

基于高效垂直互连的 X 频段三维交叉合路网络

付 浩, 刘德喜, 祝大龙, 齐伟伟
(北京遥测技术研究所 北京 100094)

摘要: 针对射频微波系统小型化、一体化、低成本设计需求, 利用 HFSS 软件 3D 建模仿真研究微波毫米波多层板高密度垂直互连技术, 对比不同结构参数的频率特性, 在结构上通过加载层间焊盘改善特定频段内传输性能, 在 DC~20GHz 内回波损耗小于 -20dB。基于该高效垂直互连技术, 实现 32 路信号输入 4 波束输出交叉网络 3D 垂直合成, 体积仅为 125mm×30mm×1.8mm, 经测试带内插损 ≤ 10.95dB, 驻波比 ≤ 1.4, 较好地实现了 X 频段合路输出功能。

关键词: 垂直互连; HFSS 仿真; 匹配优化; 合路交叉网络

中图分类号: TN711.3 文献标识码: A 文章编号: CN11-1780(2020)01-0040-05

X-band 3D composite crossover network based on efficient vertical interconnection

FU Hao, LIU Dexi, ZHU Dalong, QI Weiwei
(Beijing Research Institute of Telemetry, Beijing 100094, China)

Abstract: Aiming at the miniaturization, integration and inexpensive design requirements of RF microwave system, the high-density vertical interconnection technology of microwave millimeter wave multi-layer board is studied by HFSS software 3D modeling and simulation. The frequency characteristics of different structural parameters are compared, and the transmission performance in some frequency bands is improved by adding interlayer pads. The S11 is less than -20dB in DC~20GHz. Based on the high-efficiency vertical interconnection technology, 3D vertical synthesis of 32-channel input 4-beam output crossover network is realized. Component network volume is only 125mm×30mm×1.8mm, the S21 ≤ -10.95dB, VSWR ≤ 1.4. It's better to realize the X-band composite output function.

Key words: Vertical interconnection; HFSS simulation; Match optimization; Crossover network

引 言

针对当前复杂的射频电路设计, 垂直互连技术使射频信号可以在印制板垂直方向进行传输, 将多层射频电路在垂直方向上纵向叠加, 极大地缩减了射频电路的平面面积及产品体积^[1], 也将在射频三维堆叠集成及产品小型化发展趋势中发挥极为重要的作用。本文设计一款 32 路输入 4 波束输出的子阵数字化接收组件合路网络, 其中垂直互连结构成为其能否可靠工作的关键所在, 因此研究和设计一个高效可靠的垂直互连方案对产品小型化程度、性能优劣、可靠性高低都具有重要意义。

2014 年韩国 Dept. of Materials Science and Engineering 机构, Yongwon Choi 等人对非导电薄膜 (NCFs) 预覆盖的三维硅通孔 (TSV) 技术进行研究^[2]。研究表明采用非导电薄膜以及 Cu/Sn-Ag 碰撞的垂直结构是三维硅通孔垂直互连的发展趋势, 并且验证该技术对 TSV 垂直互连可靠性的提升。

中电 38 所方南军等人于 2017 年以毛扭扣弹性互联技术为基础, 设计实现一款一分十六的 X 频段功分网络^[3], 该网络具有免焊接、易返修、可重复拆装, 免去之前大量的电缆、连接器等。对其驻波比、插损、分路间幅相一致性进行了测试验证, 在 8GHz~12GHz 内驻波比小于 1.4, 插损小于 16.5dB。

本文依据 X 频段多层板中的信号互连实际情况, 对多层板内垂直互连结构进行建模研究, 并对互连模型关键尺寸要素变化所引起的频率特性做对比分析, 研究高频特性下多层板内几种不同的垂直互连结构, 最终得到一种 DC~20GHz 的高效垂直互连设计。基于该高效垂直互连结构设计一款用于 32 路输

入4波束输出的合路网络,其原理如图1所示,采用高效垂直互连技术实现多层三维交叉结构,达到整个高密度网络的小型化,经测试其性能指标较好地吻合仿真结果。

1 高密度电路垂直互连设计

垂直互连技术是射频信号在不同层之间传输时用到的电路结构。当信号在不同层传输时,需要通过通孔进行连接,但是当频率较高时,会由于通孔与传输线之间的不连续性激发出高次模^[5],因此在小型化高集成度组件的设计中,对垂直互连的仿真设计十分重要。

整个一体化组件多层板采用罗杰斯 4350B 介质基板,介电常数 ϵ_r 为 3.66。以一类微带线-微带线垂直过渡为例,采用 50Ω 特征阻抗线宽,中间射频传输过孔直径定为 0.2mm。垂直互连模型如图 2 所示,在垂直互连中,过渡结构及关键位置参数对频率特性较为敏感,包括过孔正反中心焊盘半径 $R1$ 和 $R2$ 、中心射频传输过孔半径 $R3$ 、板内反焊盘半径 $R4$ 、外围接地孔半径 $R5$ 及外围接地孔距中心原点距离 d 。

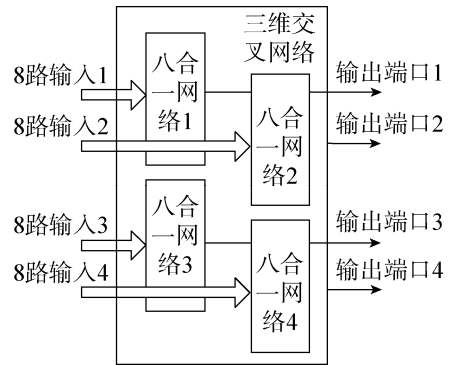


图 1 合路网络

Fig. 1 Diagram of composite crossover network

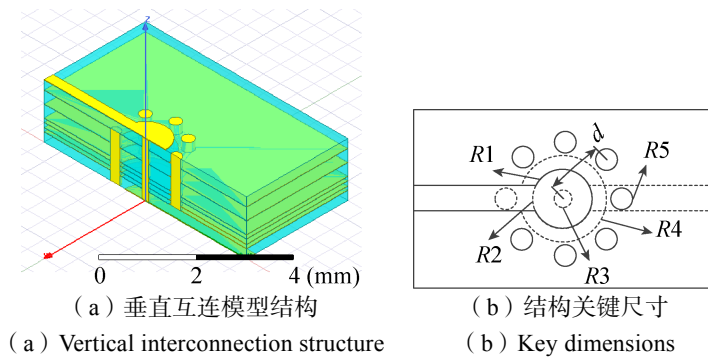


图 2 垂直互连结构及关键尺寸

Fig. 2 Vertical interconnection structure and key dimensions

本文对垂直互连中关键参数尺寸对频率特性影响做建模仿真分析。各参数仿真结果如图 3 所示。正反焊盘 $R1$ 、 $R2$ 由于结构的对称性而选取同一尺寸,焊盘直径选取了 0.8mm、0.9mm、1.0mm、1.1mm 及 1.2mm 五组进行建模仿真。从图 3 (a) 可以看出,随着直径的逐步增大,过渡在 DC~20GHz 内性能逐步提升,1.1mm 及 1.2mm 焊盘回波损耗基本在 -20dB 以下。本结构选用 1.2mm 直径焊盘,在 7.5GHz~9GHz 带内回波损耗小于 -40dB,性能良好。

中心孔径选取直径 0.2mm、0.3mm 及 0.4mm 进行对比分析,其尺寸的变换对其性能影响较为明显,选取了仿真结果较好的 0.2mm 作为中心孔直径。

反焊盘对该过渡的影响主要表现为在 5GHz~17GHz 内选取的几组参数中,尺寸越小其性能越差;地孔距中心的距离与反焊盘大小均与该“类同轴”结构外径相关。结合工艺设计需求,通过仿真分析,在反焊盘半径的基础上向外拓展 0.2mm 作为地孔到中心的距离,满足设计需求的同时性能较为优异。

地孔的直径变化对 18GHz 以下影响较大,地孔直径越大,过渡在中频部分性能越差,地孔直径过小,其低频回波损耗越大。结合使用频段及仿真结果,地孔直径选取 0.3mm,最终结果较好满足 X 频段信号传输需求。

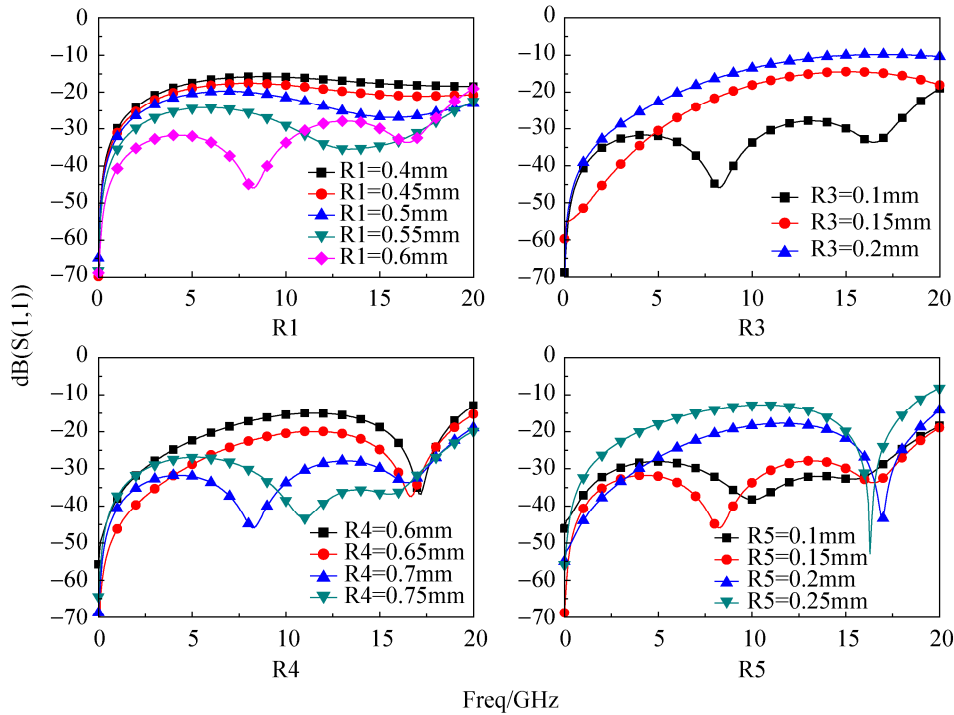


图 3 垂直互连中关键尺寸的频率特性仿真
 Fig. 3 Frequency characteristics simulation of key dimensions

2 加载层间焊盘的垂直互连结构

本文进一步研究设计关于加载层间焊盘进行匹配的垂直互连结构, 即通过在中心信号孔与多层电路交界处增加焊盘, 以此增加垂直互连的电容用以抵消较长过孔带入的寄生电感效应, 其具体结构如图 4 所示。

通过仿真选取直径为 0.3mm 的层间焊盘, 加载层间焊盘前后的仿真结果如图 5 所示, 虚线表示为添加层间焊盘的仿真, 实线为加载后的回波损耗及插入损耗仿真结果。从仿真结果可以看出, 加载层间焊盘引入的寄生电容, 回波损耗较之前有所提高, 尤其在 8GHz~17GHz 内, 回波损耗 S11 有 6dB 以上的优化, 在高频 20GHz 处带内插损 S21 提高了 0.3dB。

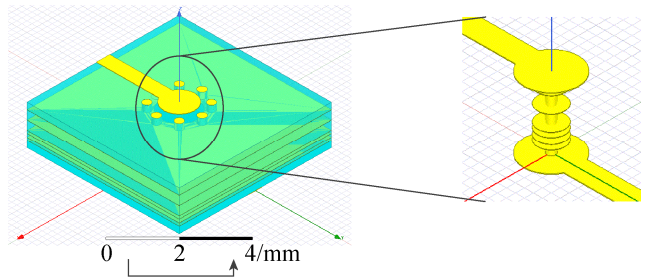


图 4 加载层间焊盘的垂直互连结构
 Fig. 4 Add vertical interconnection of interlayer pads

3 基于垂直互连的交叉网络设计

3.1 建模仿真分析

基于加载层间焊盘的垂直互连结构, 结合所设计工作频段、折衷优化效果及工艺复杂度, 设计制作一款用于 32 路输入 4 波束输出的合路网络。网络采用威尔金森 (Wilkinson) 功分器的设计, 同时利用垂直互连技术将网络在垂直方向上进行堆叠, 网络 1 和 2、网络 3 和 4 在上

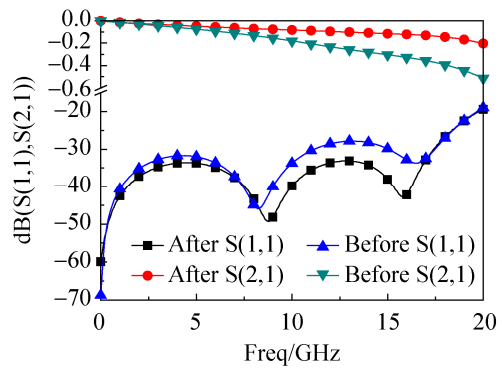


图 5 加载层间焊盘前后 S11、S21 仿真对比
 Fig. 5 Comparison of S11、S21 simulation after adding interlayer pads

下层左右交错，网络1和4、网络2和3分别在同层前后交错，来实现网络的小型化布局，具体结构及局部放大的正视图如图6所示。

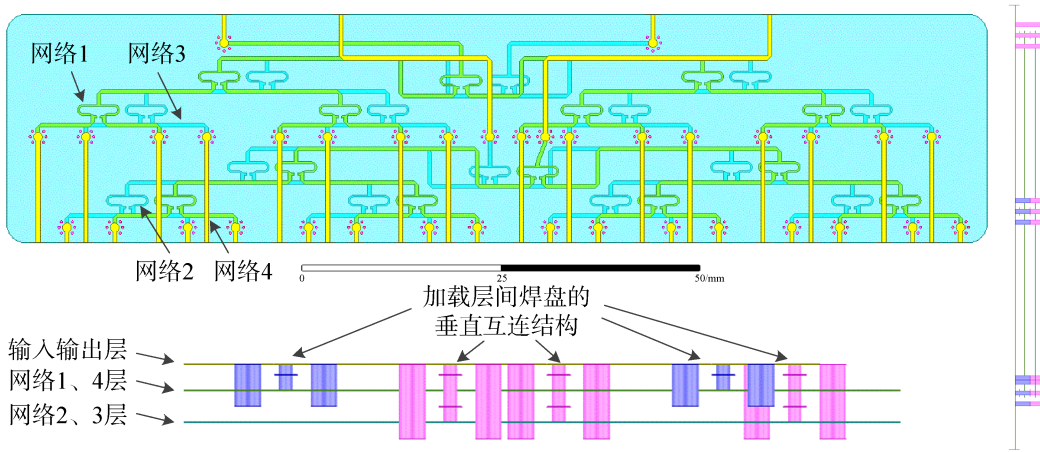


图6 交叉合路网络

Fig. 6 Diagram of composite crossover network

利用 HFSS 软件对结构紧凑、电路密度大的合路网络进行建模分析。对合路网络间隔、结构布局优化仿真，仿真结果显示 4 个合成总端口的电压驻波比 VSWR (Voltage Standing Wave Ratio)，带内均小于 1.25，图7是4网络各一路对其进行的S参数的仿真结果，最大插损为 10.9dB，实现了良好的合路匹配效果，满足组件低损耗的合路网络设计要求。

3.2 实物测试结果

基于模型加工得到的实物和安装工装后测试环境如图8所示，整个网络共有 32 输入 4 输出，体积仅为 125mm×30mm×1.8mm，利用矢量网分别对 4 个网络进行了测试。

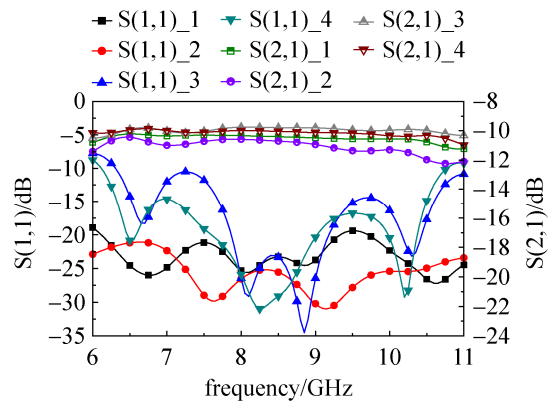


图7 交叉网络仿真结果

Fig. 7 Simulation of the crossover network

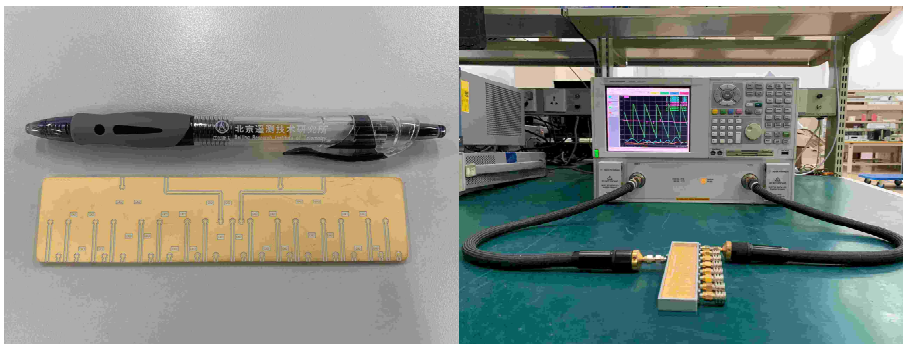


图8 实物照片和测试环境

Fig. 8 Board photo and test environment

单通道测试结果如图9所示，从测试结果可以看出，该通道在 7.5GHz~9GHz 内，端口驻波比小于 1.4，插入损耗小于 10.7dB，在理论值 9dB 的基础上仅有 1.7dB 的损耗，带内幅度波动小于 0.1dB，

在 5GHz~12GHz 内, 带内平坦度优于 1dB, 相对带宽达 80%以上, 测试结果与仿真结果较为一致。

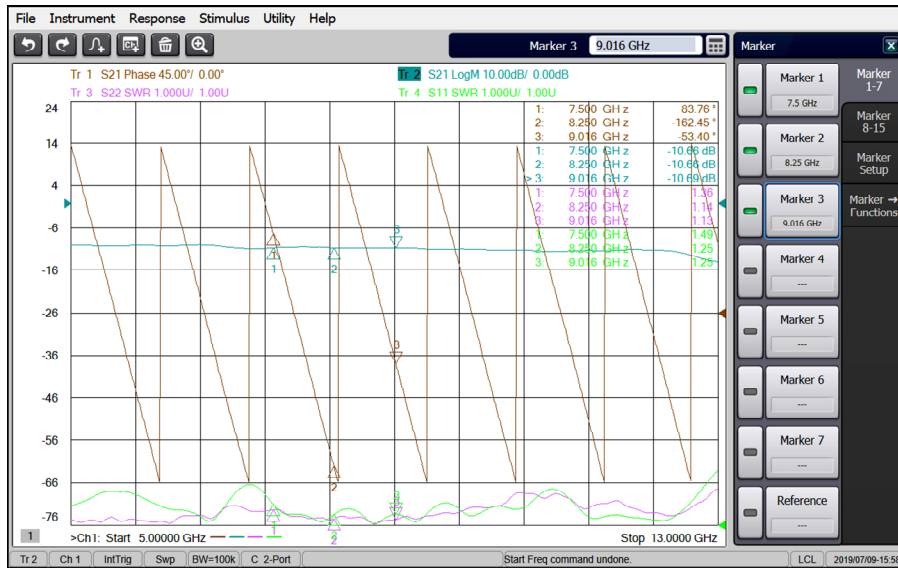


图 9 单通道矢网测试结果

Fig. 9 Single channel text result

表 1 为整个 4 网络测试数据及各网络 8 通道之间比较均值的均方根误差, 由结果可知 4 网络的相位均方根误差不大于 2.79°, 幅度不大于 0.31dB。由于测试架引入玻珠、接插件等测试必要的过渡结构, 每通道的插损实测都比仿真 S21 参数略大, 整个网络较好实现了 X 频段内的信号合成输出。

表 1 各通道测试结果

Table 1 Text results of each channels

通道	1	2	3	4	5	6	7	8	相位/幅度 一致性 (RMS)	
相位 (°)	网络 1	85.73	84.44	85.63	83.76	84.99	82.34	85.65	86.19	1.19
	网络 2	-50.42	-50.48	-46.25	-44.80	-43.37	-42.25	-46.65	-47.32	2.79
	网络 3	159.00	161.99	161.11	162.45	161.70	164.4	159.55	160.29	1.62
	网络 4	40.54	37.54	39.51	36.85	40.27	36.93	41.32	43.50	2.19
幅度 (dB)	网络 1	-10.58	-10.20	-10.04	-10.66	-10.43	-10.75	-10.17	-10.62	0.24
	网络 2	-10.31	-10.42	-10.01	-10.76	-10.46	-10.37	-10.43	-10.53	0.23
	网络 3	-10.90	-10.81	-10.52	-10.70	-10.11	-10.42	-10.22	-10.95	0.30
	网络 4	-10.06	-10.14	-9.95	-10.75	-10.58	-10.25	-10.10	-10.21	0.26

4 结束语

本文研究设计基于介质基板的垂直互连结构, 分析各个关键尺寸参数变化的频率特性, 在此基础上优化得到加载层间焊盘的垂直互连结构。基于该高效垂直互连结构, 设计了 3D 交叉网络, 带内插损最大为 10.95dB, 体积仅为 125mm×30mm×1.8mm, 可实现将 32 路 X 频段信号合并输出 4 个波束信息。通过测试满足系统要求, 较好的实现了合路功能, 可以应用于多路多通道射频微波系统。

在未来的通信射频系统中, 小型一体化将成为发展的重点, 传统的二维组件结构向着三维立体布局发展, 相应的垂直互连结构也将在一体化、小型化、高集成度、高效率、超宽带、低成本、全自动化生产等方向作进一步探索。