

射频发射前端的小型化及电磁兼容设计

陈守维^{1,2,3}, 王启东^{1,3}, 陈 诚^{1,2,3}, 李 君^{1,3}, 曹立强^{1,3}, 陆 原^{1,3}

(1 中国科学院 微电子研究所系统封装与集成研发中心, 北京 100029; 2 中国科学院大学, 北京 100049;
3 华进半导体封装先导技术研发中心有限公司, 江苏 无锡 214135)

摘 要: 介绍了一种基于微波板(HL972)工艺的发射前端, 利用场路联合仿真分析了本振链路, 使本振链路具有足够的输出功率和良好的谐波抑制. 利用全波仿真工具(HFSS)研究了信号路径的损耗、电磁辐射和器件之间的耦合问题. 仿真数据显示, 基片集成波导(SIW)带通滤波器带内插损低于 3 dB, 回波损耗大于 15 dB. 另外, 混频器的 RF 端口与压控振荡器(VCO)的输出端口最大耦合为 -56 dB. 这表示两者之间有很好的隔离度. 最后研究了射频电路板的电磁兼容设计.

关键词: 微波板; 场路联合仿真; 基片集成波导; 电磁兼容

中图分类号: TN4

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2017)06-0058-04

RF Front-End of Miniaturization and Electromagnetic Compatibility Design

CHEN Shou-wei^{1,2,3}, WANG Qi-dong^{1,3}, CHEN Cheng^{1,2,3}, LI Jun^{1,3},
CAO Li-qiang^{1,3}, LU Yuan^{1,3}

(1 Microsystem Packaging Research Center, Institute of Microelectronics of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3 National Center for Advanced Packaging (NCAP), Wuxi 214135, China)

Abstract: This paper demonstrates a novel highly integrated transmitter front-end based on microwave board. By using the field-circuit co-simulation analysis, the local oscillator link is analyzed, which makes the local oscillator have enough output power and good harmonic suppression. Full wave simulation tool (HFSS) is used to study the loss of signal path, the coupling between electromagnetic radiation and device. The Simulation results show, the third substrate integrated waveguide (SIW) BPF insertion loss is less than 3 dB, return loss greater than 15 dB. In addition, The EM coupling between the voltage controlled oscillator (VCO) output and the mixer RF port of the highest coupling is -56 dB, indicating very good isolation. Finally, we study the EMC design RF circuit board.

Key words: microwave board; the field-circuit co-simulation analysis; Substrate integrated waveguide BPF; EMC

1 引言

近年来, 由于集成电路的快速发展, 特别是毫米波器件成本的下降和性能的提升, 为研发具有宽频带、大容量、小体积的无线通信系统提供了条件. 高集成度的无线收发系统包括数字信号、模拟信号、微波器件、大功率和小功率的射频组件, 且不同类型的

电压也分布在印刷电路板上(PCB). 这必将会有电磁兼容的问题产生, 包括谐波产生、信号串扰、相位噪声恶化等情况. 射频电路板的设计对减小系统电磁辐射、干扰具有很重要的意义^[1-2]. 因此, 要设计一个完美的射频电路的 PCB, 以防止并抑制电磁干扰从而提高电磁兼容, 让系统的性能达到最优, 让无源器件的损耗降到最低就成为设计射频部分电路的一

收稿日期: 2016-09-09; **修回日期:** 2016-10-12

基金项目: 国家高技术研究发展计划(“八六三”计划)(2015AA016904); 国家科技重大专项(2013ZX02502)

个非常重要的目的^[3-6]。

本文提出了一款基于微波板(HL972)的 Ka 波段的发射前端,阐述了该发射前端的主体模块、电路制作及电磁兼容设计,并对集成的前端进行了电磁仿真分析,给出了仿真和测试数据。

2 发射系统设计

2.1 系统电路结构

发射系统框图结构如图 1 所示,包括天线、功率放大器(PA)、混频器、有源宽频带的 x2 倍频器、低噪声放大器、SIW 滤波器和压控振荡器(VCO)和中频(IF)处理模块组成。各器件间用 50 Ω 微带线连接。

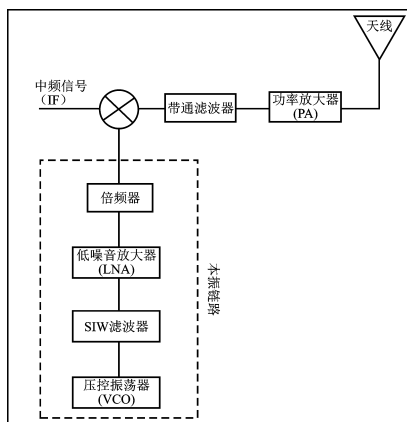


图 1 发射机系统框图

2.2 本振链路设计

当整个通信系统的载频、工作频段、发射功率及天线的功率容量经确定时,本振链路主要通过合理的选取压控振荡器(VCO)源、倍频次数和滤波器的通带,使得倍频后的本振信号(LO)满足中频(IF)的调制要求,输出功率确保发射系统具有良好的动态范围和传输距离。在本文,我们提出的本振链路方案是采用一次二倍频的结构,基频是(13.2~13.5 GHz)的压控振荡器(VCO)作为输入信号,经过一次二倍频得到(26.4~27 GHz)的本振(LO)信号。结构图如图 1 的本振链路部分。

为了验证理论链路计算的合理性,本文采用场路的联合仿真方法分析,首先把本振链路的版图导入三维电磁仿真(HFSS)工具中,得到整条链路的 S6P 文件,且 S6P 文件是考虑了链路的损耗及各个器件的相互影响,然后把得到的 S6P 文件导入 ADS 中,采用谐波仿真方法分析,得到本振所需信号及功率。仿真原理图如图 2 所示。

设置压控振荡器(VCO)输出频率为 13.5 GHz,输

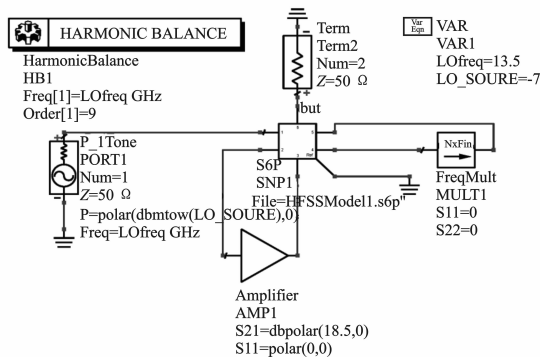


图 2 发射前端仿真原理图

出功率为 -7 dBm,并在谐波仿真器中取谐波为 9 次的情况下,得到本振链路的输出频谱,其结果在图 3 呈现。从频谱图上可以知道,27 GHz 的输出功率大于 3 dBm,谐波抑制大于 15 dBc,满足系统要求。

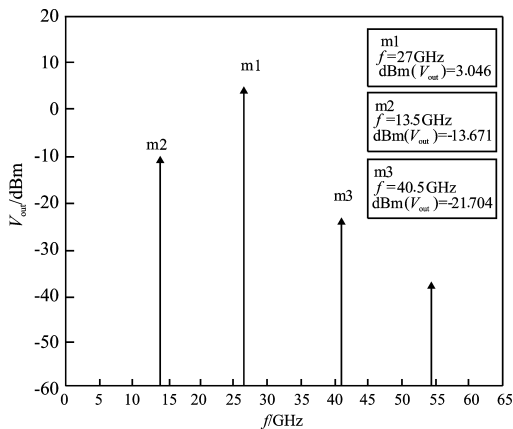


图 3 倍频器输出频谱图

由于射频器件具有非线性,会产生多次谐波,因此在链路上需要用滤波器来对谐波的抑制,本文设计了一款集成在 PCB 板上的 SIW 滤波器,来实现通带选取和谐波抑制。采用 Ansoft HFSS 软件仿真结果如图 4 所示。其带内差损低于 3 dB,回波损耗大于 15 dB,在 15 GHz 时抑制已经达到 20 dB。已经达到系统要求。

3 射频系统设计

发射前端模块的 PCB 设计如下所示。

顶层为信号层,基板材料是 HL972,其中安装的器件包括压控振荡器(VCO)、混频器(Mixer)、倍频器等射频发射器件。器件之间的互连线为微带线,按照 50 Ω 的阻抗匹配设计,线宽为 0.327 mm。

第二层是金属平面地层(GND),根据基尔霍夫定律可以知道,大的金属平面具有镜像作用,在 PCB 结构中,某些导线上电流的辐射由于镜像原理

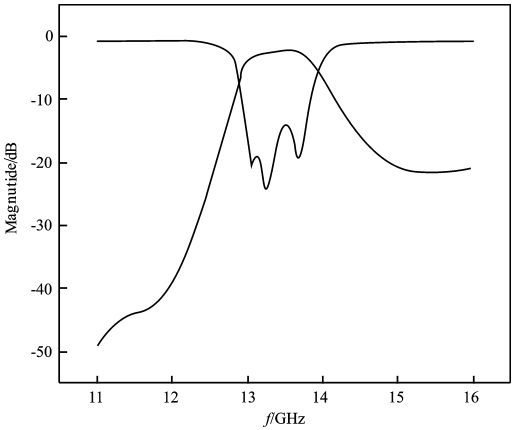


图 4 基片集成波导(SIW)滤波器仿真结果图

被抵消,所以本层可以作为电磁场的镜像平面. 另外,此层还可以为高频信号提供返回路径,避免共模射频电流的产生. 因此,良好的地平面设计是减少电磁干扰和信号衰减的重要手段.

第三层为电源层(PDN). 因为稳压器和芯片之间有许多互连,如过孔、平面、封装引线和键合线等. 如果进入芯片的电流发生突变,当变化的电流流过 PDN 互连阻抗时就会引起电压降. 为了使电流变化时引起的这个压降最小,PDN 阻抗就要小于一定值. 在高频时,要使 PDN 的阻抗比较小,最好的方式就是使回路电感最小,而平面对是回路电感最小的一种方式. 最底层设置为地层,有电源孔区域用绿油处理,防止短路,其他地方全面覆铜,表面用镍巴金处理.

4 版图布局 and 全波电磁分析

在 PCB 电路中相关的有源和无源组件、控制线、信号线路,以及 I / O 端口和连接电缆可以产生电磁辐射. 基于辐射产生机制,电磁辐射分为差模辐射和共模辐射. PCB 板上辐射的等效电路图如图 5 所示.

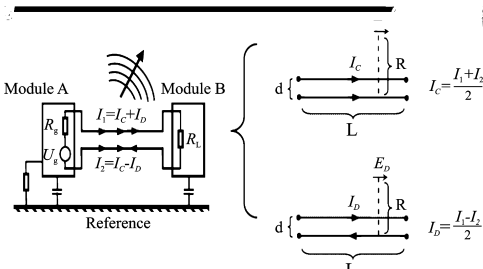


图 5 电磁辐射等效电路图

C. Paul 提出了估算公式的最大共模和差模辐射. 在他的方法中,电流 I_1 和 I_2 分解成两个连接常见的共模电流 I_c 和差模电流 I_d ,见图 5. 假设导线长度 $L(\text{cm})$,线距离为 $d(\text{cm})$,频率 $f(\text{MHz})$,观察点

是 $R(\text{m})$ 从第一线,则共模电流 $I_c(\text{mA})$:

$$E_{Cmax} = 1.257 \times 10^{-6} \frac{I_c f L}{R} \text{ in V/m}$$

差模电流 $I_d(\text{mA})$:

$$E_{Dmax} = 1.316 \times 10^{-14} \frac{I_d f^2 L d}{R} \text{ in V/m}$$

可以看出,差模电流辐射取决于长度 L 和线间距 d ,及频率 f 的平方. 共模电流辐射只取决于线长度 L 和频率. 这个估计公式是公认的为 PCB 设计,在此基础上,一些经验设计规则通常用于减少电磁辐射,包括布局及材料属性等其他因素.

由于发射前端的基片集成波导滤波器(SIW)、天线、传输线和功率放大器(裸芯片)、混频器(裸芯片)、倍频器(裸芯片)直接集成在 PCB 版上,它们会相互影响. 因此系统器件在版图(Layout)上的布局是非常关键. 布局主要考虑以下因素:(1)寄生参数和器件之间的电磁干扰最小;(2)模块区域的最小化;(3)表贴(SMD)器件的布局;(4)测试和调试的方便性. 功率放大器(PA)、混频器(Mixer)、倍频器(裸芯片)需要通过邦定线和地连接,因此芯片周围需要地平面分配,另外还有抗干扰作用.

在 Layout 上设计有效的阵列地孔是提供一条到地平面的低电感通路,具有隔离作用. 可以抑制非线性器件的非线性效应产生的多次谐波和混合频率,并可以使高频分量形成回路防止辐射. 利用三维电磁场仿真工具 HFSS 分析了从本振链路的 VCO 到 BPF、LNA、倍频器和输出传输线,到发射链路的 BPF, MIXER, 到 PA 的相互干扰问题. 混频器(mixer)的 RF 端口与 VCO 的输出端口之间的隔离展现如图 6 所示. 从图中可以看到它最大的耦合度达到 -56 dB,这表明具有了很好的隔离度,本振的泄露得到了很好的抑制,已经达到系统要求.

我们对 VCO 进行单独的近场扫描,扫描范围是 $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$,观察其空间辐射的大小,仪器有频谱仪、电缆、近场扫描台. 探头距被测件的 1 mm . 扫描的步进是 0.5 mm . VCO 在空间辐射最大的功率是 -57.4 dBm. 达到系统要求.

5 结束语

我们针对 Ka 波段设计一款发射前端模块,所有元器件集成在 PCB 叠层中,包括功率放大器,混频器,压控振荡器,倍频器,基片集成波导(SIW)滤波器. 利用场路的联合仿真方法分析了本振链路. 仿真结果显示,本振链路的输出功率大于 3 dBm,其谐

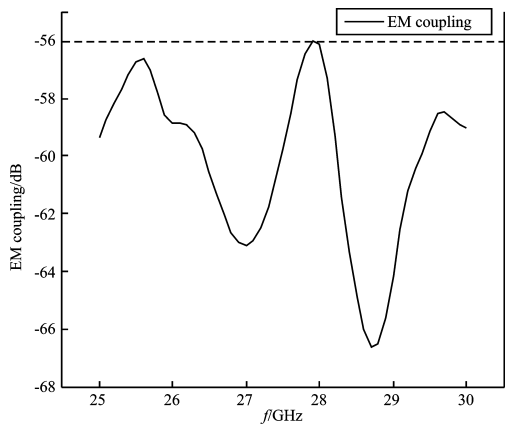


图 6 混频器 RF 端口与 VCO 输出端口的隔离度

波抑制大于 15 dBm. 另外,我们还对射频电路板的电磁兼容进行了设计,通过对本振源的近场扫描得到,空间最大辐射功率为-57.4 dBm,表明具有很好的抑制,满足系统要求.

参考文献:

[1] 牟志新,丁高,张望. 射频电路 PCB 板的电磁兼容性设计[J]. 电子质量,2006,27(1):62-65.

[2] Johnson H W, Graham M. High-speed digital design: a handbook of black magic[J]. Workshop Emv'01 Augsburg, 1993, 12(5):42 - 50.

[3] 杨进候,王志杰,许军. 导体传输线间的高频耦合干扰模型[J]. 鱼雷技术,2005,23(3):18-20.

(上接第 57 页)

便捷,根据个人的需要更改码率可获得不同大小的文件. 该系统在视频存储及视频远程监控等领域有着广阔的应用前景.

参考文献:

[1] 邓娜,田增山,袁正午. 基于达芬奇技术的视频监控系统设计[J]. 电子技术应用,2015,41(1): 25-31.

[2] 朱衍明. 基于 TMS320DM6467 的多格式视频处理技术研究[D]. 南京:南京理工大学,2013:39 -50.

[3] 张银钱,基于 H_264 的实时全景视频压缩传输统的设计与实现[D]. 北京:北京工业大学, 2015:29-47.

[4] 林海东,余强. 基于 H264 的网络视频监控系统设计与实现[J]. 西华大学学报(自然科学版), 2014,33(2):

[4] 赵翔,晏奇林,闫丽萍. 多导体传输线高频场线耦合模型的研究综述[J]. 强激光与粒子束,2015,27(12): 12-18.

[5] 彭强,周东方,侯德亭,等. 基于 BLT 方程的微带线电磁耦合终端响应[J]. 强激光与粒子束,2013,25(5): 1241-1246.

[6] Sitaraman S, Suzuki Y, White C, et al. Modeling, design and demonstration of multi-die embedded WLAN-RF front-end module with ultra-miniaturized and high-performance passives.[C]//2014 IEEE 64th Electronic Components and Technology Conference (ECTC). Orlando, FL: IEEE,2014: 1264-1271.

作者简介:

陈守维 男,(1988-),硕士. 研究方向为射频前端与天线集成.

王启东 男,(1983-),博士,副研究员. 研究方向为系统级封装技术.

陈 诚 男,(1993-),博士. 研究方向为三维封装关键技术.

李 君 女,(1981-),博士,副研究员. 研究方向为三维封装中的电磁兼容.

曹立强 男,(1974-),博士,研究员. 研究方向为先进系统级封装.

陆 原(通讯作者) 男,(1957-),博士,研究员. 研究方向为先进电子封装、光电封装. E-mail:luyuan@ime. ac. cn.

22-26.

[5] 毕厚杰. 新一代视频压缩编码标准—H. 264/AVC[M]. 北京:人民邮电出版社,2005:84-147.

[6] 张晶,戴明,孙丽娜,等. 基于 DM6467T 视频压缩存储和网络传输系统设计[J]. 液晶与显示, 2013,12(6): 912-916.

作者简介:

张 硕 男,(1989-),硕士研究生. 研究方向为 DSP 视频处理. E-mail:hanshuo1029@aliyun. com.

李 博 男,(1972-),副教授,硕士生导师. 研究方向为精密检测设备、嵌入式电子电路系统.

杨 婷 女,(1990-),硕士研究生. 研究方向为 DSP 视频处理.