

DOI:10.3969/j.issn.1674-7135.2022.06.010

基于多层 PCB 的基板射频信号传输性能研究

余昌喜^{1,2}, 笪余生^{1,2}, 林玉敏¹, 廖翱^{1,2}, 杜顺勇^{1,2}

(1. 中国电子科技集团公司第二十九研究所, 成都 610036;

2. 四川省宽带微波电路高密度集成工程研究中心, 成都 610036)

摘要:随着射频产品的小型化,特别是射频 SIP(systems in package)产品的逐渐应用,基于多层 PCB 的基板射频组件等射频集成产品的应用越来越多,基板内射频信号传输性能的研究也越来越重要。通过对基于多层 PCB 的基板射频传输性能进行仿真测试,验证了 DC-40 GHz 范围内射频基板传输性能,针对射频传输中极为关注的传输损耗问题,通过改进介质厚度或者铜箔材料实现基板射频传输损耗的优化,单位长度传输线射频传输损耗减小 20% 以上。同时针对星载等应用环境,通过深层充放电、总剂量试验,表明多层 PCB 的基板满足星载等航天应用。

关键词:PCB; 射频; 传输损耗

中图分类号:V443

文献标志码:A

文章编号:1674-7135(2022)06-0069-06

Research on the transmission performance of RF signal based on multilayer PCB

YU Changxi^{1,2}, DA Yusheng^{1,2}, LIN Yumin¹, LIAO Ao^{1,2}, DU Shunrong^{1,2}

(1. The 29 Research Institute of CETC, Chengdu 610036, China;

2. Sichuan Broadband Microwave Circuit High Density Intergration Engineering Research Center, Chengdu 610036, China)

Abstract: With the miniaturization of RF products, especially the gradual application of RF SIP products. There are more and more applications of RF integrated products such as multi-layer PCB substrate RF components. The research of RF signal transmission performance in the substrate is also becoming more and more important. In this paper, the RF performance of the substrate based on the multilayer PCB is simulated and tested. The transmission performance of the RF substrate in the DC-40 GHz range has been verified. At the same time, for the extremely important transmission loss in the RF transmission performance, the optimization of the RF transmission loss is achieved by improved medium thickness or copper foil material, the transmission loss is reduced by more than 20%. According to the space application environment, through deep charge and discharge, total dose test, it is shown that the multilayer PCB substrate can meet the space application.

Key words: PCB; RF; transmission loss

0 引言

射频产品是通信、雷达、电子战系统中的关键部分,其性能好坏直接决定了系统的性能优劣。近年来,随着系统阵列化、小型化要求越来越高,特别

是星载、弹载等平台,系统空间极其紧凑,功能需求越来越多,射频产品的小型化高密度集成需求十分迫切^[1]。射频产品需要在更小的体积内实现相同或更加复杂的功能指标情况。传统混合集成方式越来越无法满足产品小型化需求,这就要求射频产

收稿日期:2022-08-17; 修回日期:2022-10-09

基金项目:国防基础科研计划(编号:JCKY2020210B012)

引用格式:余昌喜,笪余生,林玉敏,等. 基于多层 PCB 的基板射频信号传输性能研究[J]. 空间电子技术, 2022, 19(6): 69-74.
YU C X, DA Y S, LIN Y M, et al. Research on the transmission performance of RF signal based on multilayer PCB[J].
Space Electronic Technology, 2022, 19(6): 69-74.

品需要更多的考虑其他集成形式^[2]。

目前较为可行的小型化高密度集成方式是通过将射频功能单元封装成相应的射频 SIP 产品,利用射频基板将这些 QFN、BGA 等封装形式的射频 SIP 产品集成在一起,实现射频系统的功能,各 SIP 产品间的低频及射频互连均通过基板内部实现^[3-4]。

基于多层 PCB 工艺的射频基板,将射频 SIP 产品封装成 QFN 或者 BGA 后双面焊接在基板上,探索出一种实现高密度集成、多层射频交叉走线、小型化的有效手段^[5-6]。在这种高密度集成方式中,其基板的射频传输性能的好坏直接关系射频系统的性能^[7]。在这种应用背景下,对基板内射频传输线的信号传输性能进行仿真及验证^[8],针对射频传输中比较关键的射频传输损耗进行分析,给出了减小传输损耗的设计方法,并通过实物测试验证了相关设计。同时针对星载应用环境,研究了深层充放电、总剂量等试验对多层 PCB 的基板性能的影响。

1 射频传输性能仿真及设计

1.1 射频传输结构设计

为研究分析基于多层 PCB 工艺的射频基板内射频信号传输性能,本文设计一款专门基板样件,以测试验证其射频传输性能。

1.1.1 叠层设计

在设计仿真之前,需要设计射频基板的叠层,射频传输线采用与实际应用一致的带状线结构实现射频传输,对外连接采用 SMPM 表贴连接器实现射频的对外连接及测试,材料选择两层 TSM-DS3 板材(介电常数:3,厚度 0.254 mm,耗散因子:0.0011)及 2929 粘接片(介电常数:2.94,厚度 0.05 mm,耗散因子:0.003),主要验证内容有:驻波、传输损耗、隔离(包含同层射频隔离和相邻层射频隔离),设计的样件有两层射频层,图 1 所示为射频传输性能验证板的叠层及传输示意,其中第一层射频传输线主要验证驻波、传输损耗、同层射频隔离性能,第二层射频传输线主要验证相邻层射频传输线间的射频隔离性能。

板内射频传输线为带状线,信号层在 L2 和 L4 层,其各自的上下两层均为 GND 层,两端通过射频垂直过渡结构转到 TOP 层与表贴焊接的 SMPM 连接器实现信号互连^[9],两端 SMPM 射频连接器通过

射频电缆与矢量网络分析仪等测试仪器实现连通测试。

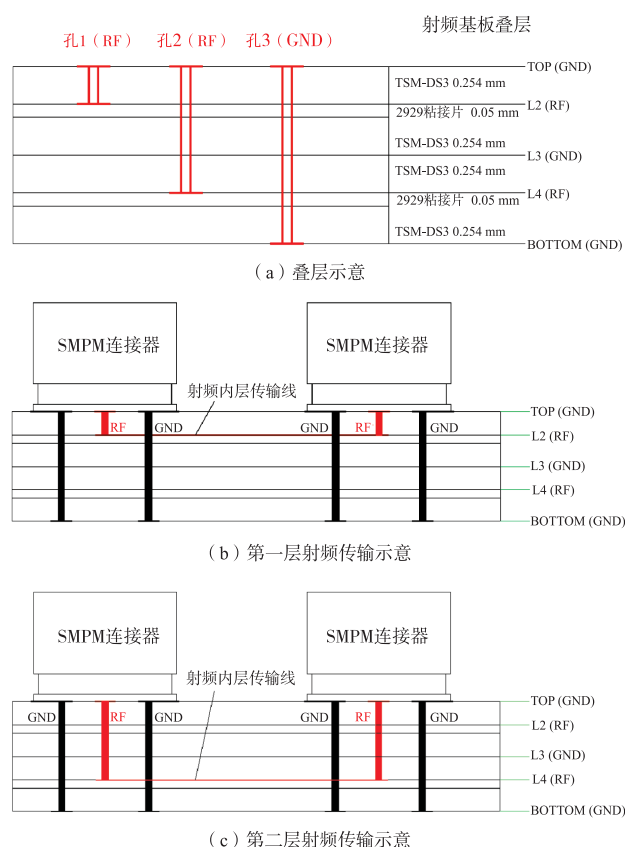


图 1 射频传输性能验证板的叠层及传输示意

Fig. 1 Schematic diagram of stacking and transmission of verification board

1.1.2 SMPM-基板转接结构仿真

射频基板通常通过射频垂直过孔与表层的射频连接器、BGA 等接口类型封装产品等实现射频互连,本文选择 SMPM 射频表贴连接器进行互连测试,完成射频基板传输性能测试,为实现更精确的测试结果和更高的测试频率,此处需对 SMPM-基板带状线的垂直过渡结构进行建模仿真,在 Asoft HF-SS 软件中将 SMPM 射频表贴连接器、射频基板带状线结构等进行建模,其中第一层射频传输 SMPM-基板带状线的垂直过渡结构如图 2 所示(第二层模型类似)。

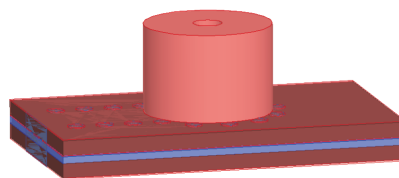
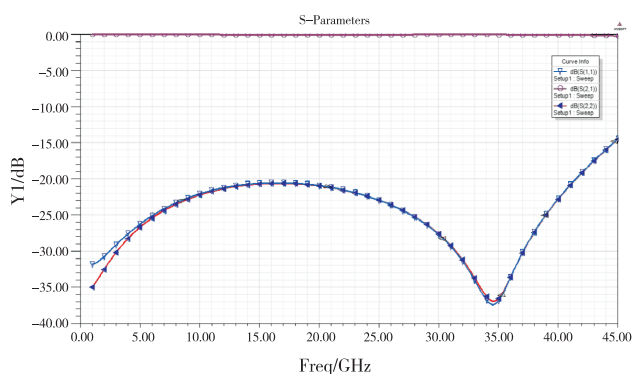


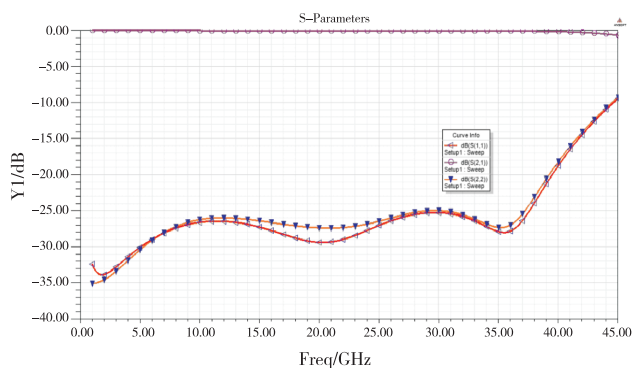
图 2 SMPM-基板转接结构模型

Fig. 2 SMPM-substrate transfer structure model

SMPM 射频表贴连接器的阻抗匹配直接关系到射频的传输性能^[10],通过对射频垂直过渡结构及相应匹配节尺寸精细设计仿真,可得到满足更优的射频性能,本文中选用的 SMPM 连接器的工作频率为 DC-40 GHz,仿真频率范围为 DC-45 GHz,优化后的仿真结果如图 3 所示,其中 SMPM-基板第一层射频转接结构输入输出端口的回波损耗在 DC-41 GHz 频率范围内均优于 -20 dB,DC-45 GHz 频率范围内优于 -15 dB。SMPM-基板第二层射频转接结构输入输出端口的回波损耗在 DC-39.5 GHz 频率范围内均优于 -20 dB,DC-42 GHz 频率范围内优于 -15 dB。



(a) SMPM-基板第一层射频转接结构仿真结果



(b) SMPM-基板第二层射频转接结构仿真结果

图 3 SMPM-基板射频层转接结构仿真结果

Fig.3 The simulation results of SMPM-substrate transfer structure

根据仿真结果,本文设计了基础版本的射频基板传输性能验证件(记为 S0),如图 4 所示,在验证件中设计了 3 种长度传输线(X1: 50 mm, X2: 100 mm, X3: 150 mm),以测试基板单位长度传输损耗情况。同层射频隔离通过位于 L2 层的 X4、X5 传输线验证(最近处间隔 1 mm,相邻传输线间保持两排交错地属性屏蔽孔),相邻层射频隔离通过位于 L2 层的 X5 和位于 L4 层的 X6 传输线验证(上下位置交叠)。验证件中未标记走线形式的接头为验证其他性能所用,与本文所述内容无关。

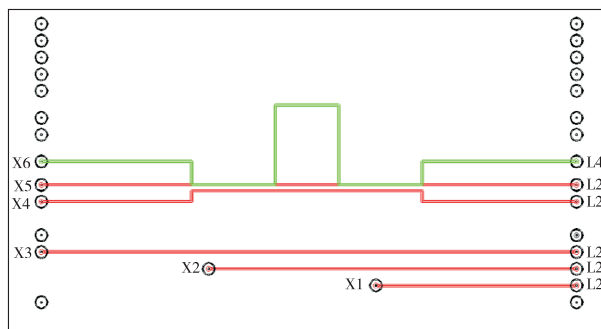


图 4 射频基板传输性能验证件

Fig.4 RF substrate transmission performance verification part

1.2 传输损耗改进设计

基于多层 PCB 工艺的射频基板作为实现高密度互连和射频 SIP 产品集成的有效手段,是实现高集成、射频系统小型化的关键,相对传统形态的电缆互连,其传输损耗偏大,故如何改进射频基板的传输损耗也将是一个关键研究内容。

射频基板内的带状线传输线,其损耗主要包含介质损耗、导体损耗和辐射损耗,其中带状线的辐射损耗较小,故此处不作单独分析^[11]。

理论上,介质损耗随介质的损耗角正切($\tan \delta$)、介质的介电常数和频率的增大而增大;导体损耗随导体厚度、导体宽度、导体离地距离增大而减小,随介质介电常数、导体电导率和频率的增大而增大^[12]。另外,实际加工中导体粗糙度等因素对导体损耗也有影响,粗糙度低,则损耗相应减小,频率越高影响越明显^[13]。在设计射频基板时,一般选择损耗角正切和介电常数较小的材料,如本文中考虑加工、损耗因子的因素,基材选择 TSM-DS3(介电常数:3,损耗角正切:0.0011@10 GHz),导体一般选择损耗较小的铜箔。针对影响损耗的各个参数,同时考虑加工等因素,本文主要针对介质厚度和导体材料粗糙度对损耗的影响进行测试验证。

针对基材厚度对损耗的影响,通过增加带状线中介质厚度,可增大导体离地距离和 50 欧姆射频传输线宽,可降低射频传输损耗^[9]。故本文中在基础版本验证板基础上设计了一种介质厚度增加的验证件(记为 S1),将基础版本中第一层射频对应的 0.254 mm 厚度的介质基板更换为 0.508 mm 厚度,材料不变,射频过渡结构和传输线宽相应调整,以验证介质厚度对传输损耗影响。

另外,仿真中一般默认导体为光滑的^[14],但是实际中因加工工艺等因素要求,导体或介质表面存

在一定的粗糙度,在低频时,粗糙度对传输损耗影响较小,但工作频率较高时,粗糙度的影响将无法忽略不记,故本文中在基础版本(普通 ED 铜箔 1 oz, 表面粗糙度 R_z ISO 为 $5.1 \mu\text{m}$)验证板基础上设计了一款使用低粗糙度铜皮(超低轮廓 ULP 铜箔,表面粗糙度 R_z ISO 为 $1.2 \mu\text{m}$)的验证件(记为 S2),将基础版本验证板(S0)的第一层射频层铜箔更换为 ULP 铜箔,介质厚度等均不变,通过比较 ULP 铜箔和普通铜箔所测得的单位长度传输损耗值,验证 ULP 铜箔对射频传输性能的改善。

2 射频传输性能测试验证

根据之前的设计加工了相应的验证板,通过实物测试,以验证相应传输性能。图 5 所示为所加工验证板的实物图片(S0 基板, S1、S2 基板外形接口均相同,未单独给出)。

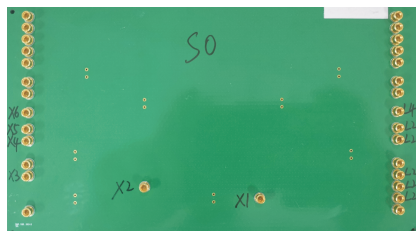
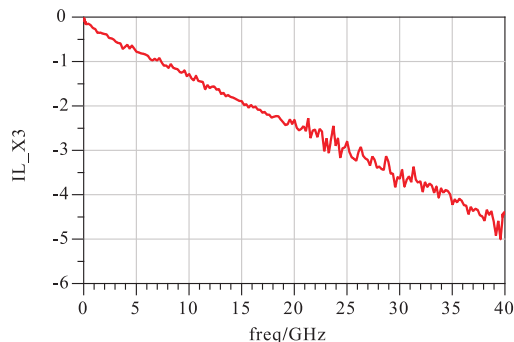


图 5 射频基板传输性能验证件实物图片

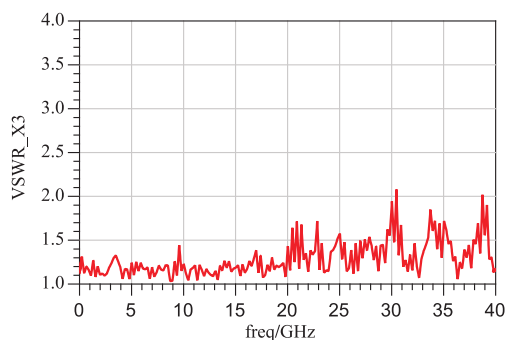
Fig. 5 The physical picture of the RF substrate transmission performance verification part

2.1 射频传输性能测试

针对 S0 基础版本验证件 X3 传输线插损及驻波测试,可验证射频传输的驻波及损耗情况,测试曲线如图 6 所示,测试结果显示,DC-20 GHz 频率范围内,驻波优于 1.5,传输损耗曲线波动小,变化均匀,无突变,20-40 GHz,驻波优于 2.0,损耗波动变大,但整体变化趋势平稳,无较大突变等,传输性能良好。测试结果表面带状线及 SMPM 连接器转接结构测试性能较好,能够满足现有大部分应用需求。



(a) X3 传输线传输损耗测试曲线

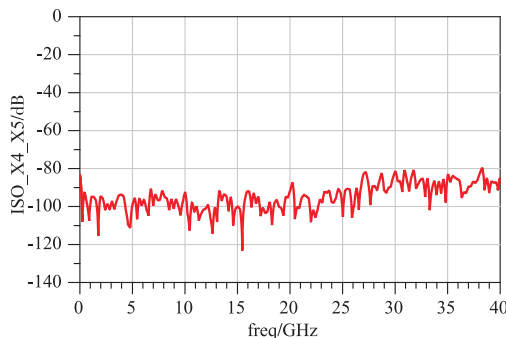


(b) X3 传输线驻波测试曲线

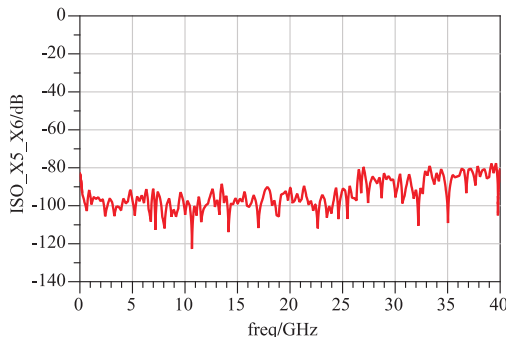
图 6 S0 验证件射频传输性能测试结果

Fig. 6 The RF transmission performance test results of S0 verification part

针对基板隔离性能,通过测试 X4 和 X5 通道传输线间的隔离性能以验证同层传输线隔离性能,测试 X5 和 X6 通道传输线间的隔离性能以验证相邻层传输线隔离性能,测试结果如图 7 所示,测试结果表明,同层及相邻层的隔离均优于 80 dB,隔离性能良好,基本满足现有各类系统的应用需求。



(a) X4-X5 传输线同层隔离性能测试曲线



(b) X5-X6 传输线相邻层隔离性能测试曲线

图 7 S0 验证件射频隔离性能验证件实物图片

Fig. 7 The RF isolation performance test results of S0 verification part

2.2 单位长度传输损耗测试验证

通过测试验证件的 X1、X2 和 X3 通道的损耗,在使用矢量网络分析仪测试传输损耗过程中,先测试 X1 通道的传输损耗后,将损耗曲线归一化,然后

测试 X2 和 X3 通道的损耗,可分别得到 50 mm 和 100 mm 长度传输线的损耗值,考虑到 20 GHz 以上插损波动较大,影响单位损耗的精确测试,此处仅测试比较 DC-18 GHz 频率范围内的单位长度(100 mm)损耗值。单位长度传输插损测试结果如图 8 所示。

测试结果对比情况整理如表 1 所列,测试结果显示,加厚介质厚度能够减小 23% 左右的传输损耗,使用 ULP 铜箔替换普通铜箔可以减少 19% 左右的传输损耗。因此,在设计中可以根据实际情况,选择加厚介质厚度或使用 ULP 等低粗糙度铜箔的方式减小传输损耗,也可多种方式同时使用,以更多的减小传输损耗值。

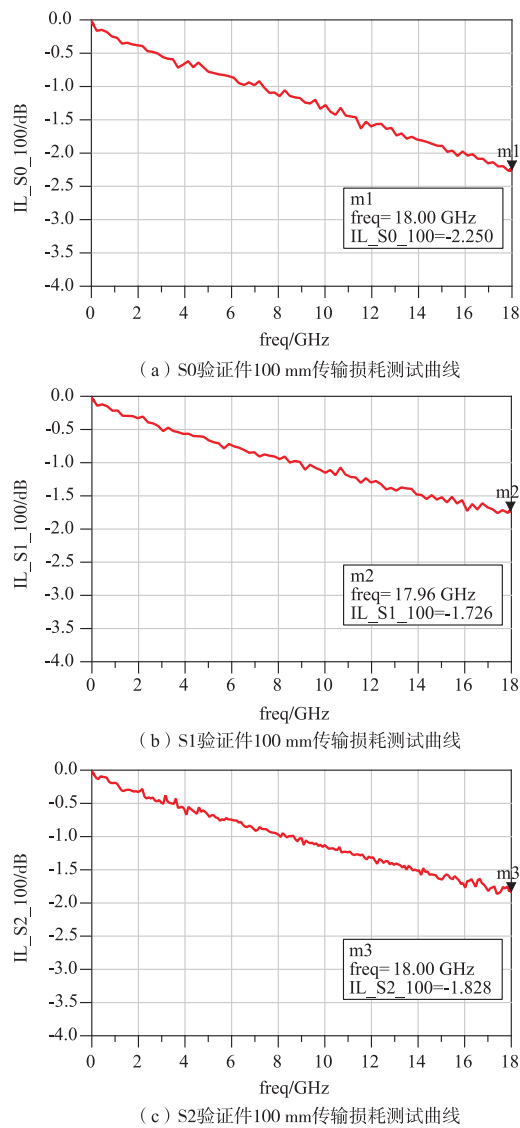


图 8 验证件 100 mm 长度传输损耗测试结果

Fig.8 The transmission loss test results of the 100 mm length transmission line in the verification board

表 1 100 mm 传输损耗测试结果对比

Tab.1 Comparison of loss test results of 100 mm transmission line

样件	100 mm 损耗 @ 18 GHz/dB	损耗减小 比例	备注
S0	2.25	/	/
S1	1.726	23%	介质厚度由 0.254 mm 改为 0.508 mm
S2	1.828	19%	铜箔由普通铜箔 改为 ULP 铜箔

3 星载应用试验射频性能验证

随着国内外星载阵列系统的快速建设,基于多层 PCB 的射频复合基板在系统中应用越来越多,特别是在高密度射频前端、波束合成网络等产品中。本文针对星载应用中深层充放电、总剂量等试验对基板射频性能的影响进行了详细的研究。

本文选择了一块波束合成母板作为试验分析,主要材料为 TSM-DS3,如图 9 所示,首先进行了深层充放电试验,根据某项目应用计算情况,选择 25 keV 的电子枪进行深层充放电试验,试验电流约 1 nA/cm²/s,总通量:5 × 10¹³ e/cm²,试验结果显示样品未发生充放电效应。

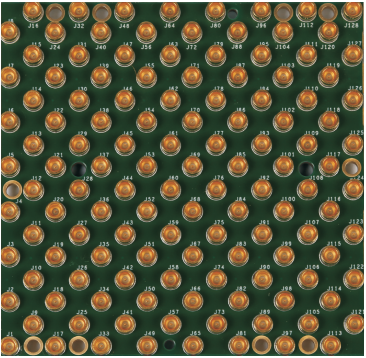


图 9 星载应用试验样件图片

Fig.9 The physical picture of test sample for spaceborne application

同时进行了总剂量试验,根据计算及冗余考虑,进行了照射总剂量为 1 × 10⁶ Gy,并在照射完成的 12 小时内进行射频性能复测。如图 10 所示,通过与照射前射频性能的对比发现,试验前后射频性能无明显变化。

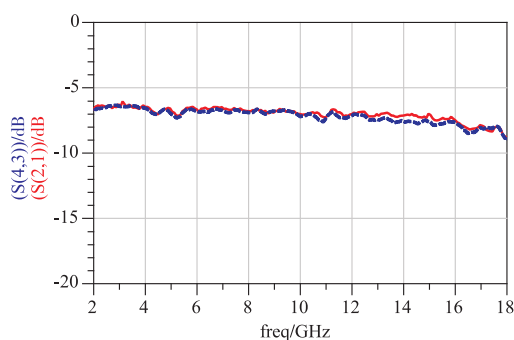


图 10 辐照试验前后射频传输性能对比测试结果

Fig. 10 Comparison test results of RF transmission lines before and after irradiation test

4 结论

基于多层 PCB 的板级射频传输线的传输性能及其单位长度损耗的测试结果表明:在 DC-40 GHz 频率范围内,板级射频传输线均能够实现良好的射频传输,插损随频率变化平稳,无突变,驻波均优于 2。另外,本文给出了基于文中叠层的内层带状线单位长度插损测试值,同时给出了两种减小传输插损的方法,两种方法均能够减小 20% 左右的传输损耗。同时针对星载应用环境,研究了深层充放电、总剂量等试验对多层 PCB 基板性能的影响。通过本文的研究,验证了宽度板级射频传输及星载应用的可行性,为板级射频组件及射频 SIP 集成基板的设计应用提供了测试数据和试验支撑。

参考文献:

- [1] 刘志辉,吴明远.微系统功能模块集成工艺发展趋势及挑战[J].电子工艺技术,2015,36(4):195-198.
- [2] 卢胜军,林逸群,范童修,等.微系统技术及其在电子战接收机中的应用[J].微波学报,2016,32(S2):548-552.
- [3] 姜兆国,陈娜,张路洋.基于 BGA 的射频传输性能研究[J].电子技术与软件工程,2018(8):107-108.
- [4] 王磊.基于多层板的多功能组件微波互联技术研究[J].电子技术应用,2019,45(6):7-10.
- [5] 朱文举,陈娜.过孔传输射频信号在多层 PCB 中的设计[J].电子科技,2017,30(7):130-132.
- [6] 安亚斌,李小明,程海青.天线-整流器协同设计的高灵敏度射频能量采集单元研究[J].空间电子技术,2020,17(2):92-98.
- [7] (美)David M. Pozar.微波工程[M].张肇仪,周乐柱,吴德明,等译.北京:电子工业出版社,2006:42-74.
- [8] 沈杏林.太赫兹多层介质微带线研究[D].长沙:国防科学技术大学,2014:10-24.
- [9] 梁昌洪,谢拥军,官伯然.简明微波[M].北京:高等教育出版社,2006:154-173.
- [10] 梁昌洪,谢拥军,官伯然.简明微波[M].北京:高等教育出版社,2006:154-173.
- [11] 张肇仪,周乐柱,吴德明,等.微波工程[M].北京:电子工业出版社,2006:42-74.
- [12] 沈杏林.太赫兹多层介质微带线研究[D].长沙:国防科学技术大学,2014:10-24.
- [13] 刘维红,王永健,周六可,等.基于柔性 LCP 基板的微带线传输损耗特性研究[J].固体电子学研究进展,2019,39(4):259-263.
- [14] 刘维红,王永健,周六可,等.基于柔性 LCP 基板的微带线传输损耗特性研究[J].固体电子学研究进展,2019,39(4):259-263.
- [15] 谢拥军,刘莹,李磊,等.HFSS 原理与工程应用[M].北京:科学出版社,2019:57-124.

作者简介:余昌喜(1989—),湖北汉川人,本科,工程师。主要研究方向为微波电路设计。E-mail:ychangxi@126.com