

基于 L 型电阻网络匹配的 ROF 发射模块设计

折 骞^{1,2,3}, 刘丰满^{1,4}, 马鹏程^{1,3}, 赵 慢^{1,3}, 陆 原^{1,2,3}

(1 中国科学院 微电子研究所, 北京 100029; 2 中国科学院 物联网研究发展中心, 江苏 无锡 214135;
3 中国科学院大学, 北京 100049; 4 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: 本文介绍了一种基于 ROF 技术的多制式、宽频带的光发射模块的研制方案. 该模块采用数字光模块的 QSFP 接口实现多通道传输, 通过 L 型电阻匹配网络实现软硬板之间的阻抗匹配, 并且对模块链路中存在的信号完整性问题利用全波仿真工具 (HFSS) 进行了优化设计与研究. 测试结果表明, 该方案可以保证在 DC-6 GHz 保证很好的增益平坦度.

关键词: ROF 发射模块; QSFP 接口; L 型网络阻抗匹配; 信号完整性

中图分类号: TN41 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000—7180(2018)10—0107—05

Design of ROF Transmission Module Based on L-type Resistance Network Matching

SHE Qian^{1,2,3}, LIU Feng-man^{1,4}, MA Peng-cheng^{1,3},
ZHAO Man^{1,3}, LU Yuan^{1,2,3}

(1 Institute of Microelectronics of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;
2 CAS R&D Center For Internet of Things, Wuxi 214315, China;
3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
4 National Center for Advanced Packaging (NCAP) Wuxi 214315, China)

Abstract: This paper introduces a design scheme of multi-standard and broadband light emission module based on ROF technology. The module uses QSFP interface to realize multi-channel transmission. The impedance matching of rigid-flex PCB interconnection is realized by L-type resistance matching network, and the signal integrity problem in the module link is optimized and studied by using full-wave simulation tool (HFSS). The test result shows that the module can guarantee a good gain flatness at DC-6 GHz.

Key words: ROF transmission module; QSFP interface; impedance matching of L-type network; signal integrity

1 引言

ROF(Radio Over Fiber)技术是将微波、射频等无线信号转换为光信号并通过光纤来传输的一种技术. ROF 可以将光纤通信远距离、低损耗、高带宽的优点和无线通信的接入灵活、快捷方便的特点结合在一起, 一方面极大地提高无线通信的带宽和速率, 另外一方面也使用户可以在任何地方快速高效的接入到移动互联网中^[1].

近年来移动通信技术经历了 2G, 3G, 4G 的发展历程, 通信频率在逐步提高. 2016 年 5 月已经确定 5G 通信在我国的试验的 6 GHz 以下低频段频率为 3.3 GHz 到 3.6 GHz. 此外也有工作在 2.4 GHz, 5.8 GHz 频段的 WLAN(Wireless Local Access Network)^[2]. 为了能够支持多种无线通信制式, 覆盖移动通信 2G, 3G, 4G, WLAN 以及未来 5G, 本文设计了一款可以实现 DC-6 GHz 的宽频带的多制式 ROF 发射光模块.

2 电路系统设计

2.1 电路原理设计

基于对多通道的设计要求,利用 4 收 4 发的 QSFP 接口作为光发射模块的射频信号接口,其通道可以满足 DC-6 GHz 的带宽,并且利用可插拔的接口设计可以简化 ROF 系统中基站(BS).

ROF 发射模块系统结构如图 1 所示,模块与外部的电接口为 QSFP 接口,DC-DC 电压模块为功率放大器提供电压,电流驱动电路为 TOSA 内部光电二极管提供直流偏置. 射频信号经过 QSFP 进入射频放大器放大之后,通过 Bias-Tee 电路对激光器进行直接调制,调制之后的四路光载波信号通过波分复用器汇集在一起,并通过光纤耦合器耦合到一根单模光线中进行光信号传输^[3,4].

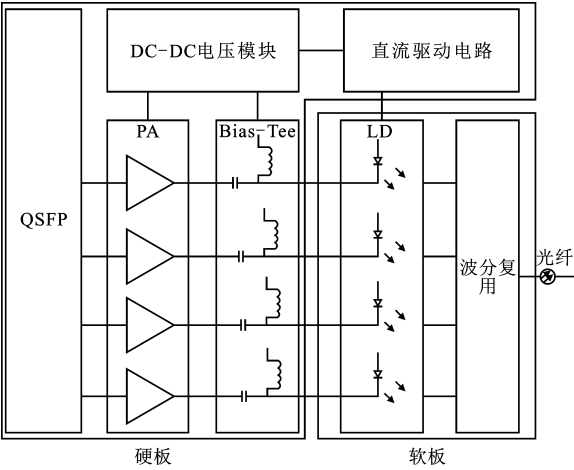


图 1 电路结构框图

2.2 版图布局设计

本文设计的射频光发射模块共有四路通道,由于 QSFP 金手指的 I/O 接口分布在表层和底层,所以有一部分传输线需要通过通孔实现从表层到底层的信号转换. 本模块 PCB 板设计为六层的对称结构,叠层结构如图 2 所示. 电路板的顶层和底层作为信号层放置元器件和高速走线,且为了保证信号线的传输性能,在上下两层都采用高频介质材料. 材料采用了 M6 R5775 的双面覆铜板,它的介电常数是 3.42,损耗角正切为 0.003;第二层和第五层作为地层,是信号层的返回路径,在高频信号线下方需要保证回流平面的完整,以控制高频信号的特性阻抗;第三层和第四层作为电源平面层,为模块的各种电源提供足够大的电源平面,同时将电源平面和地平面尽量靠近^[5],降低系统回路噪声,减小电源平面阻

抗^[6]. 对于中间的电源层和参考地层,我们采用了 FR4 的双面敷铜板,它的介电常数为 3.7,损耗角正切为 0.026.

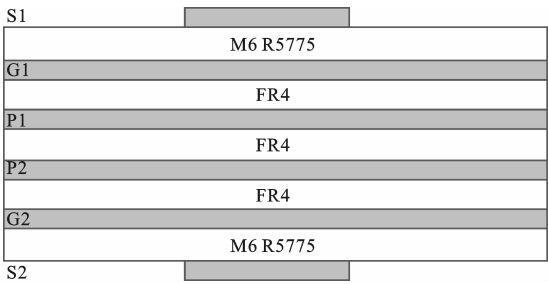


图 2 叠层结构

3 仿真分析

本文所设计的传输线采用微带线结构. 在进行 PCB 版图设计和制作时,会有过孔、焊盘、拐角以及线宽/间距变化等阻抗不连续点产生. 为了减小这些阻抗不连续点对高速信号线总体传输特性的影响,我们利用 HFSS 对模块中引起信号质量衰减的关键结构进行仿真优化.

3.1 QSFP 金手指结构

QSFP 接口一般是用于数字光模块,信号线是以 GSSG 的走线形式进行数据传输. 对于传输单端信号线的 ROF 模块需要对该结构进行优化与处理. 因为 QSFP 电接口处的焊盘宽度大于传输线宽,产生了容性失配,所以需要挖掉容性失配结构下方的一层或多层铜面以达到补偿容性阻抗失配的效果^[6]. 将金手指与插槽及测试板的 SMA 接头一起进行仿真,仿真结果会更具真实性. 以下是对接口处进行优化的三种方式:

方式一:首先对在 QSFP 金手指与插座连接部分的金手指对应的首先对金手指下的第二层地平面和第三层电源平面进行了挖空,通过 HFSS 软件参数化仿真,确定挖空的最优尺寸.

方式二:在方式一的基础上,为了减小谐振,可以将高速信号在金手指处的回流路径缩短,即在高速信号线的两边 GND 金手指上放置盲孔,使其直接与下层的 GND 层相连. 因为 QSFP 接口对应的差分线只需要进行单端信号传输,所以对另一条信号线端接 50 Ω 电阻,减少信号线与旁边静态网络的互相耦合对信号的影响.

方式三:在方式一和方式二的基础上,为了进一步优化,将端接电阻的信号线在金手指处直接短接到 GND,作为高速信号线的参考回流路径. 且在端

接电阻的信号线金手指上放置盲孔减少谐振。

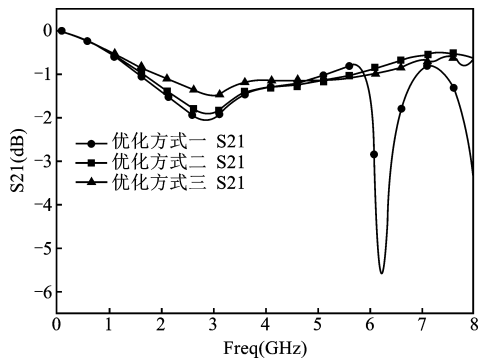


图 3 S21 仿真结果对比图

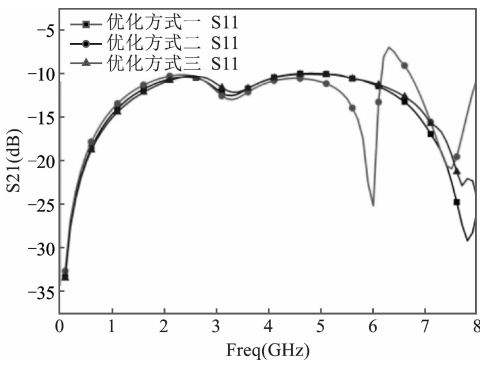


图 4 S11 仿真结果对比图

通过比较方式一和二发现在金手指放置盲孔短接到 GND,会在很大程度上减小谐振;方式二和三表明端接信号线的金手指通过盲孔短接到 GND 上,可以进一步提高平坦度.通过方式三,DC-6 GHz 带宽内插入损耗 S21 大于-1.5 dB,平坦度很高,且回波损耗 S11 小于-10 dB.因此 QSFP 接口的优化方法采用方式三.仿真结果如图 3、图 4 所示.

3.2 PCB 板与柔性线路板连接设计

TOSA 模块与柔性线路板的电路原理如图 5 所示.差分信号线被接在激光器的两极,阴极 LDX-与输入偏置和射频信号连接,阳极 LDX+与电源连接.射频信号从 LDX-输入,LDX+输出,柔性线路板和和刚性线路板的连接部分通常会产生阻抗失配,引起反射增强、插入损耗和串扰增大等问题,影响信号的正常传输,所以需要 LDX-、LDX+部分进行阻抗匹配.

3.2.1 LDX-部分

首先对 LDX-部分进行优化设计.由于激光器自身阻抗比较小,经过匹配后器件的输出阻抗为 25 Ω,所以连接激光器模块的柔性线路上高速走线阻抗也匹配为 25 Ω,与 50 Ω 的刚性线路板高速信

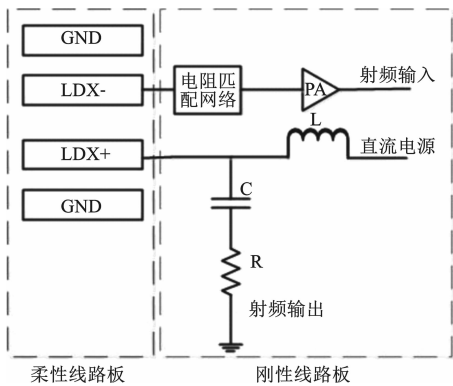


图 5 柔性线路板与刚性线路板连接图

号线特性阻抗存在阻抗失配问题,本文提出采用电阻匹配网络的方式来进行优化.

在高频高速电路链路设计中,利用匹配网络可以使射频模块在无相移的情况下确保最大功率传输,通过在源和负载之间的匹配网络可以对原始的阻抗进行阻抗变换,从而实现理想功率传输.在射频电路中可以通过分立集总元件或者微带线等分布参数元件来组成匹配网络.

对于分立集总元件组成的匹配电路有 L 型匹配网络和 T 型或 π 型匹配网络^[7].双元件 L 型匹配网络包括电阻性和电抗性 L 型节匹配电路.理想的电抗性 L 匹配电路无损耗功率,适合实现窄带网络匹配;T 型和 π 型匹配网络可以在设计时调整匹配网络的带宽,增加了设计的灵活性,但是对于超宽频带,尤其是对于本文中 6 GHz 带宽的射频电路无法实现很好的阻抗匹配.电阻性匹配电路虽然电阻会消耗掉部分信号功率,对信噪比等参数产生一定影响,但对频率不敏感可适用于宽带应用.所以为了提高增益平坦度,可以使用电阻网络对 50 Ω 信号线和 25 Ω 软板部分信号线进行阻抗匹配.电阻网络的原理图如图 6 所示.

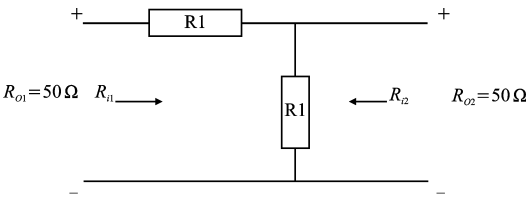


图 6 电阻网络阻抗匹配示意图

在阻抗匹配时,两端的特性阻抗 R_{01} 和 R_{02} 分别为 50 Ω 和 25 Ω.根据集总参数模型,分别从 50 Ω 一端和 25 Ω 一端看去输入阻抗分别为 R_{i1} 和 R_{i2} ,其表达式分别为:

$$R_{i1} = R1 + R1 // R_{O2} \tag{1}$$

$$R_{i2} = (R1 + R_{01}) // R1 \tag{2}$$

由 $R_{i1} = R_{01}, R_{i2} = R_{02}$, 可以得到匹配电阻 $R1 = 35.7 \Omega$.

将电阻匹配应用到柔性线路板与 PCB 电路板连接处的设计中, 并且阻抗匹配的设计进行了仿真.

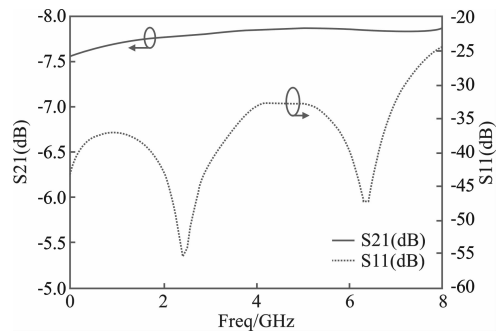


图 7 电阻网络仿真 S21 和 S11 参数仿真结果

由图 7 的 S 参数仿真结果可以发现: 因为电阻是耗能元件, 其吸收了很多信号中的能量, 所以电阻匹配网络插入损耗非常大; 但是观察回波损耗可以发现反射回来的能量也非常小, 在 6 GHz 频带内在 -25 dB 以下, 说明可以达到很好的阻抗匹配. 虽然电阻匹配网络插入损耗较大, 但是插入损耗随频率增加变化很小, 基本保持在 -7.75 dB 左右, 一定程度上减小了高频损耗对传输性能的影响. 在整个输入链路上可以达到比较好的增益平坦度.

3.2.2 LDX+部分

射频信号从激光器阴极 LDX-输入, 从阳极 LDX+输出. 所以对阳极 LDX+同样也需要考虑阻抗匹配. 如图 5 所示, 阳极 LDX+与激光器偏置电压 3.3 V 连接, 所以在阳极位置需要对射频信号和直流电压进行隔离, 保证系统正常工作. 电感能够阻止高频信号到达直流电源端; 利用电容能够阻止偏置直流信号到达 GND, 且使高速信号从阳极输出后能够到达回流平面 GND, 为了减小高速线引起的损耗, 所以高速线应尽可能短, 并通过电容与阻值为 25 Ω 的电阻串联到 GND 实现终端端接, 从而消除反射可能引起的问题.

为了保证该部分射频信号的正常传输, 电容选用了 100 nF, 并分析用于隔离高频信号的电感值对信号传输的影响. 由仿真结果可得, 电感值的大小会影响射频信号的传输性能, 当 $L=400$ nH 时保证射频信号可以正常回流到 GND 平面.

4 测试结果

我们对该发射光模块硬板进行测试. 利用现有

QSFP 测试板, 将设计好的 ROF 发射光模块插入该测试板. 信号从测试板上的 SMA 头和微型可插拔高速电连接器传输给光模块, 通过设计的发射部分链路最后到达软硬板焊盘处, 利用探针台将信号输出. 输入输出信号通过矢量网络分析仪可以观察其 S 参数的变化.

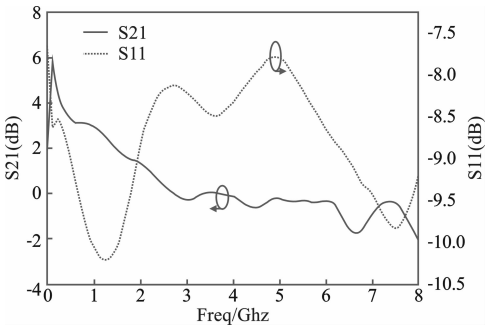


图 8 发射模块 S21 和 S11 测试结果

如图 8 所示为实际测试的 S 参数曲线图, 该模块的插入损耗 S21 在低频时损耗很小, 在 10 MHz 时增益较大. 随着频率升高, 增益逐渐减小. 到 3 GHz 以后, 传输曲线基本保持稳定, S21 基本都控制在 -0.5 dB 左右. 在 0~6 GHz 增益平坦度在 ± 3 dB 左右, 2~6 GHz 内增益平坦度在 ± 1 dB 以内. 所以可以利用电阻网络匹配实现很好的增益平坦度.

此外, 对发射 ROF 模块的线性度进行了分析, 对模块的输出三阶交调点进行了测试. 在频谱分析仪上读取三阶交调产物 IM3 和输出功率 P_{out} , 根据公式

$$OIP3 = P_{out} + \frac{1}{2} (P_{out} - IM3) \tag{3}$$

计算得到输出三阶交调点. 但是由于电阻网络损耗比较大, 使得输出三阶交调点相对比较差, 如图 9 为该模块对应的输出三阶交调点.

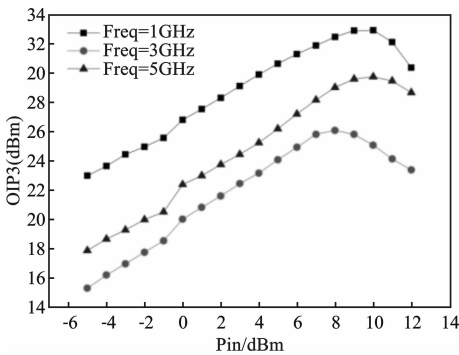


图 9 OIP3 测试结果

虽然电阻网络的输出三阶交调点比较低,但对于一个完整的 ROF 系统,在系统其它部分也会有放大器来实现功率放大,比如接收模块.对于多个系统级联,最终系统的三阶截点为:

$$\frac{1}{\text{OIP3}_{\text{tot}}} = \frac{1}{G_2 \cdots G_n \text{OIP3}_1} + \frac{1}{G_3 \cdots G_n \text{OIP3}_2} + \cdots + \frac{1}{\text{OIP3}_n} \tag{4}$$

上述公式表明,各级系统对总输出三阶截点的影响程度与其输出三阶截点和其后面的各级系统的增益有关,通常后级放大器对总输出三阶截点影响更大^[8,9].所以我们可以 在发射端增加放大器或者增加连接发射模块的其他系统的三阶截点来提高整个系统的线性度.

5 结束语

本文设计了一款可以用于无线通信系统的宽频带的 ROF 发射模块.利用数字 QSFP 接口实现 4 通道多频段的射频信号传输,以及利用 L 型电阻网络在硬板和软板之间进行阻抗匹配,通过仿真和测试可以看到该系统可以达到很好的增益平坦度.同时,该模块也需要对其他指标进行进一步的优化,使得 ROF 系统达到更好的性能.

参考文献:

[1] Koonen A M, Larrode M G, Ng'Oma A, et al. Perspectives of adio-over-fiber technologies[C]. Optical Fiber Communication Conference. Optical Society of America, 2008: OThP3.

[2] 徐坤,纪越峰,戴一堂. 面向 2G/3G/4G/WLAN 融合接入应用的光载无线分布式天线系统[J]. 中兴通讯

技术,2012,(05):16-21.

[3] 叶晨晖. 微波光子技术与光载无线(RoF)接入网络技术的相关应用研究[D]. 浙江大学,2013.

[4] 张海涛,赵亦工. 高速 PCB 的叠层设计[J]. 电子工艺技术, 2003, 24(6): 247-250.

[5] Moongilan D. Balanced and unbalanced PCB layer stack-up for controlling radiated emissions[C]//Electromagnetic Compatibility, 2000. IEEE International Symposium on. IEEE, 2000, 1: 453-458.

[6] 杨彬彬,李志华,刘丰满,等. 高速可插拔光互连模块中信号的完整性设计[J]. 微电子学, 2014, (02): 191-196.

[7] 朱进. 射频电路匹配网络的分析与设计[J]. 信息技术, 2011 (8) :98-101.

[8] 李智群,王志功. 射频集成电路与系统[M]. 北京:科学出版社, 2008.

[9] 常高嘉. 零中频接收机的研究和硬件设计[D]. 成都:西南交通大学, 2013.

作者简介:

折 蓐 男,(1992-),硕士研究生. 研究方向为光电系统集成及信号完整性分析.

刘丰满(通讯作者) 男,(1980-),博士,副研究员. 研究方向为光互连技术和高密度 SOP 系统封装技术.
E-mail:liufengman@ime.ac.cn.

马鹏程 男,(1994-),硕士研究生. 研究方向为光电探测器设计.

赵 慢 女,(1994-),硕士研究生. 研究方向为基于 DFB 激光器的光发射组件的研究.

陆 原 男,(1957-),博士,研究员. 研究方向为先进微电子封装、MEMS 器件封装及光电器件封装等.