

Ka 波段混合集成前端*

邹涌泉 甘体国

(西南电子技术研究所, 四川, 成都, 610036)

摘要 介绍最近研制成功的 8 毫米波混合集成前端的设计方法和测试结果. 该前端由本征模块、发射机和接收机组成, 具有高指标、小型化、轻量化和高可靠等优点. 测量结果表明, 在工作频带内, 发射功率大于 350mW, 接收机噪声系数小于 3.0dB.

关键词 Ka 波段, 混合集成, 前端.

A Ka BAND HMIC FRONT-END*

ZOU Yong-Quan GAN Ti-Guo

(South West Institute of Electronic Technology, Chengdu, Sichuan 610036, China)

Abstract The design method, manufacture and test results of a Ka band HMIC front-end, which has been developed recently in SWIET, were reported. The front-end, which is composed of a local oscillator module, a transmitter and a receiver, has not only good electrical performance, but also other merits such as miniature size, light-weight and high reliability. Test results show that the output power of the transmitter is higher than 350 MW and the noise figure of the receiver is lower than 3.0dB in the used band.

Key words Ka band, HMIC, front-end.

引言

毫米波独特的传播特性在通讯、雷达、制导等领域得到广泛应用. 近年来, 毫米波基础研究和系统应用有了迅速发展, 固态器件、集成电路理论和工艺的进步以及用于毫米波集成电路的基片材料的改进为制造低成本和适用的毫米波系统奠定了基础, 特别是单片微波集成电路 (MMIC) 的迅猛发展为实现小体积、重量轻、高可靠的毫米波系统展现了光辉前景.

本文采用理论分析结合实验研究的方法, 采用混合集成电路、梁式引线二极管倍频和混频器电路、单片集成电路、取样锁相电路以及毫米波波导滤波器等技术, 研制出了性能良好的 Ka 波段混合集成前端, 该前端具有体积小、重量轻、功耗低、可靠性高等特点, 在毫米波雷达、通信、制导等领域具有广泛的应用前景.

1 组成及工作原理

该混合集成前端由本振模块、发射机和接收机

组成, 原理框图如图 1 所示.

介质谐振器稳频的 FET 压控振荡器产生的 X 波段信号采用取样锁相, 锁定在高稳定、低相噪恒温晶振频率上, 该信号经 4 倍频器产生的 Ka 波段信号经 MMIC 放大器放大后分成两路, 一路作为接收机平衡混频器的本振信号, 另一路作为发射支路上混频的本振信号. L 波段信号与本振信号进行上混频, 其输出经过带通滤波器抑制本振和下边带信号后经 3 级 MMIC 放大器输出 350mW 功率通过双工器送至天线. 接收信号经双工器送入 PIN 接收保护开关, 接收保护开关在发射期间关闭接收机, 防止发射信号泄漏至接收机造成接收通道工作不正常, 接收信号通过两级 HEMT 低噪声放大器后, 带通滤波器抑制镜频噪声, 平衡混频器采用低噪声梁式引线混频二极管. 混频器输出的中频信号频率为 L 波段, 经前置中放放大后送入 L 波段接收机, 前置中放与混频器组装在一起. 接收前端 (receiving front-end) 噪声系数 < 3.0dB, 总增益 > 50dB.

* 国防预研基金 (批准号 7.5.7.1) 资助项目
稿件收到日期 2001-10-31, 修改稿收到日期 2002-04-02

* The project supported by the Preliminary Research Foundation of National Defense (No. 7.5.7.1)
Received 2001-10-31, revised 2002-04-02

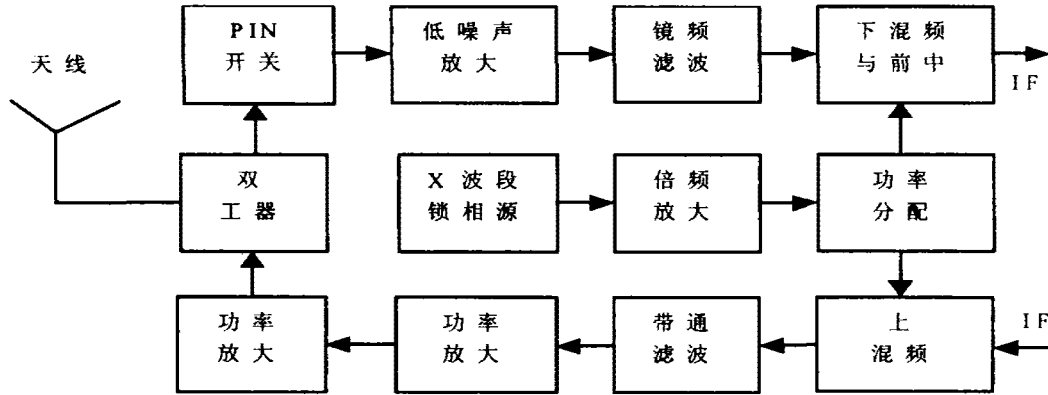


图1 Ka波段混合集成前端原理框图
Fig.1 Schematic diagram of the Ka band HMIC front-end

2 收发隔离

由于接收机灵敏度高,当收发共用天线时,发射干扰的抑制尤为重要.为使信号发射期间发射信号泄漏到接收机的功率不影响接收机正常工作,所以收发信道应保持一定的隔离度.

- 发射机的峰值功率, $P = 350\text{mW} = 25.4\text{dBm}$,
- 双工器对发射信号的抑制 $> 25\text{dB}$,
- 接收保护开关对发射信号的抑制 $> 35\text{dB}$,
- 低噪声放大器的增益 $G = 15\text{dB}$, $P_{1\text{dB}} = 8\text{dBm}$.

前置中频放大器的增益 $G = 20\text{dB}$, $P_{1\text{dB}} = 12\text{dBm}$,

则低噪声放大器输出为 $25.4 - 25 - 35 + 15 + 15 = -4.6\text{dBm}$,因此低噪声放大器不会饱和,镜频抑制滤波器插损为 1dB ,平衡混频器变频损耗为 5.4dB ,经前置中频放大器后输出为 9dBm ,也不会饱和,保证了接收机各级均能正常工作.

另外,发射支路上混频的中频输入信号和射频输出信号也可通过本振通道泄漏到接收机,从而影响接收机的正常工作.由于系统采用收发时分工作方式,即发射机工作时,接收通道关闭,因此,在发射

机工作期间,只要从发射机泄漏到接收通道的信号不造成接收机烧毁,系统便能正常工作.上混频中频信号电平为 7dBm ,射频输出电平为 -2dBm ,上混频器本振端口与中频端口和射频端口的隔离均优于 20dB ,本振与上混频器之间的两个隔离器反向隔离度 $> 40\text{dB}$,故从发射支路通过本振通道汇漏到接收机前中的中频信号电平为 $7 - 20 - 20 = -33\text{dBm}$,射频信号电平为 $-2 - 20 - 20 - 40 = -82\text{dBm}$,显然,这两种泄漏信号均不会造成接收机烧毁.

下面分别介绍各模块的设计和性能.

3 发射机

发射机由上混频器、带通滤波器和功率放大器组成.功率放大器采用 MMIC 芯片级联的薄膜微带电路结构,整个放大器由上下腔组成,微带电路安装在下腔中,上腔作为微带电路的屏蔽盒,同时又是波导—微带过渡的上腔,波导—微带过渡^[1]采用波导的 E 面插入探针形式.屏蔽盒的尺寸选择应使波导模截止.

采用微带线网络构成的放大器级联网络如图 2 所示.为获得良好的功率增益,需满足

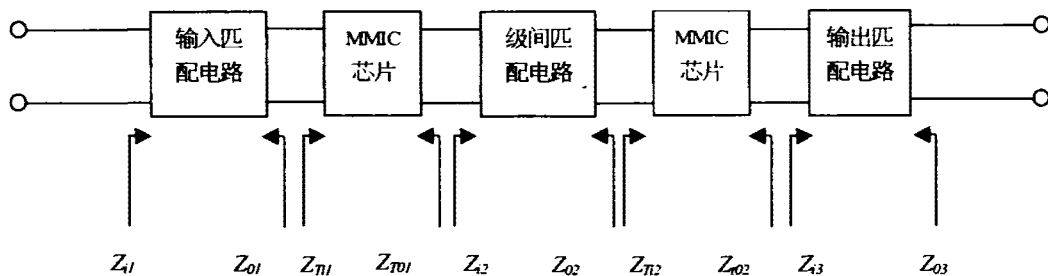


图2 功率放大器级联网络
Fig.2 Cascade network of power amplifiers

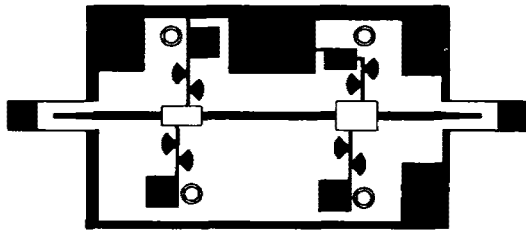


图3 低噪声放大器印制电路
Fig.3 Layout of the LNA

$$\begin{aligned} Z_{01} &= Z_{T1}^* \\ Z_{12} &= Z_{T01}^* \\ Z_{02} &= Z_{T2}^* , \\ Z_{13} &= Z_{T02}^* \end{aligned} \quad (1)$$

借助 CAD 软件分别对功率放大器各级输入、输出及级间匹配电路进行优化设计。

带通滤波器采用波导 E 面插入金属膜片带通滤波器结构,通过计算辅助设计和分析^[2]以及精密线切割加工,达到的指标为:带宽 300MHz,通带插损 <0.8dB,边带抑制 >40dB。上混频器包括 1 个微带环行功率分配器、2 个混频二极管、1 个低通滤波器和 2 个匹配支节。二极管等效电路阻抗与 LO 和 RF 的匹配通过匹配支节来实现。

4 接收机

在不考虑镜频噪声影响的条件下,根据级联网络噪声系数公式可得到接收机噪声系数

$$N_{f0} = a \left[N_{f1} + \frac{2(N_{f2} - 1)}{G_1} \right], \quad (2)$$

式(2)中 a 表示双工器及开关损耗倍数, N_{f1} 、 G_1 分别表示低噪声放大器噪声系数和增益, N_{f2} 表示混频前中双边带噪声系数。

如果放大器频带很宽,镜频频率完全落在放大器平坦频带内,镜频噪声将使接收前端的等效噪声系数恶化,假定低噪声放大器对镜频增益是 G_1^i ,有镜频噪声的接收机噪声系数

$$N_{f0}^i = a \left[N_{f1} \left(1 + \frac{G_1^i}{G_1} \right) + \frac{2(N_{f2} - 1)}{G_1} \right], \quad (3)$$

用 M 表示有镜频噪声时,接收前端噪声系数变坏的

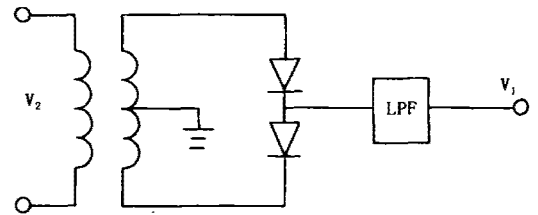


图4 四倍频器等效电路
Fig.4 Equivalent circuit of $\times 4$ frequency multiplier

倍数,若 G_1 很高时,后级混频噪声可以忽略,此时近似为

$$M = \frac{N_{f0}^i}{N_{f0}} = 1 + \frac{G_1^i}{G_1}, \quad (4)$$

采用镜频抑制滤波器可解决镜频噪声使接收前端噪声恶化的问题,用 A 表示镜频抑制滤波器对镜频噪声功率的衰减量。

$$M = 1 + \frac{G_1^i}{AG_1}, \quad (5)$$

从表 1 可知,若镜频抑制滤波器对镜频噪声抑制 >30dB,镜频噪声对接收前端噪声系数的恶化便可忽略,此时接收前端噪声系数为

$$N_{f0} = aN_{f1}, \quad (6)$$

在 Ka 波段,双工器及开关损耗 0.8dB 左右,接收机噪声系数主要决定于低噪声放大器。

低噪声放大器^[3]采用两级 HEMT 放大器芯片级联,HEMT 管是 80 年代初期出现的一种新型的场效应管,它具有高的截止频率和效率,特别是低噪声 HEMT 具有优良的噪声特性,且工作频率越来越高。根据两级放大器级联噪声系数公式

$$N_f = N_{f1} + \frac{N_{f2} - 1}{G_1}. \quad (7)$$

当 G_1 足够大时,两级放大器噪声系数主要决定于第 1 级噪声系数。分别按最小噪声系数、最佳增益对两级放大器进行偏置,借助 CAD 软件分别按最小噪声、最佳增益对两级放大器输入、输出及级间匹配进行优化设计。偏置电路中除了用芯片电容器作电源滤波外,还采用了微带高低阻抗线组成的滤波网络。低噪声放大器印制电路和实物如图 3 和图 5 所示。

镜频抑制滤波器采用波导 E 面插入金属膜片

表 1 接收机噪声恶化值 M 和镜频抑制滤波器的衰减量 A 的关系
Table 1 Degradation M of noise figure vs suppression A of a filter

物理量	1	2	3	4	5	6	7	8
M(dB)	0.02	0.05	0.1	0.2	0.5	1.0	2.0	3.0
A(dB)	23.358	19.363	16.328	13.267	9.136	5.868	2.329	0.00



图5 低噪声放大器实物照片
Fig. 5 Photograph of LNA

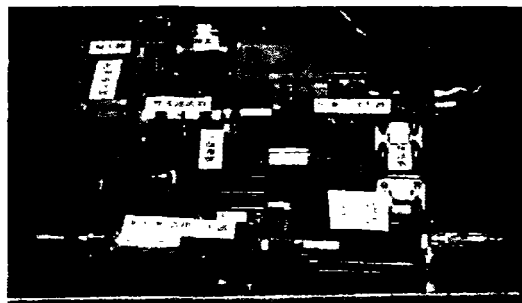


图6 Ka 波段混合集成前端实物照片
Fig. 6 Photograph of a Ka band HMIC front-end

带通滤波器结构. 平衡混频器和前置中频放大器组合在一个腔体内. 前置中频放大器采用低噪声单片放大器实现, 增益高、工作稳定可靠.

5 | 本振模块

本振模块由 X 波段锁相源、倍频器、放大器和功率分配器组成.

X 波段锁相源由介质谐振器稳频的 FET 压控振荡器产生的信号通过取样锁相环锁定在小型恒温晶振输出的参考信号频率上. 输出的 X 波段信号馈送至四倍频器. 四倍频器为梁式引线肖特基二极管和平面传输线电桥构成的平衡式偶次倍频器, 等效电路如图 4 所示, 输入信号经过低通滤波器加至反极性安装的 2 个二极管上, 通过平衡电路取出信号, 采用这种倍频器工作稳定, 频谱纯. 放大器采用单片集成电路 (MMIC), E 面分支波导构成的功分器体积小, 结构紧凑, 等分特性好且便于连接和加工.

6 结论

Ka 波段混合集成前端已研制成功, 实物如图 6 所示, 测试结果如表 2 所列. 该前端具有指标先进、

表 2 前端测试结果

Table 2 Testing results of front-end

序号	名称	测试值
1	工作频率	35.8 ~ 36.1 GHz
2	发射机功率	≥ 350 mW
3	接收机噪声系数	≤ 3.0 dB
4	接收机总增益	≥ 50 dB
5	本振频率稳定度	2×10^{-10}
6	毫米波本振相位噪声	≤ -82 dBc/Hz@1 KHz

体积小、重量轻、功耗低、可靠性高等特点. 在通讯、雷达、制导等领域具有良好的应用前景.

REFERENCES

- [1] Yi-shih. Waveguide-to-microstrip Transitions for Millimeter-wave Applications. *IEEE MTT-S*, 1988, 473 — 475
- [2] HUANG Jian, GAN Ti-Guo. Analysis of waveguide E-plan metal septum filter. *Journal of microwave* (黄建, 甘体国. 波导 E 面金属膜片滤波器的分析. *微波学报*), 1999, 15 (3): 257 — 261
- [3] ZOU Yong-Guan, GAN Ti-Guo. Development of Ka band LNA. *Telecommunication Technology* (邹涌泉, 甘体国. Ka 波段低噪声放大器的研制. *电讯技术*), 2001, 41(1): 29 — 30