离子注入单片平衡混频器(Ion-Implanted Monolithic Balanced Mixers)

此电路集成 1 个宽带 Lange 耦合器,1 个用作 RF 端的径向线分支,一对离子注入 Schottky 势垒二极管,穿孔片和 1 个椭圆函数低通滤波器。混频器芯片的总尺寸为 1.63 mm×2.44 mm。

Lange 耦合器用以改善混频器带宽。在混频二极管结处,一宽带 $\lambda/4$ 径向线提供 RF 短路。IF 和 DC 回路通过穿孔提供。一高阻抗的 $\lambda/4$ 段径向线组合用来抑制泄漏,而允许 IF 和 DC 通过。2 个 5 μm 厚的正方形焊片贴在穿孔两面以提高强度。低通滤波器离二极管结半个波长放置,它只允许 IF 信号通过。LO 和 RF 信号加到 Lange 耦合器的两个输入端口,此混频器无须 DC 偏置。

为了评估这种混频器的电性能,我们将它装在 WCM 测试架上进行测试。结果表明,以 10 dBm LO 推动功率,在大于 13 GHz RF 频带内,典型的变频损耗介于 6.8~10 dB 之间,DSB 噪声系数为 6.5~10 dB。

此单片混频器在 0.10 mm 厚的半绝缘 GaAs 基片上制作。利用离子注入 IF 和 FET 放大器单片集成技术,采用离子注入方法制作 Schottky 势垒二极管结构。离子注 GaAs 片成本不高,而且比多极器件对应的 MBE 和 VPE 方法更为均匀。

5) 宽带低噪声 IF 放大器(Broadband Low Noise IF Amplifier)

采用 MMIC 工艺制作的宽带单片低噪声放大器的芯片尺寸为 2.54 mm×3.35 mm。此放大器由三级构成,前两级均采用串联和负反馈。利用反馈方法以满足带宽要求并稳定 FETs。串联反馈降低等效噪声电阻同时增加其输入阻抗实部。在器件本征特性改变时,串联反馈会引起灵敏度下降,但它提高了 FET 器件的稳定度。在频带高端,串联电感可以补偿器件内增大的寄生参量造成的影响。负反馈会降低器件品质因数从而增加带宽。反馈回路中的电感可以对增益波动进行补偿,并改进反馈块的阻抗匹配。

为了满足增益和噪声系数的指标要求,所选择的器件是 0.5 μm×300 μm 栅的 MESFET。这种器件由 4 个是 0.5 μm×75 μm 栅指(gatefinger)组成,实测结果表明,在 7.5~17 GHz 频率范围内,增益大于 22 dB,噪声系数小于 4.5 dB。

6) 单片 Gunn 本振(Monolithic Gunn Local Oscillators)

在 W 频段信道化单片接收机中,高性能本振的研制十分关键。这组振荡器必须提供 10 mW CW 功率,频谱纯度应很高,而且应具单片制作能力。

从理论上讲,要从分立 Gunn 振荡器转变到单片结构并不困难。然而,由于 GaAs 材料的导热系数很差,而且 Gunn 器件的直流-射频交换效率很低,因而其有效散热就成了基本问题。本设计采用倒装芯片方案使单片 Gunn 振荡器获得最好的技术特性。已达到的指标为 96 GHz 上输出功率 7.7 dBm,72 GHz 上为 11.3 dBm,63 GHz 上为 13 dBm。这种单片 Gunn 振荡器频谱很干净。

4 单片信道化接收机的集成

只须用三块芯片就可把上述采用 MMIC 技术制作的部件集成为一宽带单片接收前端。此前端由一四信道变换器和两块双信道 LO 芯片组成。双信道振荡器芯片由 2 个倒装的单片 Gunn 本振构成。下变频芯片是一多功能 MMIC,尺寸为 9.65 mm×10.2 mm,包括 1 个四信道频分器,4 个平衡混频器和 4 个 IF 放大器。FETs 和 Schottky 势垒二极管均作在同一基片上。W 频段单芯片四信道频分器的重要特征是分隔频率。为了使传输线之间的耦合减至最小,本设计采用了一窄条桥结构作为 IF 信号对 W 频段 LO 传输线的正交交叉。

5 结 论

本文对毫米波系统,特别是精导武器和测频接收机中的集成电路作了概括介绍。低成本和批生产能力是对这类系统 RF 硬件提出的主要要求。可以采用两种集成方式,即混合集成和单片集成来实现这些硬件。为了获得系统的最好性能价格比,把混合集成和单片集成技术综合使用是一种值得推荐的模式。

能够供混合集成使用的毫米波二端器件,如梁式混频管、变容管、PIN 管,80 年代中期已在国外一些主要厂家(如 M/A-COM、Alpha、Thomson、Toshiba)大批量生产。进入 90 年代后,60 GHz 以下的三端器件,如 MESFET、HEMT、PM HEMT、InPHEMT,也陆续有商品性产品供应,而且 W 频段以下的三端器件单片电路,如 SPST、SPDT、Mixer,以及 60 GHz 以下的三端器件单片电路,如倍频器、低噪声放大器、功率放大器也已有商品性产品可供。目前总的趋势是建立高度自动化的制造和检测生产线,以便降低制造成本,减轻武器系统制造商的承受压力。进一步的工作是将整个收发系统(至少是接收前端)整体集成,以满足战术武器系统小型、轻量和高可靠要求。这些工作目前正在以 FET 结构为中心迅速展开。

参 考 文 献

- 1 Cardiasmenos A. G. Planar devices make production practical. MSN, 1979, 9(5): 46~56
- 2 Kuno H J. IS millimeter wave technology ready for systems? MSN, 1980, 9(5): 15~17
- 3 Kuno H J. Are millimeter wave systems affordable now? Microwave Journal, 1982, 25(6): 16~25
- 4 Paul J A M, Kaswan. Low cost millimeter wave sensor. MSN, 1980, 9(5): 48~54
- 5 Seashore C R, Singh D R. Millimeter wave ics for precision guided weapons. Microwave Journal, 1983, 26(6): 51~64
- 6 Itoh T, Mittra R. Spectral domain approach for calculating dispersion characteristics of microstrip lines. IEEE T-1973, MTT-21, (7): 496~498
- 7 Schneider M V. Microstrip lines for microwave integrated circuits bell systems. Tech J, 1969, 48: 1422~1444
- 8 Oxley, T H, Burentt, C. mm-Wave hybrid microstrip technology. Microwave Journal, 1986, 29(3): 37~44

Integrated Circuits for Millimeter Systems

Xue Liangjin

(Inst. of Applied Physics UEST of China Chengdu 610054)

Abstract Millimeter wave circuits for precise guided weapons and channelized receivers are discussed in this paper. Low cost and producibility in large quantities are the dominant requirements for this new generation of RF hardware. Two main integrated circuit techniques include the hybrid and monolithic. In a production transceiver configuration, a combination between hybrid and monolithic appears to yield the best performance and to be the most cost-effective recommendable mode.

Key words millimeter wave system; integrated circuit; hybrid integrated; monolithic integrated