doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2016.05.018
引用格式:武红玉,厉志强,汪江涛. 系统级封装的 S 频段射频收发模块研制[J]. 电讯技术,2016,56(5):581-584. [WU Hongyu, LI Zhiqiang, WANG Jiangtao. Development of an S-band RF transceiver module with system in package technology[J]. Telecommunication Engineering, 2016, 56(5):581-584.]

系统级封装的 S 频段射频收发模块研制*

武红玉**,厉志强,汪江涛

(中国电子科技集团公司第十三研究所,石家庄 050051)

摘　要:研制了一种小体积的 S 频段射频收发系统级封装(SIP)模块,内部集成了基于多种工艺的器件。模块接收通道一次变频,发射通道二次变频,内部集成中频和射频本振信号源。模块采用双腔结构,不同腔体之间通过绝缘子进行垂直互连,大大减小了模块体积,模块体积为40 mm×40 mm×10 mm。模块采用正向设计,其主要指标的测试结果为:接收通道动态范围-100 ~ -40 dBm,输出信号 0 ~ 2 dBm,噪声系数小于等于 2.8 dB,带外抑制大于等于 50 dBc;发射通道输出信号大于等于 2 dBm,二次、三次谐波抑制大于等于 60 dBc,杂波抑制大于等于 55 dBc,相位噪声在 1 kHz 和 10 kHz 处分别小于等于-82 dBc/Hz 和-91 dBc/Hz。实测结果与仿真结果基本一致。

关键词:S 频段;射频收发系统;系统级封装;本振信号源;垂直互连结构
中图分类号:TN454　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1001-893X(2016)05-0581-04

Development of an S-band RF Transceiver Module with System in Package Technology

WU Hongyu, LI Zhiqiang, WANG Jiangtao

(The 13th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation(CETC), Shijiazhuang 050051, China)

Abstract: A miniaturized S-band radio frequency(RF) transceiver module is designed by using system in package(SIP) technology. The module integrates devices based on a variety of process. Receiving channel is realized by single-conversion, transmitting channel is realized by double-conversion, and the intermediate frequency(IF) and RF local oscillator(LO) signal source is integrated internally. Double-cavity structure is used and different cavities are vertically interconnected through the insulator to reduce the module size largely. The size of module is 40 mm×40 mm×10 mm. Forward design is used and the measured main technical specifications of the module are: receiving channel dynamic range -100 ~ -40 dBm, output signal 0 ~ 2 dBm, noise figure ≤2.8 dB, out-band rejection ≥50 dBc; transmitting channel output signal ≥2 dBm, second and third harmonic suppression ≥60 dBc, clutter rejection ≥55 dBc, phase noise ≤-82 dBc/Hz@1 kHz, ≤-91 dBc/Hz@10 kHz. The measured results are basically agree with the simulation results.

Key words: S-band; RF transceiver system; system in package; local oscillator signal source; vertical interconnection structure

1　引　言

系统级封装(System in Package, SIP)是将一个完整的电子系统或子系统高密度地封装在一个封装体内,相对于系统级芯片(System on Chip, SOC),其优势是可以使用不同工艺(CMOS、Bi-CMOS、GaAs、Si-Ge、MEMS、MCM 等)制作的不同类型(芯片、阻容、光机电、传感器、耦合器等)的器件,发挥各个工艺的优势,性能指标优异,且研发周期短,成本低[1]。从 20 世纪 90 年代美国率先将 SIP 确定为重点发展的十大军民两用高新技术以来,SIP 在各个

*　**收稿日期**:2016-02-24;**修回日期**:2016-04-15　　Received date: 2016-02-24; Revised date: 2016-04-15
**　**通信作者**:w95972@163.com　　**Corresponding author**: w95972@163.com

行业获得了快速发展和丰富应用[2]。射频 SIP 是 SIP 的一个重要分支,其主要类型包括硅基、低温共烧陶瓷(Low Temperature Co-fired Ceramic,LTCC)和多层板,主要工艺包括倒装、键合、芯片层叠、陶瓷衬底、球栅阵列(Ball Grid Array,BGA)、栅格阵列(Land Grid Array,LGA)等,典型应用有功率放大器(Power Amplifier,PA)、802.11b WLAN、蓝牙等。文献[3]介绍了一款 3D SIP 无线生物电子传感器,内部集成了2.4 GHz无线收发器、天线、微控制器、晶体和无源器件等多种器件,不同层通过焊料球(Solder Ball)连接,尺寸仅为15 mm×15 mm。

本文介绍了一种 S 频段变频收发 SIP 模块的研制。模块使用器件类型丰富,封装类型包括裸芯片、QFN、LFCSP、SMT 陶瓷外壳、SMT 金属外壳等,器件制造工艺包括 CMOS、GaAs、Si-Ge、混合集成、声表面波(Surface Acoustic Wave,SAW)。通过科学的原理图设计、软件仿真、双腔结构设计和器件布局,实现了模块的小型化和较优异的指标。

2 模块设计

模块要求发射二次变频,接收一次变频,内部要求集成本振信号源和多个滤波器,以抑制谐波和杂波,整个封装体积要求小于40 mm×40 mm×10 mm。指标要求为接收动态范围-100 ~ -40 dBm,输出信号-3 ~ +3 dBm,噪声系数小于等于 3 dB,带外抑制大于等于 45 dBc;发射输出信号大于等于 2 dBm,谐波抑制大于等于 50 dBc,杂波抑制大于等于 50 dBc,相位噪声在 1 kHz 和 10 kHz 处分别小于等于-80 dBc/Hz和-90 dBc/Hz。

由于模块的发射输入频率和接收输出频率都为几十 MHz,这个频段的声表面波滤波器和 LC 滤波器体积都较大,为了满足模块的封装体积要求,必须充分利用高度空间,把模块分成上下两个腔体,腔体之间通过垂直互连结构连接。

2.1 本振源部分的设计

本 SIP 模块作为一个具有完整功能的系统,内部集成本振信号源。设计时,为了减少本振源的数量,接收本振源和发射二次变频本振源设计为相同频率,这样发射和接收总共需要两个本振源即可。

器件选型上,选择基于单片集成电路工艺的一款频率综合器作为本振源,它功能强大,可以输出一路中频信号和一路射频信号,内部集成 VCO、环路滤波器、鉴相器,采用 28 针 QFN 封装,体积仅为 5 mm×5 mm×0.85 mm。SIP 模块上电时,内部集成的一个 QFN 封装的 MCU(单片机)自动通过三线串行接口对频率综合器进行编程,实现中频和射频本振源的输出,其中射频信号功分成两路,分别提供给接收和发射二次变频。为了控制谐波和杂波,同时为了给混频器提供足够大的本振信号,频率综合器输出信号经过放大器和滤波器,然后再提供给混频器。整个本振源部分的框图如图 1 所示。

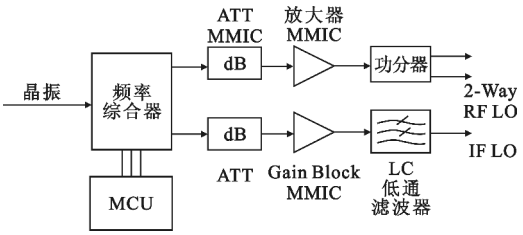


图 1 中频和射频本振源原理框图

Fig. 1 The scheme diagram of IF and RF LO signal source

频率综合器输出的射频信号相位噪声测试结果为射频信号-82 dBc/Hz@1 kHz、-92 dBc/Hz@10 kHz,输出的中频信号相位噪声为-112 dBc/Hz@1 kHz、-120 dBc/Hz@10 kHz,整个 SIP 模块的相位噪声主要由射频本振源决定。

2.2 接收链路的设计和仿真

接收链路的原理框图如图 2 所示。

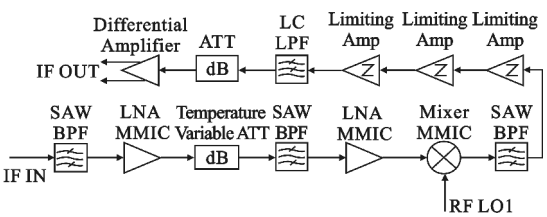


图 2 接收链路仿真原理框图

Fig. 2 The simulation scheme diagram of receiving link

接收信号输入后,需要先进入一个滤波器来抑制带外干扰信号,由于该滤波器位于接收链路第一级,根据噪声系数的级联公式[4]

$$F_{cas}=F_1+\frac{F_2-1}{G_1}+\frac{F_3-1}{G_1G_2}+\cdots\ , \qquad (1)$$

其插损对链路噪声影响很大,选择的表面波滤波器插损做到了1.5 dB以内。

第二级为噪声系数1.4 dB的低噪声放大器 MMIC,其噪声对链路噪声影响也很大。链路中的温补衰减器用于高低温时补偿增益变化,维持增益稳定。限幅放大器用来实现-100 ~ -40 dBm的宽动态范围,其增益27 dB,限幅输出功率0 dBm,三级级联使用。链路末端,信号经低通滤波器抑制谐波后,经差分放大器输出,可以直接驱动后级的 ADC 器件。

为了达到-100 dBm的接收灵敏度[5],设计的要点是混频后要先中频滤波,再进入限幅放大器,而不

是一般的先放大再滤波。如果先放大的话,当链路接收信号为 -100 dBm 时,由于前面增益总共为 36 dB,进入限幅放大器的射频信号功率为 -64 dBm。此时进入限幅放大器的噪声功率为[4]

$$N_o = k(T_A + T_e)BG \text{ 。} \tag{2}$$

式中:$k = 1.38 \times 10^{-23}$ J/K 是玻尔兹曼常数;$T_A = 290$ K;T_e 为系统的等效噪声温度[4]。由于

$$T_e = (F-1)T_A \text{。} \tag{3}$$

式中:F 为系统的噪声系数,无单位。把公式(3)代入公式(2)得到

$$N_o = kFT_ABG \tag{4}$$

上式噪声功率单位为 W,换算成 dBm 得到

$$N_o = 10\lg 1000kT_A + 10\lg F + 10\lg B + 10\lg G \text{ 。} \tag{5}$$

进一步计算得到

$$N_o = -174 \text{ dBm/Hz} + 10\lg F + 10\lg B + 10\lg G \text{ 。} \tag{6}$$

取噪声系数为3 dB,前级带通滤波器通带带宽 50 MHz,增益36 dB,得到噪声功率为-58 dBm,比射频信号功率-64 dBm还要大6 dB。该噪声功率进入限幅器会导致限幅器饱和而阻塞射频信号的放大,导致-100 dBm进入接收链路时被噪声淹没,无法达到该接收灵敏度,所以混频后必须先经过带宽为 1 MHz、插损11 dB的中频滤波器滤波,此时射频信号功率为-75 dBm,噪声功率为-86 dBm,再进入限幅放大器就没有问题了。

上述计算结果在软件仿真中得到了验证。同时,使用预算增益法仿真,得到了接收链路主要指标的仿真结果为接收动态范围-100 ~ -40 dBm,输出信号 1 ~2 dBm,噪声系数2.7 dB,满足指标要求。

2.3　发射链路的设计和仿真

发射链路的原理框图如图 3 所示。

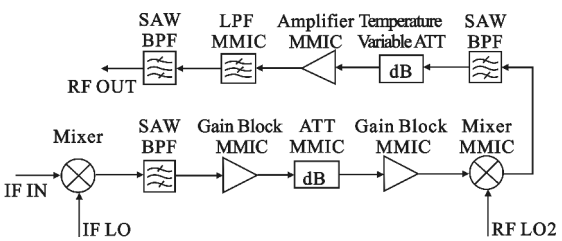


图 3　发射链路仿真原理框图

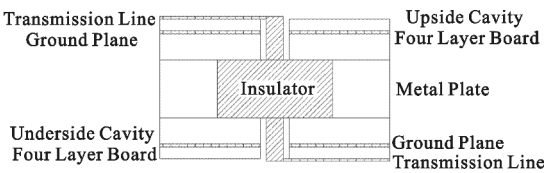
Fig. 3 The simulation scheme diagram of transmitting link

发射链路经过两次混频-滤波-放大后,末端经过一个低通滤波器 MMIC 和一个声表面波带通滤波器后输出,以保证谐波和杂波抑制。

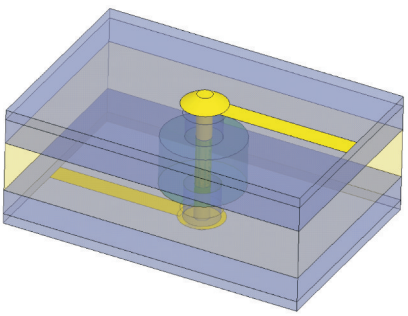
在仿真软件中,使用预算增益法,仿真得到发射链路的输出信号为4.2 dBm,满足设计要求;使用谐波平衡法,设置已经测得的本振源的相位噪声数值,仿真得到发射输出信号的相位噪声为-82 dBc/Hz @1 kHz、-91.5 dBc/Hz@ 10 kHz,与射频本振源的相位噪声一致,满足指标要求,后级链路没有使相位噪声变差。

2.4　垂直互连结构设计

模块采用上下双腔结构,每个腔体用一个 4 层 PCB 板来集成芯片和元器件,电路板上层为微波,下层为直流和控制。不同腔体之间通过垂直互连结构进行连接,垂直互连结构有多种形式,考虑到成本和可靠性,该模块采用玻璃绝缘子来实现。垂直互连结构的剖面视图如图 4(a)所示。4 层电路板厚 0.7 mm,其中传输线层介质厚度0.2 mm,介电常数 4.4,损耗角正切 0.02,双腔分割底板厚度1 mm,为了减小尺寸,绝缘子使用高频绝缘子,直径 1.93 mm,插针直径0.3 mm,在三维电磁场仿真软件中建立垂直互连结构的模型,如图 4(b)所示。



(a)剖视图



(b)三维电磁场仿真模型

图 4　垂直互连结构剖视图和三维电磁场仿真模型

Fig. 4 The cutaway view and 3D EM simulation model of vertical interconnection structure

模型中的锥体为仿真绝缘子插针焊接后的焊料。仿真显示焊料形状对驻波有一定影响,焊接时保证焊点光滑、焊锡量合适即可。经过优化,垂直互连结构在 S 频段驻波小于 1.2,插损小于0.8 dB,满足使用要求。该结果在模块整体测试中得到了验证。

3　模块布局

模块布局上,为了减少信号串扰,满足谐波抑制、杂波抑制指标,接收通道和发射通道分开,接收通道使用一个腔体,发射通道和本振源部分使用一个腔体,同时本振源部分使用屏蔽罩进行隔离。同

时,裸芯片的位置尽量与电装器件离开一定距离,以避免电装器件返修时污染芯片。

4 测试结果

模块的装配工艺包括电装、粘接、键合、激光封焊和激光打标等,顺序上,先电装完毕后,再进行裸芯片的粘接和键合,以保护裸芯片。模块实物照片如图 5 所示。

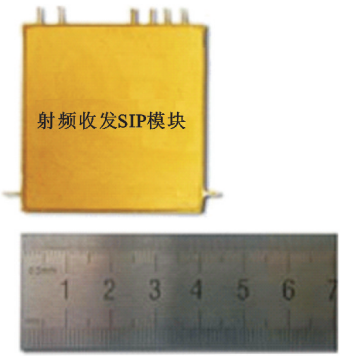


图 5 模块实物照片

Fig. 5 The photo of developed module

模块的常温(25℃)测试结果与技术要求、仿真结果的对比如表 1 所示。

表 1 测试结果与技术要求、仿真结果对比

Tab. 1 Contrast between test results, technical requirements and simulation results

指标名称	技术要求	仿真结果	测试结果
接收动态范围/dBm	−100 ~ −40	−100 ~ −40	−100 ~ −40
接收输出信号/dBm	−3 ~ +3	1 ~ 2	0 ~ 2
接收噪声系数/dB	≤3	2.7	2.8
发射输出信号/dBm	≥2	4.2	3.2
发射相位噪声(1 kHz)/(dBc · Hz^{-1})	≤−80	−82	−82
发射相位噪声(10 kHz)/(dBc · Hz^{-1})	≤−90	−91.5	−91

从表 1 可以看出接收输出信号和发射输出信号的测试结果与仿真结果稍有差别,这是由于接收通道和发射通道元器件都比较多,链路较长,装配偏差导致。此外,通过三级限幅放大器的使用和链路顺序的合理设计,实现了良好的动态范围。

模块其余测试结果为接收通道带外抑制大于等于 50 dBc,发射通道二次、三次谐波抑制大于等于 60 dBc,杂波抑制大于等于 55 dBc,均满足技术要求。

5 结束语

本文研制的系统级封装 S 频段射频收发模块实现了一个完整的射频收发系统。模块通过双腔垂直互连结构的设计、多个 GaAs MMIC 裸芯片的选用以及合理的电路布局,实现了 100 多个元器件的三维高密度封装,使模块的体积和重量缩减到传统模块的 1/3 左右,满足了现代电子设备小型化、轻量化的急迫需求。由于声表面波滤波器体积较大,将来如果采用最新研发的薄膜体声波谐振器(Film Bulk Acoustic Resonator, FBAR)滤波器芯片,则可进一步减小模块体积。

参考文献:

[1] 杨邦朝,顾勇,马嵩. 系统级封装(SIP)的优势以及在射频领域的应用[C]//第十六届全国混合集成电路学术会议论文集. 杭州:中国电子学会,2009:28-30.
YANG Bangchao, GU Yong, MA Song. The advantage and application in RF field of system in package(SIP) [C]// Proceedings of the Sixteenth Nationally Hybrid Integrated Circuit Academic Conference. Hangzhou: Chinese Institute of Electronics, 2009: 28-30. (in Chinese)

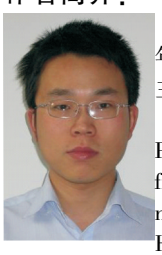
[2] 李振亚,赵钰. SIP 封装技术现状与发展前景[J]. 电子与封装,2009,9(2):9-10.
LI Zhenya, ZHAO Yu. The status and future prospects of system in package technology [J]. Electronics & Packaging, 2009, 9(2): 9-10. (in Chinese)

[3] WALTER D R, KRISTOF V. RF SIP technologies enabling wireless modules [C]//Proceedings of 2011 IEEE Antennas and Propagation Conference. Leicester, England: IEEE, 2011: 1-4.

[4] POZAR M D. Microwave engineering [M]. 4th ed. New York: John Wiley & Sons Ltd., 2012: 505-506, 503.

[5] 徐兴福. ADS2008 射频电路设计与仿真实例[M]. 北京:电子工业出版社,2009.
XU Xingfu. The example of ADS2008 RF circuit design and simulation [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2009. (in Chinese)

作者简介:



武红玉(1982—),男,河北邢台人,2005 年于电子科技大学获学士学位,现为工程师,主要从事微波、毫米波电路和微系统的设计;

WU Hongyu was born in Xingtai, Hebei Province, in 1982. He received the B. S. degree from University of Electronic Science and Technology of China in 2005. He is now an engineer. His research concerns microwave and millimeter wave module and MEMS microsystem design.

Email: w95972@163.com

厉志强(1984—),男,山东日照人,工程师,主要从事微波、毫米波电路的设计;

LI Zhiqiang was born in Rizhao, Shandong Province, in 1984. He is now an engineer. His research concerns microwave and millimeter wave circuit design.

汪江涛(1980—),男,湖北潜江人,高级工程师,主要从事微波单片集成电路的设计。

WANG Jiangtao was born in Qianjiang, Hubei Province, in 1980. He is now a senior engineer. His research concerns microwave MMIC design.