

基于三维集成的小型化 Ku 波段收发组件

刘昊东, 吴洪江, 余小辉, 马战刚

(中国电子科技集团公司第十三研究所, 河北 石家庄 050051)

摘要: 基于硅基三维集成模块和印制板(Printed Circuit Board, PCB)混压工艺,设计了一种小型化 Ku 波段收发组件,并对其原理方案和具体实现进行了介绍。该收发组件整体电路采用三维集成架构实现,射频及中频芯片和其外围电路集成于硅基三维集成模块中,外部电路板采用射频与低频混压印制板,模块和印制板通过球栅阵列(Ball Grid Array, BGA)互联。通过对信号过渡结构进行优化设计,降低了信号传输损耗,提升了通道间隔离度。电路测试表明,组件在工作频带内满足通道间幅度一致性、带内平坦度、噪声系数等指标要求,且符合组件小型化、高集成度、高一一致性、高可生产性的现实需求。

关键词: 三维集成;收发组件;Ku 波段;垂直互连

中图分类号: TN92

文献标识码: A

DOI:10.16157/j.issn.0258-7998.222677

中文引用格式: 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.

英文引用格式: Liu Haodong, Wu Hongjiang, Yu Xiaohui, et al. Miniaturized Ku-band transceiver based on 3D integration technology[J]. Application of Electronic Technique, 2022, 48(5): 119-124, 128.

Miniaturized Ku-band transceiver based on 3D integration technology

Liu Haodong, Wu Hongjiang, Yu Xiaohui, Ma Zhangang

(The 13th Research Institute, CETC, Shijiazhuang 050051, China)

Abstract: With silicon-based 3D integrated module and multilayer hybrid pressing printed circuit board(PCB) technique, a miniaturized Ku-band transceiver was designed, and meanwhile its principle project and approach were expounded. The transceiver employed 3D integrated structure. Radio frequency(RF) and intermediate frequency(IF) chips and their periphery circuits were integrated in 3D heterogeneous integrated module. Outer circuit board was made of a mixed-laminated multi-layer PCB. The transceiver used ball grid array (BGA) to connect 3D module and PCB. Signal transmission structure was optimized to reduce transmission loss and improve isolation among the channels. Product test indicates that the transceiver meet the requirements of inter-channel amplitude consistency, intra-band flatness, noise factor and other indicators. Besides, the transceiver has conformed to practical needs such as miniaturization, high integration, high consistency and high producibility.

Key words: 3D integrated; transceiver; Ku-band; vertical interconnection

0 引言

微波组件是雷达和通信系统中的重要硬件支撑部分,承担着信号的放大、混频、调制和幅相控制功能。为了满足性能更加强大的雷达和通信系统的需求,设备前端所使用的天线阵列规模越来越大,所需要的信号也越来越复杂,对于微波组件的技术指标来说,就需要在同样甚至更小的体积下有着更多的通道数、更高的通道间一致性和隔离度、更好的电磁兼容和更低的功耗,同时还要保证组件在极端环境下的可靠性。因此,微波组件正在向着小型化、轻量化、高工作频率、多功能、高可靠性和低成本等方向发展^[1-2]。然而,目前传统的微波多芯片模块和组件已经渐渐无法满足小体积、低功耗的需求。

本文介绍了一种以硅基三维集成器件为基础的三

维集成微波组件,采用箱体单层开腔,电源和信号集成至一整块多层混压 PCB 板的形式^[3-4],将 80%的射频和中频芯片、器件集成在硅基三维集成器件中,采用 BGA 安装形式,晶圆级键合封装,顶层还可以表贴阻容、电桥等无源器件;再将硅基模块、中频 LC 滤波器、温补衰减器、 π 型衰减器和稳压电路、控制电路等所需要的器件表贴在 PCB 板上形成完整的收发链路和控制电路,最终研制出的微波组件相对于其原型接收机增加了发射功能和一路多功能通道的情况下,整体体积降低至原接收机的一半,实际使用体积仅有原接收机的 1/3;组件采用单层开腔、多层混压 PCB 板、通道功能硅基模块化、整体装配自动化的设计思路,使多功能组件在保证大批量生产的一致性的同时大幅降低所需要的装配时间,提

高组件大批量生产效率,降低人力成本和手工装配所带来的不稳定性。

1 原理设计

收发组件的原理框图如图 1 所示。收发组件主要分为发射部分、接收部分和电源及驱动电路部分^[5-6];

发射部分包括一路发射通道,对发射激励信号进行调制和功率放大,可输出 28.5 dBm±1.5 dB 的脉冲发射信号。

接收部分输入包括两路差信号接收通道,一路低中频和接收通道,一路高中频和接收通道和一路辅助校准通道;输出包括两路差信号,一路低中频和信号,一路高中频和信号和一路辅助接收信号。其中,高低中频的和信号接收通道共用一个输入端口,辅助接收信号和高中频和信号由切换开关控制共用一个输出端口,主要功能为对从天线输入的三路射频信号进行变频、滤波和放大,可为微弱信号提供 30 dB 接收增益,且通过消隐开关和数控衰减器组合实现接收信号的增益、衰减和关断的状态切换,确保接收通道在接收大信号时仍能正常工作,且不会因发射通道的高功率信号泄漏损坏。

电源及驱动电路包括稳压电路和低电压差分信号(Low Voltage Differential Signaling, LVDS)电平转换电路,为组件电路提供所需的稳定工作电压和控制信号。

2 组件电路及结构设计

2.1 硅基三维集成模块设计

硅基三维集成模块以硅晶圆为原材料,采用微机电系统(Micro-Electro-Mechanical System, MEMS)工艺制作多层基板,在基板上制作各种集成无源器件,并将GaAs、GaN、互补金属氧化物半导体(Complementary Metal Oxide Semiconductor, CMOS)等材料制成的芯片以烧结、粘接、键合、倒装焊等微组装工艺埋在基板内部或表面而制成,在实现相同功能和指标的情况下可以大幅降低组件体积和信号传输损耗^[7]。硅基三维集成模块的剖面结构图如图 2 所示。

由于硅基三维集成模块在射频下的优异性能和高一致性,本次将收发链路中的大部分器件均集成进硅基三维集成模块中,将温补衰减器、LC 滤波器、隔离器等体积较大的器件采用独立贴装的方式进行装配。本次硅基三维集成模块采用 5 层硅基板堆叠,第一层硅基下表

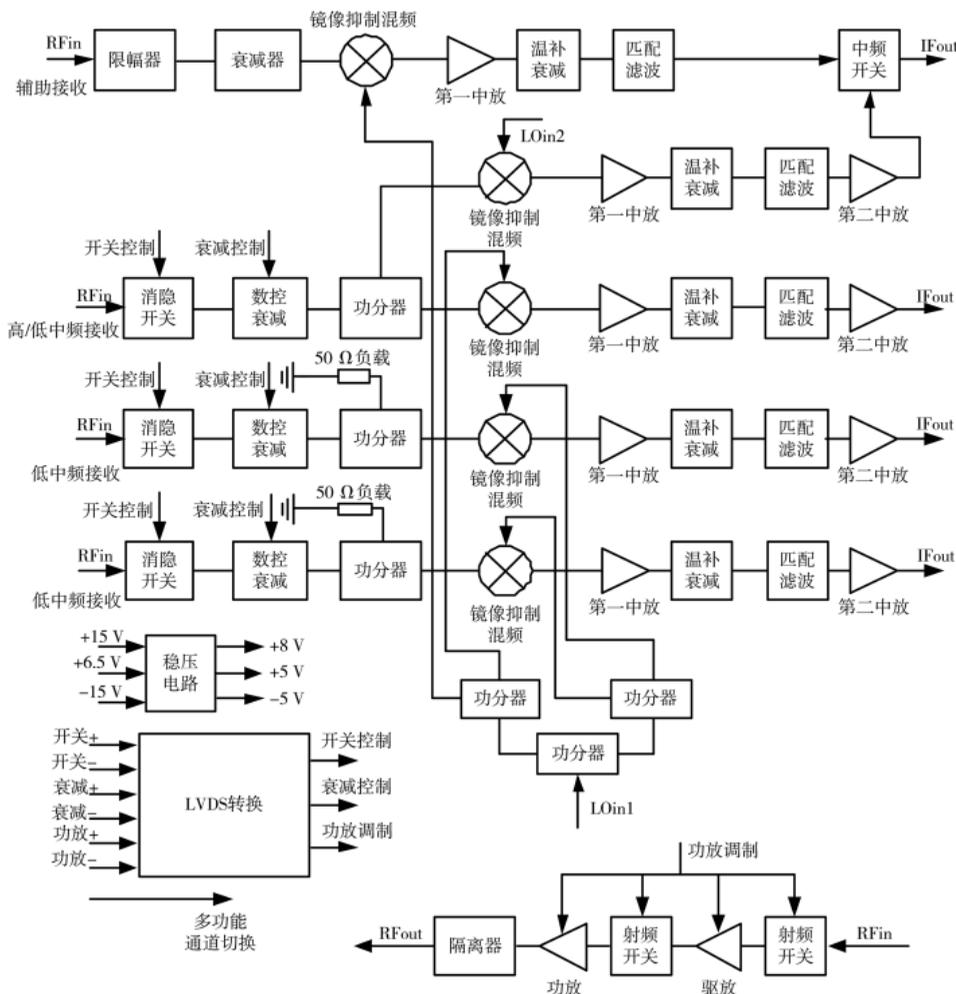


图 1 收发组件原理框图

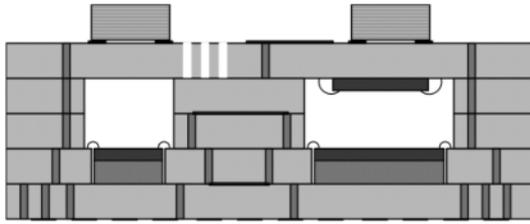


图2 硅基三维集成模块剖面结构图

面制作镍金焊盘,用于BGA植球;硅基采用干法刻蚀芯片掩埋腔体,采用微组装工艺将单片微波集成电路(Monolithic Microwave Integrated Circuit, MMIC)装入芯片腔体中,并通过金丝键合实现互连;顶面贴装元器件提高集成度。

2.2 单元电路设计

2.2.1 发射通道设计

发射通道要求发射输出信号为幅调脉冲信号,具有100 kHz和500 kHz两种重复频率,输入功率 $-1\sim 4$ dBm,输出功率在环境温度下全频段内要求 $28.5\text{ dBm}\pm 1.5\text{ dBm}$,预调制深度大于80 dBc,因此整体电路分为驱动硅基模块和功放硅基模块,驱动硅基模块集成单刀单掷开关、衰减器、驱动放大器和电源调制芯片等,功放硅基模块集成单刀单掷开关、功率放大器、可编程负压稳压芯片、电源调制芯片、滤波电容、调压电阻等;功放芯片选用一款宽带GaAs放大器,小信号增益28 dB,饱和输出功率30 dBm,动态漏极电流小于0.6 A,饱和输出以保证带内平坦度和输出功率要求。

输出端贴装隔离器以优化端口驻波、增加端口反向隔离度。

2.2.2 接收通道设计

接收通道包括的主要器件包括硅基模块、LC滤波器、温补衰减器等。硅基模块按照通道功能分为和差通道硅基模块、辅助/高中频和通道硅基模块和中频放大硅基模块。

和差通道硅基模块首先包括由一对单刀双掷开关、限幅器、低噪放、数控衰减器组成的消隐开关电路,实现导通(增益 $30\text{ dB}\pm 2\text{ dB}$)、衰减(衰减量 $25\pm 3\text{ dB}$)、关断(通断比 $51\text{ dB}\pm 3\text{ dB}$)三态控制;由于低中频和通道需要输出一路射频信号给高中频和通道进行混频,消隐开关后接功分器芯片,差通道不需要功分输出时,将另一路的输出端口以 $50\ \Omega$ 负载接地即可;功分器后接由镜像抑制混频器和 90° 电桥组成的镜像抑制混频电路,可提供20 dB的镜像抑制;电桥输出混频后的中频信号,后接一中频放大器,提供中频增益。 90° 电桥和中频放大器外围电路皆为表贴器件,集成在硅基模块最顶层。

辅助/高中频和通道硅基模块与和差通道硅基模块类似,在其基础上去掉了消隐开关电路,输入端只保留限幅器。

中频放大硅基模块集成中频放大器和其外围电路,位于接收链路的最后端,保证信号经过温补衰减器和LC滤波器后中频输出功率满足要求。

2.2.3 电源及驱动电路设计

外部电源输入组件后,通过线性稳压电路进行稳压后再为有源器件提供电源,提高电源电路的抗干扰能力。

外部输入的控制信号为LVDS差分信号,组件内部使用晶体管-晶体管逻辑电平(Transistor-Transistor Logic, TTL)进行开关、衰减、功放调制等控制功能,因此需通过LVDS接收电平转换器件将六路LVDS信号转换为三路TTL信号。为了避免信号通过控制电路产生串扰,和差通道分别采用独立的开关驱动器以提高通道间隔离度。驱动电路原理框图如图3所示。

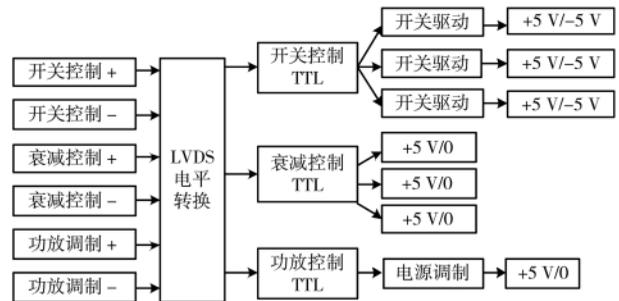


图3 驱动电路原理框图

2.2.4 本振电路设计

本振信号通过带状线进行传输,通过威尔金森功分器形式,采用二功分器,进行两次信号一分二,从而实现了本振的四路等分。为满足混频器的本振输入功率要求,将本振信号先功分后再放大,输入到和差三路接收通道及辅助和路通道,保证混频器的本振功率需求。

本振输入功率为 $8\sim 12\text{ dBm}$,经过两级功分器后,加上微带线的损耗,每路输出功率约为 0 dBm ,放大器增益为25 dB,输出1 dB压缩点 14 dBm ,放大器处于深饱和状态,不利于本振链路的谐波抑制,故在放大器之前增加约10 dB的衰减,同时可起到提高路间隔离度的作用。此时,本振放大器可输出功率 14 dBm ,可满足混频器的正常工作需求。

2.3 射频传输结构设计

2.3.1 PCB基板及走线设计

本次组件采用单板设计,双层射频基板与单层低频基板混压,走线共六层:前四层为两层双面射频基板压合,表层射频微波信号采用共面波导形式进行传输,并在输入端口增加 $\lambda/4$ 短路线用于中频信号隔离,中层组成带状线结构进行本振信号传输,且做埋阻以提高威尔金森功分器隔离度;后两层为低频基板;六层布线采用信号-屏蔽地的交错结构,信号层均可用于电源和低频控制信号传输。多层板采用包边处理,以增加电路板强度,且可以增强电路板接地效果^[8]。板上电气过孔均树

脂塞孔表面覆铜,保证焊盘平整度的同时,防止通孔溢锡污染焊盘,另设计有若干孔径0.3 mm的非金属化透气孔,在烧焊电路板时可以降低电路板空洞率。

2.3.2 波导-微带过渡结构设计

接收部分的和差射频输入信号均采用压缩波导进行传输,而组件内部使用射频基板与微波基板混压的多层PCB板作为电路基板,采用共面波导形式进行射频信号传输,以降低射频信号在混压板上的损耗。因此,射频信号在进入组件时,需要实现两种传输形式间的转换。由于转换结构位于接收通道最前端,因此其插入损耗和回波损耗对端口的匹配效果和通道的噪声系数有极大的影响^[9]。

常见的波导过渡形式主要有以下三种结构:(1)波导-脊波导过渡;(2)波导-鳍线过渡;(3)波导-微带探针过渡^[10]。然而以上三种结构由于加工精度要求较高,装配较为困难,且在恶劣的使用环境下难以保证传输性能的稳定,因此本次设计采用较为稳定的波导-同轴-共面波导过渡形式。

设计中过渡模型进行了仿真,建模如图4所示,最终仿真曲线如图5所示,可见在工作频带内,插入损耗小于0.15 dB,回波损耗小于-15 dB,满足组件使用要求。

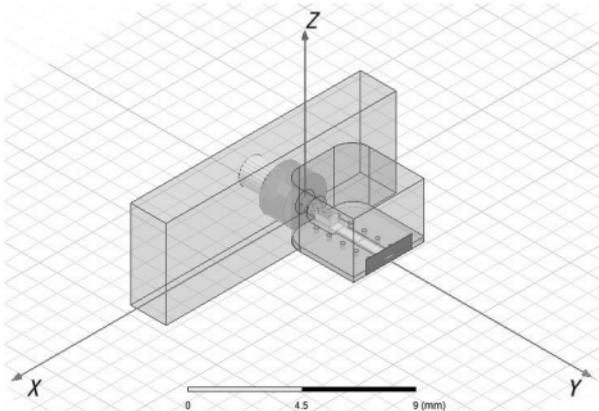
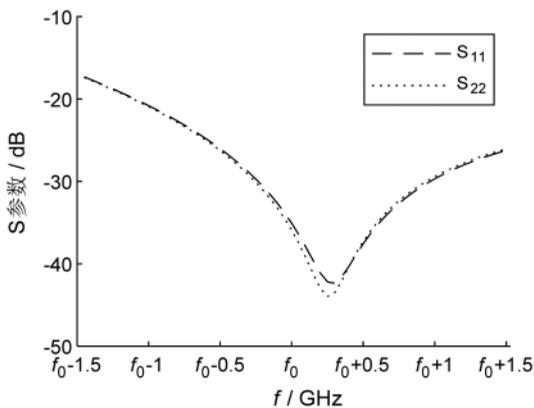


图4 波导-同轴-共面波导过渡结构仿真模型



(a) S11、S22 参数仿真结果

在实际生产时,需要考虑盒体的加工方式和绝缘子的安装方式。本次设计采用从波导顶部向下打孔的方式加工出绝缘子的安装孔,装配时通过波导顶部的孔装入绝缘子;另设计了波导堵盖,采用合适的焊料烧焊在盒体上以保证波导结构完整。

2.3.3 垂直互连设计

由于硅基集成器件采用BGA植球工艺进行装配,为了降低微波信号在硅通孔-锡球-共面波导过渡结构和硅通孔-锡球-带状线过渡结构中传输时产生的损耗和串扰,需要对信号的垂直互连结构进行仿真设计。

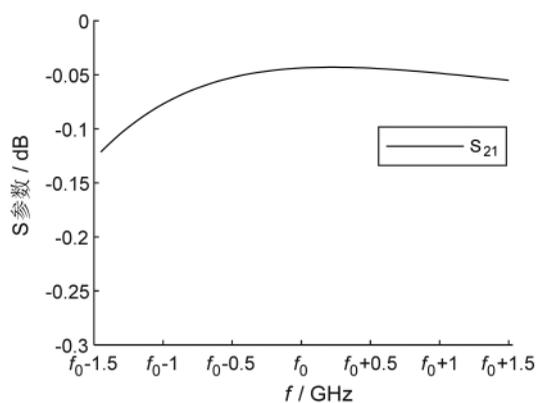
图6(a)为硅通孔-锡球-共面波导过渡结构设计,图6(b)为硅通孔-锡球-带状线过渡结构设计。信号自硅基模块底部焊盘输出后,均通过直径400 μm的锡球与电路板焊盘进行连接,球心间距设为800 μm;硅基模块和电路板内的传输线两侧均铺设接地面,通过接地面与焊球间的电容效应拓宽频带;垂直通孔均采用类同轴结构,在信号通孔周围以通孔中心为圆心等半径放置接地孔作为屏蔽孔,不仅可以起到对电磁场的束缚和屏蔽作用,而且可以抑制由电磁场不连续性激发的寄生高次模^[11-13]。同样,在BGA的信号球周围等间距设置屏蔽球,可以实现物理支撑和信号屏蔽作用,降低外部信号串扰,提高通道间隔离度。图7和图8为两种互连结构工作频带内仿真结果。

2.4 结构设计

组件盒体采用防锈铝材料,外表面导电氧化,内部局部镀金;对外信号接口均为密封式接头,除和差通道波导输入端口为压缩波导形式外,剩余射频和中频端口均为SMA接头,电源和控制信号采用J30J插头连接。为了保证通道间隔离度,在电路板表面紧固活动隔墙以实现腔体隔离。

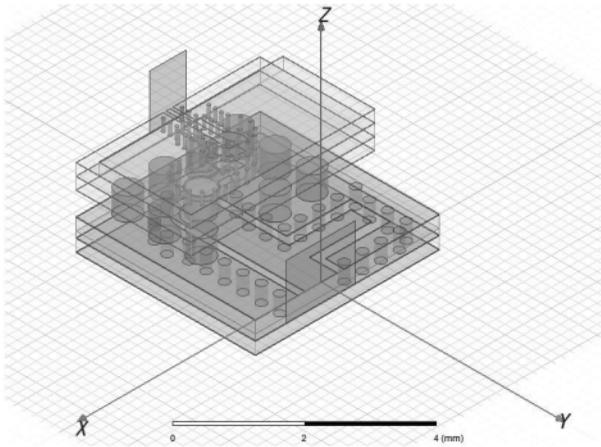
3 实物装配与测试

设计完成后,按照要求对结构件和电路板进行了加工,并根据组件内各种元器件的特点按照成熟温度梯度的加工工艺设计了合适的工艺流程:

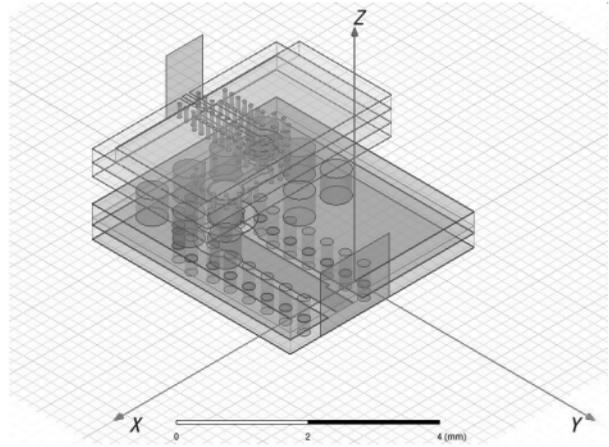


(b) S21 参数仿真结果

图5 波导-同轴-共面波导过渡结构仿真结果

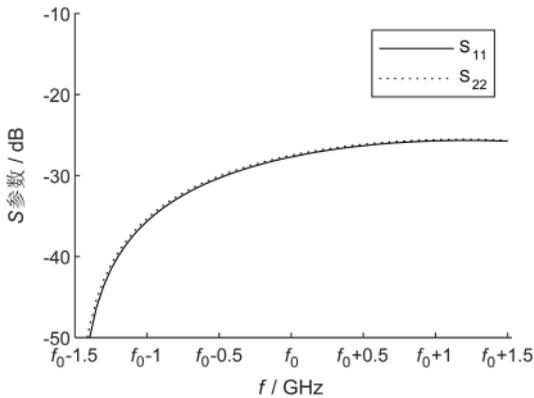


(a) 硅通孔-锡球-共面波导过渡结构仿真模型

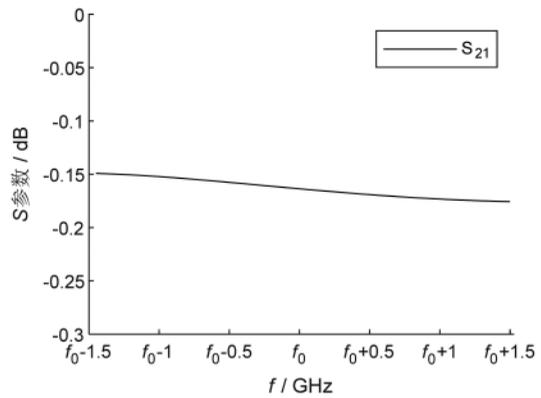


(b) 硅通孔-锡球-带状线过渡结构仿真模型

图6 信号的垂直互连结构仿真模型

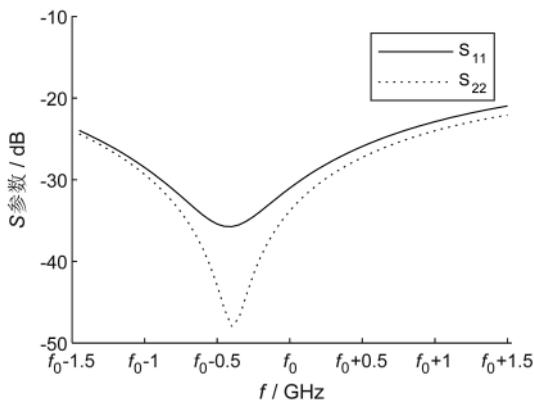


(a) S₁₁、S₂₂ 参数仿真结果

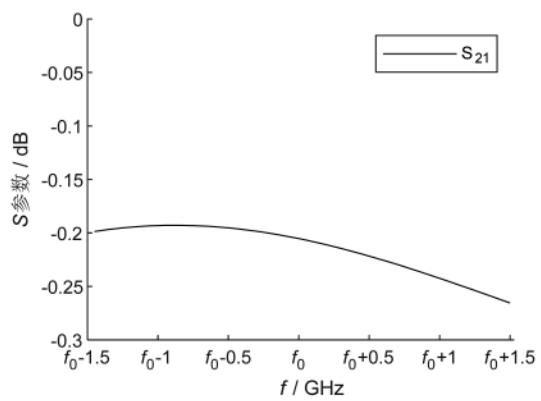


(b) S₂₁ 参数仿真结果

图7 硅通孔-锡球-共面波导垂直互连结构仿真结果



(a) S₁₁、S₂₂ 参数仿真结果



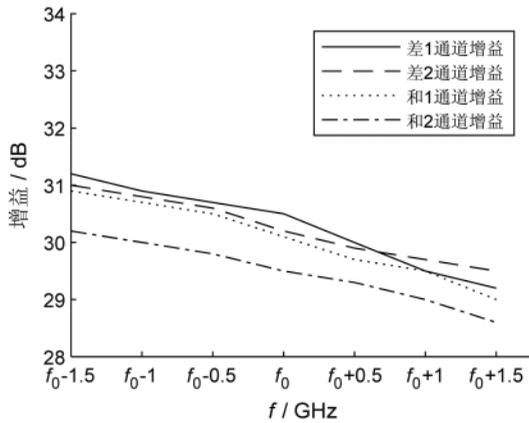
(b) S₂₁ 参数仿真结果

图8 硅通孔-锡球-带状线垂直互连结构仿真结果

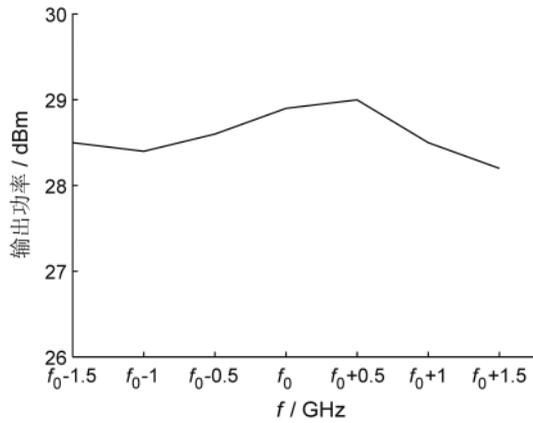
- (1) 将电路板烧焊在箱体上；
- (2) 将硅基模块、稳压器、绝缘子、滤波器、隔离器、阻容等各种表面贴装器件贴装到电路板和箱体上；
- (3) 用低温焊料贴装硅基模块上的 90°电桥、阻容，并烧焊波导堵盖；
- (4) 紧固装配活动隔墙；

- (5) 将低频插排的导线手工焊接至电路板；
- (6) 将隔离器的输入输出端口采用 150 μm 金带楔焊键合至电路板。

装配完成后，对其进行了测试，各接收通道增益曲线如图 9(a)所示，发射通道输出功率曲线如图 9(b)所示，其余主要指标结果如表 1 所示。



(a)接收通道增益曲线



(b)发射通道输出功率曲线

图 9 组件实物测试曲线

表 1 其余主要指标测试结果

指标名称	技术要求	测试结果
发射通道关断比/dB	≥ 70	≥ 80
前沿延迟时间/ns	(30±20)	25
后沿延迟时间/ns	(30±20)	25
和差通道噪声系数/dB	≤ 7	≤ 5.6
镜频抑制/dB	≥ 18	≥ 22
通道间隔离度/dB	≥ 40	≥ 50

由测试可知,在工作频带内,接收链路增益和发射输出功率均满足指标要求,发射通道关断比 ≥ 90 dB,脉冲信号前后沿延迟时间为 25 ns,和差接收通道噪声系数 ≤ 5.6 dB,镜频抑制 ≥ 22 dB,通道间隔离度 ≥ 50 dB,验证了组件设计的可行性。图 9(a)可见和 2 通道增益相比其他三路增益稍低,这是由于和 2 通路包含两个硅基三维集成模块,互连时增加了两次射频信号垂直传输和一段带状线导致的,可以通过调整硅基模块内部固定衰减器或外部中频 π 型衰减器来调整增益。在设计时为了满足外形要求,实际使用的体积仅占整体电路板的 3/5,若按空间利用率最高进行设计,可以将体积降低至目前的 1/2。

4 结论

本文基于硅基三维集成器件、PCB 混压工艺、BGA 堆叠和各种过渡结构仿真设计,设计并实现了一款 Ku 波段小型化三维集成收发组件,并给出了实测结果。组件通过各种三维集成小型化技术,在减小整体组件体积的同时,大幅降低了设计、生产和调试难度,提高了产品的可生产性和一致性。硅基三维集成器件的高精度光刻工艺使其实际应用频率可以达到 100 GHz,然而,对于 Ka 波段或以上的频率来说,多层混压 PCB 的过孔加工精度难以保证;同时,由于硅基工艺和 BGA 工艺的散热能力有限,难以应用于输出功率较大的发射链路。因此,本次三维集成组件的设计思路更适用于输出功率较低的微波组件,在应用于毫米波频段时,需要尽量缩短在

PCB 上的传输距离,重点关注垂直互连结构的设计。综上所述,应用硅基器件的三维集成组件设计方法在 T/R 组件、毫米波通信和探测、宽带收发组件等领域均具有一定优势,对于实际工程中多功能微波组件的小型化和批量化生产有一定的借鉴意义。

参考文献

- [1] 文光俊,谢甫珍,李家胤.单片射频微波集成电路技术与技术[M].北京:电子工业出版社,2007:349-350.
- [2] KUANG K, KIM F, CAHILL S S. RF and microwave micro-electronics packaging[M]. Heidelberg: Springer, 2010: 18-22.
- [3] 孙维佳,伍小保,范鹏飞,等.八通道 X 波段射频数字一体化接收机设计[J].雷达科学与技术,2020,18(1):109-114.
- [4] 杨志保,张帅,吴天阳,等.C 波段小型化功率收发组件设计[J].电子与封装,2020,20(4):040302.
- [5] 徐森峰,吴亮亮.Ku 波段多通道收发组件设计[J].电子科技,2016,29(8):36-38.
- [6] 胡体玲,李兴国.双平面振幅和差式单脉冲雷达的性能分析[J].现代雷达,2006,28(8):11-12,21.
- [7] ZHAO Y Z, WANG S D. A novel 3D T/R module with MEMS technology[C]//Proceedings of International Conference on Integrated Circuits and Microsystems. Chengdu, China, 2016: 286-289.
- [8] 李兵,李磊.多层混压印制板中微波参考地的研究[J].火控雷达技术,2013,42(2):103-106.
- [9] 陶子文.宽带微带线过渡结构的研究与设计[D].南京:南京理工大学,2014.
- [10] 行苗,李子健,杨自强.一种 D 波段矩形波导-共面波导的过渡结构设计[C]//中国电子学会.2020 年全国微波毫米波会议论文集(下册),2019:831-834.
- [11] 李兵,李磊.多层混压印制板中微波参考地的研究[J].火控雷达技术,2013,42(2):103-106.
- [12] 王辉.Ka 波段微带到带状线垂直互联技术研究[C]//2017 年全国天线年会论文集(上册).北京:中国电子学

(下转第 128 页)

所有点迹的聚类正确率为 89.17%，其中第一类航迹点中有 4 484 个由于两点间欧式距离均超过了 5.523 因此被聚类为了噪声点，第二类航迹点中有 69 个由于两点间欧式距离均超过了 5.653 因此被聚类为了噪声点，其余点均聚类正确。

而当以距离邻域 $Eps=11.251、17.191$ 进行聚类时，以上航迹中的点均包含在了相应分类的核心点邻域从 Eps 为半径的圆球区域内，因此都被正确地聚类，聚类正确率为 100%。

3 结论

本文使用一种基于 DBSCAN 算法的 ST DBSCAN 算法进行了航迹聚类实现，ST DBSCAN 算法既符合 DBSCAN 的特点和优点又增加了从时间域对目标数据集的扫描。可对任意形状的航迹聚类，且不需提前划分聚类目标个数，并增加了对包含时空域航迹数据的聚类。通过增加对扫描邻域的时间连续性约束，从而从时间域维度提高了飞机航迹聚类的准确性。通过本文的仿真实验情况，在参数选择合适的条件下可以获得很好的聚类结果。但本方法也有和 DBSCAN 相同的不足之处，即对时空域上密度不均匀、密度差异大的点迹数据集的聚类效果不稳定，且聚类效果依赖对参数的选择等。在未来的工作中可以对此方法进行进一步的优化和完善。

参考文献

[1] 宋金玉,郭一平,王斌.DBSCAN 聚类算法的参数配置方法研究[J].计算机技术与发展,2019,29(5):44-48.
 [2] 熊回香,叶佳鑫,蒋武轩.改进的 DBSCAN 聚类算法在社会化标注中的应用[J].数据分析与知识发现,2018,24(12):77~87.
 [3] 李双庆,慕升弟.一种改进的 DBSCAN 算法及其应用[J].

计算机工程与应用,2014,50(8):72-76.
 [4] 刘世平.数据挖掘技术及应用[M].北京:高等教育出版社,2010.
 [5] 孙吉贵,刘杰,赵连宇.聚类算法研究[J].软件学报,2008,19(1):48-61.
 [6] 邵峰晶,于忠清,王金龙.数据挖掘原理与算法[M].北京:科学出版社,2009.
 [7] 张良,陶海军,杨钊,等.模糊聚类的多雷达航迹关联算法[J].现代防御技术,2017,45(6):113-117.
 [8] 何爱林,周德超,陈萍,等.基于轨迹聚类的运动趋势分析[J].海军工程大学学报,2017,29(5):103-107.
 [9] FRANKR.Clustering of flight tracks[C].Proceedings of the American Institute of Aeronautics and Astronautics.Atlanta: AIAA,2010.
 [10] 韩家炜.MichelineKamber 数据挖掘概念与技术[M].北京:机械工业出版社,2007.
 [11] 韩家炜,坎伯.数据挖掘:概念与技术英文版[M].3 版.北京:机械工业出版社,2012.
 [12] BOWLES M.PYTHON 机器学习预测分析核心算法[M].沙赢,李鹏,译.北京:人民邮电出版社,2017.
 [13] 张冉,夏厚培.一种新的 k-means 聚类雷达信号分选算法[J].现代防御技术,2015,43(6):136-141.
 [14] 黄静,官易楠.基于改进 DBSCAN 算法的异常数据处理[J].软件导刊,2020,19(4):219-223.
 [15] 刘勇.基于 DBSCAN 的空间聚类算法研究与实现[D].昆明:云南大学,2017.
 (收稿日期:2021-11-15)

作者简介:

朱瑜亮(1984-),男,硕士,工程师,主要研究方向:航空电子。



扫码下载电子文档

(上接第 124 页)

会,2017:643-646.
 [13] 刘巍巍,谭承,梁栋,等.基于 BGA 技术的毫米波垂直互连设计[C]//中国电子学会.2017 年全国微波毫米波会议论文集(中册),2019:1522-1525.
 (收稿日期:2022-02-27)

作者简介:

刘昊东(1997-),男,硕士研究生,主要研究方向:小型化微波组件研制。
 吴洪江(1964-),男,本科,研究员,主要研究方向:固态微波器件和电路研制。
 余小辉(1983-),男,硕士,高工,主要研究方向:固态微波电路设计。



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