

K波段紧凑型收发前端组件的设计

王 毅

(中国西南电子技术研究所, 四川 成都 610036)

摘要: 设计了一种应用于微波无线通信系统的紧凑型低成本FDD收发前端组件, 在有限的体积内集成了一路接收通道、一路发射通道、两组变频需要的本振源。采用表面贴装芯片和微波多层板的实现方式, 在保证优良性能的同时, 兼顾了经济性和装配容易性。首先介绍了收发前端的架构设计, 并针对关键无源电路、有源电路进行了详细设计, 对主要性能指标进行了分析。对加工的组件进行了实测, 发射通道输出功率大于20 dBm, 接收信号范围为-60 dBm~-20 dBm, 接收中频输出功率恒定为-10 dBm。

关键词: FDD; 收发前端; 紧凑型; 微波无线通信

中图分类号: TN851.4

文献标志码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.223377

中文引用格式: 王毅. K波段紧凑型收发前端组件的设计[J]. 电子技术应用, 2023, 49(2): 106-110.

英文引用格式: Wang Yi. Design of a compact K-band transceiver front-end module[J]. Application of Electronic Technique, 2023, 49(2): 106-110.

Design of a compact K-band transceiver front-end module

Wang Yi

(Southwest China Institute of Electronic Technology, Chengdu 610036, China)

Abstract: A compact and low-cost transceiver front-end module is designed for point-to-point radio communication system in this paper. The transceiver module contains one receive channel, one transmit channel, two groups of LO synthesizers in limited area. The module is implemented using devices with Surface Mount Technology (SMT) and multi-layer PCB for excellent performance, low cost and easy assembly process. This paper firstly introduces the architectures of transceiver front-end, then gives detailed design of key passive and active circuits, and analysis of main performance index. The assembled module is measured, it can transmit more than 20 dBm and receive -60 dBm to -20 dBm RF signal. The output IF signal of receive channel is -10 dBm constantly.

Key words: FDD; transceiver front-end; compact; microwave wireless communication

0 引言

尽管光纤通信具有非常大的数据容量, 但光纤的架设成本往往较高, 尤其是在偏僻山区和临时场馆^[1]。微波无线通信在较多的场景可以取代光纤通信进行大容量传输, 具有架设方便、价格低廉的优势。射频收发前端作为微波无线通信系统的核心部件, 随着系统的不断演进^[2-3], 向着小型化、轻量化、低功耗、多功能、高可靠性和低成本等方向发展^[4-7]。

近年来, 有一些研究尝试采用二次变频超外差体制结合LTCC或硅基三维集成技术来实现小型化设计^[8-9], 但是存在成本和工艺的问题。本文综合考虑性能、工艺、成本等因素, 采用微波多层板实现了一种紧凑型、低成本超薄平板K波段收发前端。所有器件选

用SMT封装的表面贴装芯片, 微波板选用廉价的罗杰斯硬基片。该收发前端采用频分复用(FDD)全双工的工作方式, 最终要实现的指标为: 接收通道噪声系数优于6 dB, 能够接收-60 dBm~-20 dBm的射频信号; 发射通道能够输出平均功率为20 dBm的射频信号。

1 收发前端架构设计

K波段收发前端根据功能可划分为3个部分: 接收通道、发射通道和本振源。收发前端组件的左侧为接收通道电路, 右侧则为发射通道电路。4个本振源位于正中, 被收发通道所环绕, 简化了本振信号的走线设计。

1.1 接收通道

接收通道采用了二次变频超外差架构, 组成框图如

图1所示。

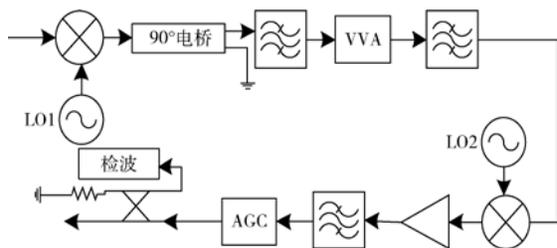


图1 接收通道组成框图

为了抑制镜像频率,常采用镜像抑制滤波器或者镜像抑制下变频器。本文通过构造Hartley架构的变频器来进行镜像抑制^[10],输入端省掉了一级镜像抑制滤波器,有效降低了接收机噪声系数。选用的IQ下变频器为HMC904LC5,将K波段射频输入信号下变频至2.9 GHz。HMC904LC5内部集成了一级低噪放和二倍频器,其噪声系数小于3 dB,变频增益大于12 dB。通过90°电桥,USB或LSB的单边带信号被选中,另外一种会得到抑制。第一中频链路上放置了一级压控衰减器(VVA),可根据输入信号大小进行适应性调整。第二中频输出端采用可变增益放大器(VGA)、耦合器、检波器构造了数字自动增益控制电路(AGC),可使中频输出功率保持恒定。

1.2 发射通道

与接收通道类似,发射通道采用了二次上变频发射架构,相比直接变频架构,能更容易滤除无用信号和杂散,也利于增益的分配。发射通道组成框图如图2所示。

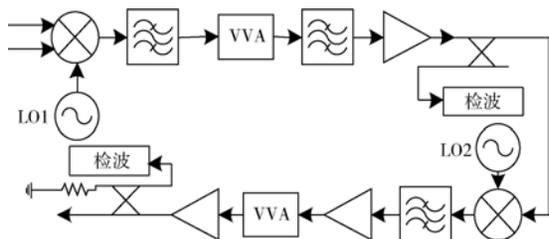


图2 发射通道组成框图

4路I/Q基带信号经过正交调制器后变频至3.4 GHz的中频信号,经过滤波放大后进行第二次上变频。在中频链路和射频链路上各放置了一级压控衰减器,通过调节衰减值,使射频信号获得较合适的输出功率水平和较好的信号质量。中频链路上的检波器将检波电压反馈至基带处理设备,可以实现I/Q校准并抑制本振泄露。

1.3 本振源

4个本振源均采用基本锁相环(PLL)进行设计,按照频率大小划分为2类:S频段本振和X频

段本振。每一类中2个本振均采用相同的架构和电路设计,仅仅在锁相芯片的寄存器配置上有所差别。

2 电路设计及性能分析

2.1 关键无源电路设计

K波段射频信号对外接口为WR-42矩形波导,需要设计微带到波导的过渡电路。常见的过渡方式主要包括3种,分别为波导-脊波导过渡、波导-鳍线过渡、波导-微带探针过渡。本文选择了具有结构简单、过渡性好、插入损耗小、频带宽特性的E面探针过渡结构,其设计模型及实测结果如图3所示。根据测试结果可知,在工作频带内,插入损耗小于1.6 dB,回波损耗大于15 dB,满足组件使用要求。

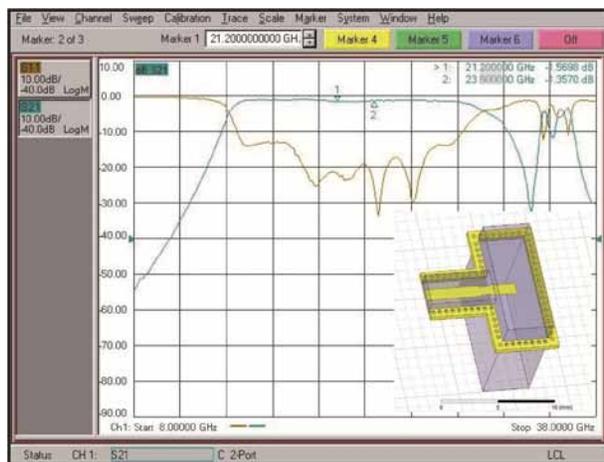


图3 微带-波导过渡设计模型及实测结果

发射通道为抑制第二次变频后的交调和本振泄露信号,在变频器后需要放置一级带通滤波器。采用七阶平行耦合线滤波器进行设计,其设计模型和实测结果如图4所示。根据测试结果可知,1 dB带宽约为2.4 GHz,回波损耗大于10 dB,带外抑制大于35 dB@20.2 GHz,满足组件使用要求。

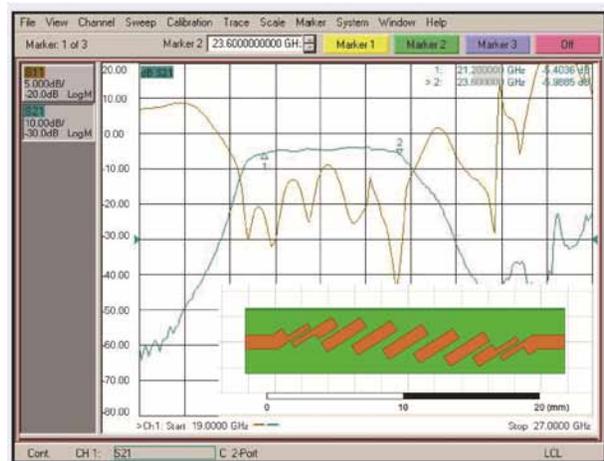


图4 平行耦合线滤波器设计模型及测试结果

2.2 关键有源电路设计

2.2.1 K波段放大模块

K波段放大模块位于发射通道第二次变频之后,主要由压控衰减器、驱动放大器、功率放大器和检波器组成,组成框图如图5所示。

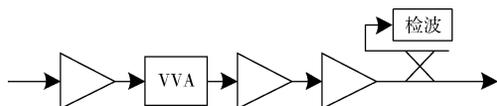


图5 K波段放大模块组成框图

混频之后的射频信号经过第一级放大器达到中等信号电平,然后经过驱动放大器,最后被送至末级功放。前两级放大器之间增加一级压控衰减器,一是可以防止三级放大器直接级联发生自激,二是可以调节发射输出功率。检波器采集的电压信号送至基带处理模块,可实时监测输出信号功率电平,适时调整压控衰减器,使发射通道稳定工作。

2.2.2 中频AGC模块

由于接收通道接收的信号是变化的,而最后要求中频信号输出恒定为-10 dBm,因此需要设计一个AGC电路来实现这个功能。设计了一种数字AGC电路模块,主要由VVA或VGA、检波器、反馈环路等组成,具体组成框图如图6所示。工作原理为将被检测信号的功率与预定值功率进行比较产生误差电压,通过负反馈,利用该误差信号控制可变压控衰减器或可变增益放大器的增益,最终使被检测信号输出功率与预定值相等。

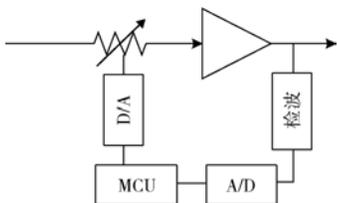


图6 中频AGC模块组成框图

2.3 关键指标分析

2.3.1 接收噪声系数

由噪声系数级联公式可知,链路前几级器件的噪声特性决定了总的噪声系数。射频输入端除了必不可少的波导-微带过渡,第一级器件为集成了低噪放的IQ下变频器,从而保证了接收链路具有较小的噪声系数。接收链路噪声系数级联仿真结果如图7所示,由图可知,接收通道的噪声系数不大于4.7 dB,满足组件使用要求。

2.3.2 接收输入功率

由图7仿真结果可知,接收通道线性增益为52 dB,当输入信号为-60 dBm时,输出功率为-8 dBm,接收通道工作于线性状态。当输入信号为-20 dBm的大信号

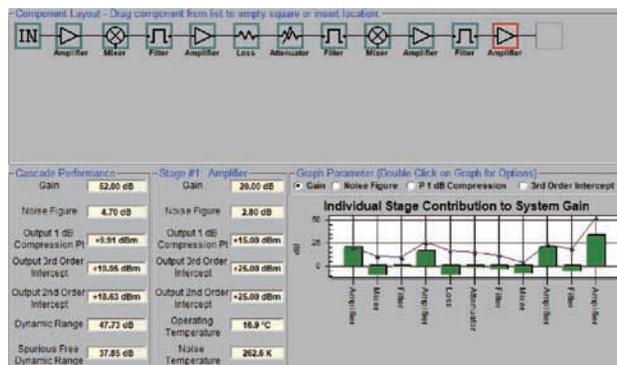


图7 接收通道仿真结果

时,最容易饱和的为中频链路上的末级放大器。末级为中频AGC模块,增益范围为-2.5 dB~42.5 dB,输出1 dB压缩点为8.4 dBm,经过推算到AGC模块输入端的信号功率为-5 dBm,符合AGC模块输入功率要求。

2.3.3 发射输出功率

发射链路级联增益仿真结果如图8所示,线性增益为35 dB。当输入I/Q信号平均功率为-12 dBm时,推算出末级功放的输出功率为23 dBm,满足指标规定不小于20 dBm的要求。

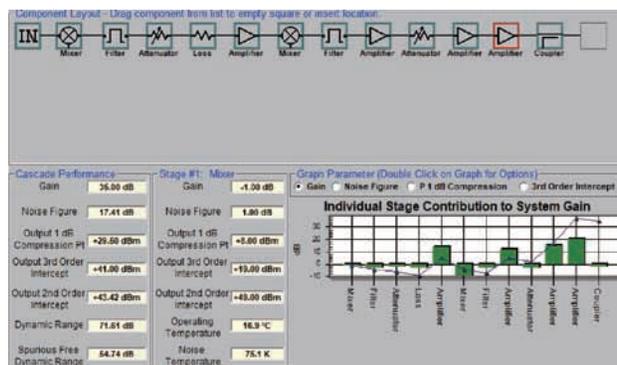


图8 发射通道仿真结果

2.4 电路结构设计

该收发前端组件需要在有限的面积内集成1路接收通道、1路发射通道、100 MHz晶振、2个S本振源、2个X本振源、电源及控制电路等。布局设计时,晶振及4个本振模块处于电路的中间,接收通道和发射通道信号调理电路环绕本振模块进行放置。接收射频输入和发射射频输出位于顶部中间位置,接收中频输出和发射基带信号输入位于底部中间位置,接收和发射的电源控制部分采用插针引出,分别位于组件底部两端位置。

电路中不同信号的辐射隔离主要通过通过在盖板中挖腔实现。盖板上的金属条直接压紧在微波基片的地上,能有效防止信号间的串扰和对外辐射。

3 实验结果与讨论

组装完成后的实物如图9所示,组件尺寸为230 mm×

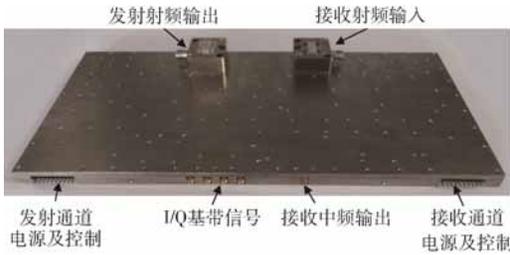


图9 收发前端组件实物照片

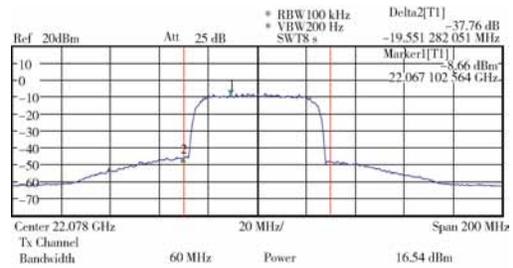


图12 发射通道射频输出信号测试结果

100 mm×8.5 mm(微带-波导-同轴转换仅供测试用,实际使用时射频口直接与波导集成)。

本振源的相位噪声直接影响收发前端的性能,S频段本振相噪测试结果为-102.22 dBc/Hz@10 kHz,X频段本振相噪测试结果为-98.56 dBc/Hz@10 kHz,具体测试结果如图10和图11所示,满足使用要求。

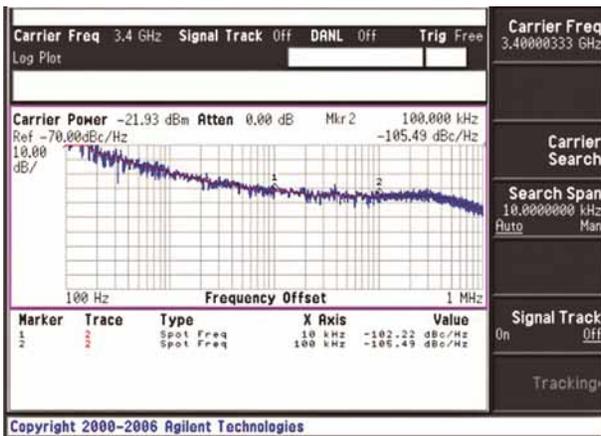


图10 S频段本振相噪测试结果

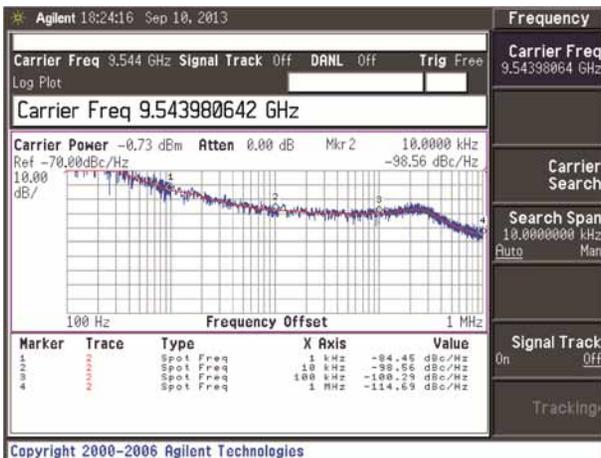


图11 X频段本振相噪测试结果

发射通道射频输出信号频谱测试结果如图12所示,输出信号信噪比大于53 dB,输出功率大于20 dBm(波同转换和测试线缆损耗为4.5 dB)。发射通道输出1 dB压缩点大于25 dBm,在整个工作带宽内增益大于35 dB。输出功率电平最大调节范围为45 dB,调节步进为1 dB。

接收通道可接收信号范围为-60 dBm~-20 dBm,输出中频信号功率恒定为-9.4 dBm。当输入信号功率为-60 dBm时,输出中频信号信噪比大于37.1 dB,测试结果如图13所示。

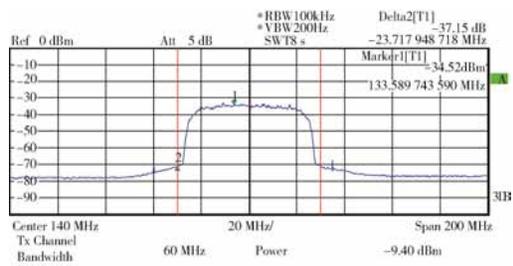


图13 接收通道中频输出测试结果

接收通道噪声系数测试结果如图14所示,测试结果为9.8 dB(包含波同转换和测试线缆损耗为4.5 dB),实际噪声系数为5.3 dB,满足使用要求。

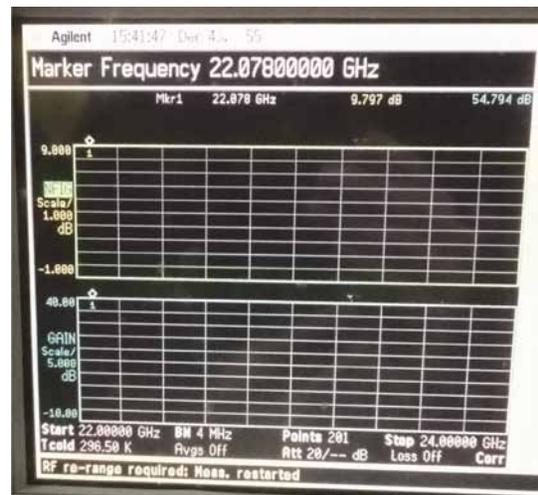


图14 接收通道噪声系数测试结果

本文采用表面贴装芯片加微波多层板的实现方式,基于二次变频超外差结构,实现了一款K波段紧凑型超薄平板FDD收发前端组件,并给出了测试结果,与其余相似产品的对比如表1所示。该小型化收发前端组件与已发表的同类型组件相比,内部除了集成收发通道,还包含变频所需的4个本振源。

表1 相似产品对比

文献	频率/GHz	输出功率/ dBm	噪声系数/ dB	通道数	实现架构	集成本振	集成工艺
文献[9]	$K_u(f_0 \pm 1.5)$	28	5.6	1T, 5R	收发一次变频	不包含	硅基+PCB
文献[11]	34.4~36.8	20.5	4.5	1T, 1R	接收一次变频, 发射一次变频+倍频	不包含	PCB+SMT
文献[12]	23.4~24.4	9	/	1T, 2R	接收一次变频, 发射倍频	包含1个本振	PCB+SMT
本文	21.2~23.6	20	5.3	1T, 1R	收发二次变频	包含4个本振	PCB+SMT

4 结论

本文讨论了一种紧凑型、低成本超薄平板K波段收发前端的实现方式,在实现复杂功能的同时兼顾了经济性和装配容易性。该组件适用于点对点微波无线通信,具有性价比高、使用灵活的优势,也可拓展应用于其他使用场景,对实际工程应用具有一定的借鉴意义。

该收发前端主要采用了表面贴装芯片加微波多层板的实现方式,技术和工艺较成熟,下一步工作为基于LTCC和MMIC技术进一步提高集成度,满足更多场景的需求。

参考文献

- [1] WELLS J. Faster than fiber: the future of multi-Gb/s wireless [J]. IEEE Microwave Magazine, 2009, 10(3): 104-112.
- [2] 李镇,杨燕,吴国中,等. 2~18 GHz超宽带小型化下变频通道设计[J]. 微波学报, 2020,36(4):78-81.
- [3] 王毅. 0.8~18 GHz超宽带接收组件设计与实现[J]. 电子技术应用, 2021, 48(1):146-151,156.
- [4] 刘岩磊. 微波变频组件杂散信号分析与抑制设计[J]. 舰船电子对抗, 2014,37(6):107-109.
- [5] 李冰,葛临东,郑瑾. 一种改进的宽带数字下变频高效结

构[J]. 电子与信息学报, 2007(8):1891-1893.

- [6] 冯若晔,张广扬. 某型射频接收机高增益下变频组件研制[J]. 低温与超导, 2013,42(3):83-85.
- [7] 王勇. 一种宽带幅相一致变频组件的设计与实现[J]. 舰船电子对抗, 2016,39(2):71-73.
- [8] 王璇,敦书波,谭承. Ka频段LTCC小型化多通道接收前端组件设计[J]. 无线电工程, 2018,48(8):695-698.
- [9] 刘昊东,吴洪江,余小辉,等. 基于三维集成的小型化Ku波段收发组件[J]. 电子技术应用, 2022,48(5): 119-124, 128.
- [10] POZAR D M. 微波工程(第四版)[M]. 谭云华,周乐柱,吴德明,等,译. 北京:电子工业出版社,2021.
- [11] 王大林. Ka波段小型化宽带收发前端的研制[D]. 成都:电子科技大学,2020.
- [12] 张廷轩. K波段多通道雷达前端技术研究[D]. 成都:电子科技大学,2020.

(收稿日期:2022-09-19)

作者简介:

王毅(1988-),男,硕士,工程师,主要研究方向:射频微波电路与系统、航天测控系统中的信道设计。



扫码下载电子文档

版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所