

“高密度有机封装基板”专题

基于高密度有机基板工艺的 Ka 波段天线设计与制造

庞影影, 周立彦, 王剑峰, 王波
(无锡中微高科电子有限公司, 江苏 无锡 214035)

摘要: 与传统集成技术相比, 有机基板的多层结构不仅可以集成相控阵天线、叠层微带天线等多款天线, 其在布线密度、芯片内埋、封装一体化方面也展现出较大优势。介绍了基于高密度有机基板工艺的 Ka 波段叠层微带天线设计与制造过程, 并通过测试验证了其反射特性。使用有机基板集成天线, 有利于实现无线通信系统的小型化, 其在通信和雷达探测领域有较大的应用潜力。

关键词: 毫米波微带天线; 高密度基板; 无引线集成

中图分类号: TN305.94 文献标志码: A 文章编号: 1681-1070 (2024) 02-020103

DOI: 10.16257/j.cnki.1681-1070.2024.0031

中文引用格式: 庞影影, 周立彦, 王剑峰, 等. 基于高密度有机基板工艺的 Ka 波段天线设计与制造[J]. 电子与封装, 2024, 24 (2): 020103.

英文引用格式: PANG Yingying, ZHOU Liyan, WANG Jianfeng, et al. Design and manufacture of Ka-band antenna based on high density organic substrate process[J]. Electronics & Packaging, 2024, 24(2): 020103.

Design and Manufacture of Ka-Band Antenna Based on High Density Organic Substrate Process

PANG Yingying, ZHOU Liyan, WANG Jianfeng, WANG Bo
(Wuxi Zhongwei High-Tech Electronics Co., Ltd., Wuxi 214035, China)

Abstract: Compared with the traditional integration technology, the multi-layer structure of the organic substrate can not only integrate multiple antennas, such as phased array antennas and stacked microstrip antennas, but also shows great advantages in wiring density, chip embedding and package integration. The design and fabrication process of Ka-band stacked microstrip antenna based on high density organic substrate process are introduced, and its reflection characteristics are verified by testing. The use of organic substrate to integrate antennas is conducive to the miniaturization of wireless communication systems, and it has great potential for application in the fields of communication and radar detection.

Keywords: millimeter wave microstrip antenna; high density substrate; wire-free integration

0 引言

随着无线通信技术的快速发展, 便携式消费电子产品成为主力军, 顺应了半导体工艺集成度提高的趋

势, 其关键技术主要由系统级芯片 (SoC) 和系统级封装 (SiP) 来实现^[1]。天线作为无线通信系统的重要组件, 在 SiP 中应用广泛。传统天线与射频前端的集成占据的空间较大, 阻碍了无线通信系统的小型化发展, 片上天线技术 (AoC) 可以最大限度地缩小天线尺寸, 但

收稿日期: 2023-09-28

E-mail: 庞影影 549163448@qq.com; 周立彦 (通信作者) njuzly@163.com

受到半导体工艺制程一致性的限制,成本和性能都难以满足常规的应用需求,因此,业界提出了封装天线(AiP)的概念^[2]。封装天线将天线、馈电网络和射频收发芯片集成到一起,组成一个标准的表面贴装器件^[3-4],可以实现异质异构的微型化集成,并根据目标频段实现高性能的天线设计。芯片尽可能靠近天线,以减小寄生效应^[5],通过倒装芯片与引线键合技术最终实现芯片和天线的一体化封装。

封装天线采用的工艺有低温共烧陶瓷(LTCC)、高密度互连(HDI)、嵌入式晶圆级球栅阵列封装(eWLB)和PCB等工艺,其中LTCC工艺最早被采用。2013年,韩国三星公司基于FR4材料与HDI工艺设计了60GHz的相控阵天线,如图1所示^[6]。天线尺寸为20.000mm×20.000mm×0.838mm,相较于IBM公司设计的基于LTCC工艺的天线^[7],性能相差不大,但整体尺寸更小。2015年,谷歌公司基于eWLB工艺设计了60GHz的六通道微带天线^[8],如图2所示,其将芯片和收发天线集成在整体尺寸仅为14.000mm×14.000mm×0.800mm的晶圆上,可用于便携式穿戴设备。2022年,中国电子科技集团有限公司第二十九研究所的李秀梅等采用低损PCB工艺设计了工作于Ka波段的封装天线^[9],可用于卫星通信。



(a) 正面 (b) 背面
图1 60 GHz 相控阵天线

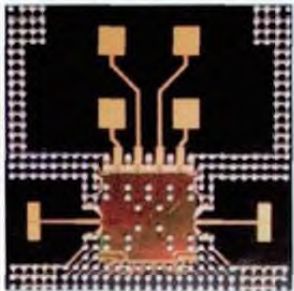


图2 60 GHz 的六通道微带天线

毫米波相控阵封装天线将相控阵天线与封装工艺相结合,可用于军事、卫星通信、车载雷达、安检成像等领域^[10]。相控阵天线是将阵列天线的辐射单元有序地排布,通过控制相位实现波束扫描,再将芯片倒装在天线基板上,以形成相控阵天线封装体,最终实现相控阵天线系统的高密度无引线集成,因此,要实现

具有高性能、高可靠性的相控阵封装天线,辐射单元的设计十分重要。

本文采用高密度基板工艺,开展工作于Ka波段的毫米波微带贴片天线的设计与制造。此天线不仅可以与射频系统集成,通过有机基板内埋设计实现贴片与芯片的一体化封装,还可作为相控阵天线的辐射单元进行阵列设计。有机基板作为天线的介质材料,可实现其小型化、高集成度、低成本的设计目标。有机基板提升了封装天线的可靠性,使其大规模量产成为可能,可以在毫米波应用场景下被广泛使用。

1 有机基板天线的结构与设计

1.1 微带贴片天线的设计

1953年,DESCHAMPS^[11]提出了微带天线的概念,微带天线由顶层辐射贴片、介质基板、底层地平面3部分组成,矩形贴片微带天线模型如图3所示,贴片微带天线的尺寸应基于衬底材料的特性和目标辐射频段进行估算^[12]。

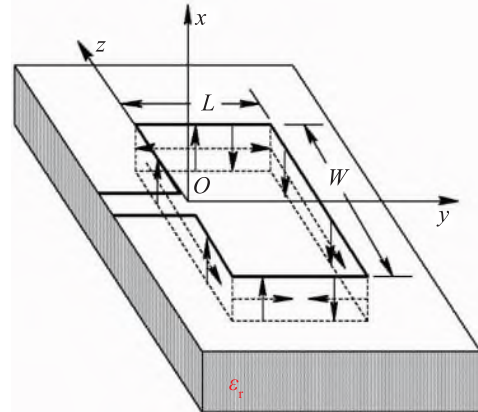


图3 矩形贴片微带天线模型

矩形贴片的宽度 W 的计算公式为

$$W = \frac{c}{f_0} \left(\frac{\epsilon_r + 1}{2} \right)^{-1/2} \quad (1)$$

其中, c 为光速, ϵ_r 为介质基板的介电常数, f_0 为中心频率。

有效介电常数 ϵ_c 的计算公式为

$$\epsilon_c = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + \frac{12h}{W} \right)^{-1/2} \quad (2)$$

其中, h 为介质基板的厚度。

波导波长 λ_g 的计算公式为

$$\lambda_g = \frac{c}{f_0 \sqrt{\epsilon_c}} \quad (3)$$

辐射贴片长度 L 的计算公式为

$$L = \frac{c}{2f_0 \sqrt{\epsilon_c}} - 2\Delta L \quad (4)$$

等效辐射缝隙长度的计算公式为

$$\Delta L = 0.412h \frac{(\epsilon_c + 0.3)(W/h + 0.264)}{(\epsilon_c - 0.258)(W/h + 0.8)} \quad (5)$$

在仿真工具中基于估算值建模后,对相关参数进行优化,以实现最优的天线性能。

1.2 基于有机基板的微带贴片天线设计

本设计所用基板为本单位自主研发的高密度树脂型封装基板,可实现 4~12 层的布线设计,其核心层(Core 层)采用有机介质材料,为了防止结构发生翘曲,Core 层采用上下对称式布局。

本设计中包含 10 层基板,在 Core 层以下的金属层中填充了大块的金属地,可以作为反射板,在 Core 层以上的部分金属层中,利用接地的金属环设计了天线腔体结构,通过改变金属环的尺寸来调节天线的谐振频率。对于毫米波天线来说,由于其辐射体和馈电

线能被天线的地平面分开,因此可以选择利用同轴馈电的微带天线馈电。

图 4 为基于高密度有机基板工艺的天线结构剖面图,该天线包含 3 部分:Core 层、上层走线层、下层走线层。上层走线层和下层走线层分别由 5 层金属构成,金属层间有介质层。Core 层以上的金属地平面有 3 层(TM1~TM3),Core 层以下的金属地平面有 5 层(BM1~BM5)。天线包含双层辐射贴片, TM4 层为下层贴片结构,其作为天线的馈电层,周围有接地的金属环(Metal Rings), TM5 层为上层贴片结构。同轴馈线从 BM5 层穿过,经过具有反焊盘的地平面到达 TM4 层,为天线馈电。地平面之间通过地孔(Via)相连,除了 BM1 层为中间挖空的金属环结构,其余地平面均为完整的金属地结构。由于受到加工尺寸的限制,同轴馈电口的阻抗小于 50 Ω,需要调整同轴馈电的位置和辐射贴片的尺寸来实现阻抗匹配。

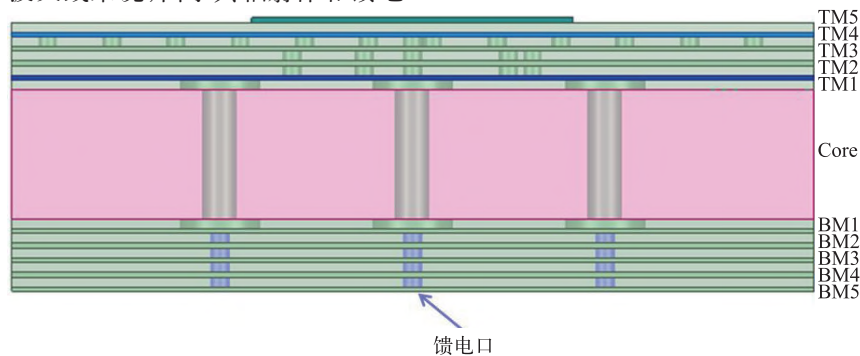


图 4 基于高密度有机基板工艺的天线结构剖面图

本文设计的天线结构如图 5 所示,天线整体采用叠层贴片设计,上下两层贴片尺寸相近,其谐振频率非常接近,可以起到拓展带宽的作用。Core 层厚度为 400 μm,金属铜层厚度为 15 μm,通孔高度为 30 μm,整体基板尺寸为 5.500 mm×5.500 mm×0.820 mm, TM4 层贴片单元的尺寸为 2.250 mm×2.500 mm×0.015 mm, TM5 层贴片单元的尺寸为 2.250 mm×2.250 mm×0.015 mm。

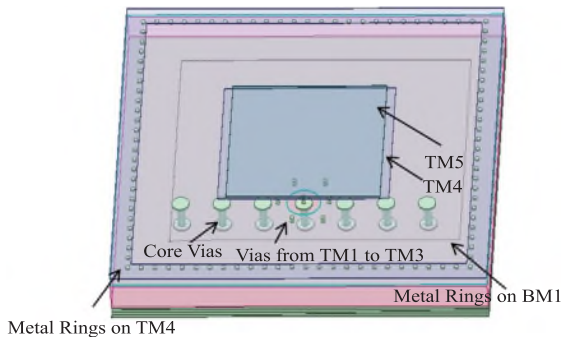


图 5 天线结构

2 天线制备工艺与在线测试

2.1 半加成法制备天线

工艺技术路线为增层膜叠层 + 半加成法布线技术。半加成法工艺(SAP)是指在基板上进行图形电镀,然后去除为了电镀图形涂的各类胶材,最后进行蚀刻得到所需要的图形,加工流程如图 6 所示。由于金属铜层和介质材料的结合强度差,需要选用稳定性高、与铜的结合力好、适合 SAP 的介质材料,如增层膜材料。

高密度基板制作流程如下:选用增层膜作为介质材料,在覆铜板上下进行双面压膜(覆铜板结构如图 7 所示),然后对增层膜进行研磨,磨到金属铜柱露出,进行第 1 层再布线(RDL)和植柱,以实现电气连接。完成第 1 层后,重复上述步骤进行下一层的制作,加工完成后对基板进行电镀、切割、测试,高密度基板的制作流程如图 8 所示。图 9 为 Ka 波段天线实物图,天线整体

尺寸仅为 5.500 mm×5.500 mm×0.820 mm。

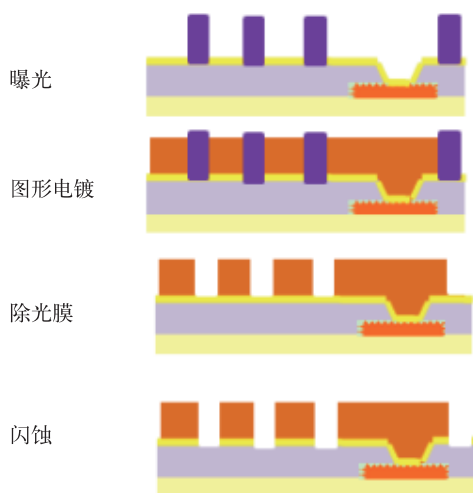


图 6 半加成法工艺加工流程

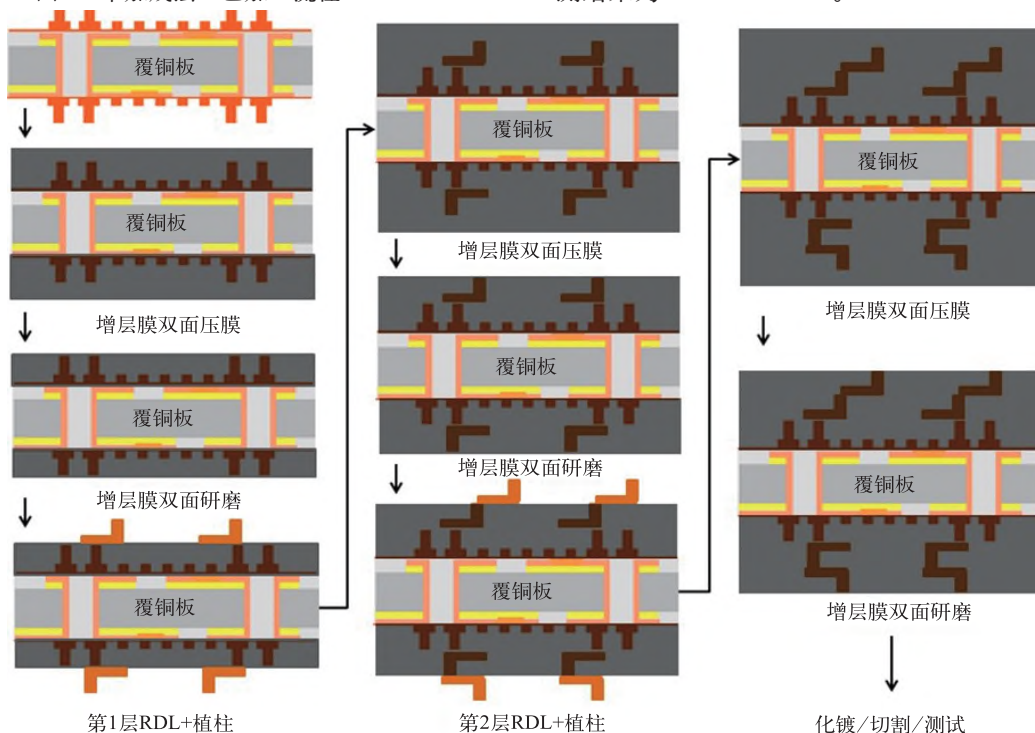


图 8 高密度基板制作流程

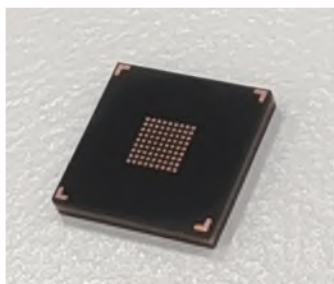


图 9 Ka 波段天线实物图

图 11 为天线方向图, 天线增益最高为 2.1 dBi。在微波暗室搭建的测试平台上进行天线各方向的辐射特性测试, 测试平台如图 12 所示, 使用喇叭天线不仅

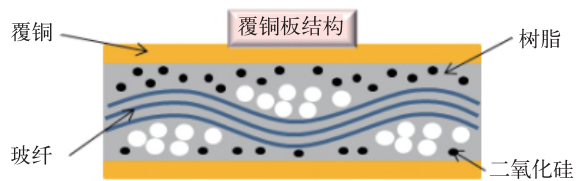


图 7 覆铜板结构

2.2 天线参数测试

S 参数即散射参数, 反映入射信号与反射信号之间的相位和幅度关系。使用电磁仿真软件 HFSS 进行天线仿真分析, 使用由探针台和矢量网络分析仪组成的测试平台进行天线的 S 参数测试, 仿真和实测结果如图 10 所示。在 -10 dB 以下的带宽范围内, 天线仿真和实测结果相当接近, 仿真结果为 35.4~36.4 GHz, 实测结果为 35.6~36.6 GHz。

可以进行待测天线的校准, 还可将其作为增益测试的通用标准, 通过测试得到天线的各方向增益。

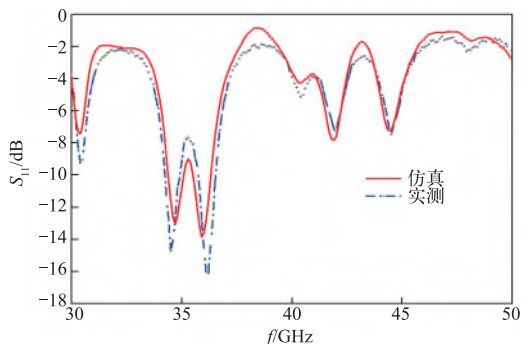


图 10 天线回波损耗 S_{11} 的仿真和实测结果

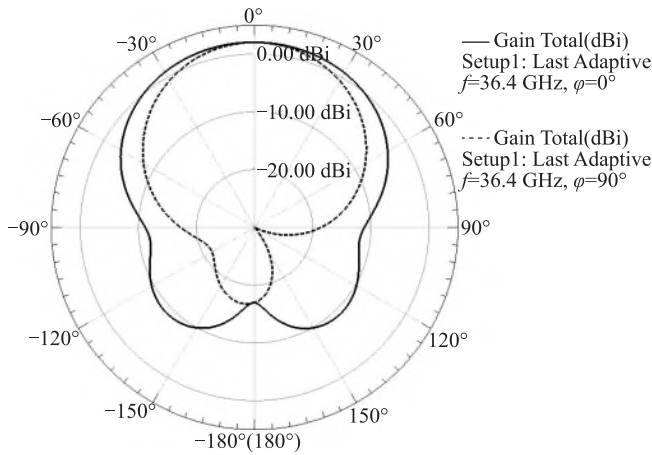


图 11 天线方向图



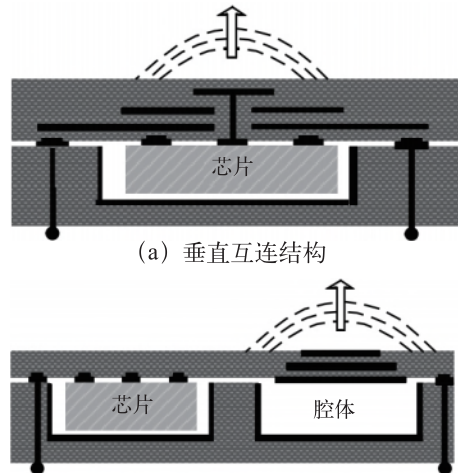
图 12 测试平台

3 Ka 波段有机基板天线的应用

天线和芯片的垂直互连结构如图 13 (a) 所示, 天线和芯片通过凸点实现互连, 天线与其他结构之间的耦合给天线设计带来一定的难度。天线和芯片的水平互连结构如图 13 (b) 所示, 通过倒装芯片或引线键合技术实现天线和芯片的互连。本文设计的 Ka 波段有机基板天线可通过垂直互连结构与芯片实现一体化集成封装, 与传统的天线和芯片在分离设计后再进行组装的方法相比, 该设计方式缩短了天线与芯片的互连长度, 降低了互连损耗, 节省了排布空间, 可应用于 5G/6G 毫米波通信领域。采用本单位研发的有机基板工艺, 有望实现该天线的量产加工, 最终达到高性能、低成本的设计目标。

图 14 为相控阵天线封装示意图, 芯片内埋于封装基板中, 与相控阵模组集成, 最后通过球栅阵列 (BGA) 集成到综合母版上。相较于单天线设计, 相控阵天线可通过调节波束的辐射方向来躲避障碍物, 提高信号传输质量, 基于 Ka 波段相控阵天线的设计较少, 本文设计的 Ka 波段有机基板天线可作为辐射单

元, 通过特定的排列设计出子阵模组, 将其与芯片集成, 最终形成相控阵封装体, 可应用于卫星通信, 实现远距离信号传输。



(a) 垂直互连结构
(b) 水平互连结构
图 13 两种互连结构

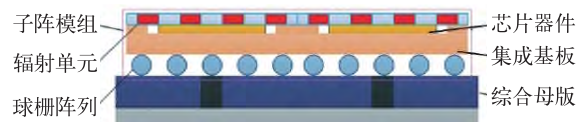


图 14 相控阵天线封装示意图

4 结论

本文研究了基于高密度有机基板工艺的天线设计与制造, 通过高密度布线和垂直互连结构, 可实现天线与内埋芯片的无引线集成, 有利于推动集成系统向小型化、高密度和高可靠性的方向发展。高密度有机基板的应用范围广泛, 但开发程度还不够。天线设计中仍存在阻抗匹配问题, 考虑到过孔尺寸、节距等工艺标准对馈线的限制, 可通过改变馈电点位置和辐射贴片尺寸进行优化。成本限制了有机基板天线的大规模商用, 其目前仅处于研究或小规模生产阶段。采用本单位自主研发的高密度有机基板工艺进行加工制造, 可极大地缩短加工周期, 降低成本。通过工艺能力的提升和设计经验的积累, 基于有机基板的封装天线的量产指日可待。

参考文献:

[1] 张跃平. 封装天线技术发展历程回顾[J]. 中兴通讯技术, 2017, 23(6): 41-49.
 [2] 赵双领, 沈鑫, 张诚, 等. 封装结构对内置天线性能的影响[J]. 电子与封装, 2020, 20(9): 090202.
 [3] ZHANG Y P, SUN M, LIN W. Novel antenna-in-package design in LTCC for single-chip RF transceivers [J]. IEEE

- Transactions on Antennas and Propagation, 2008, 56 (7): 2079-2088.
- [4] 李莉, 张文梅. 基于封装天线 (AiP) 的过孔分析[C]// 2009 年全国微波毫米波会议论文集 (上册). 西安: 中国电子学会, 2009: 697-700.
- [5] ZHANG Y P. Antenna-in-package technology for modern radio systems[C]// Antenna Technology Small Antennas and Novel Metamaterials. White Plains, NY, USA, 2006.
- [6] HONG W B, BAEK K H, GOUDELEV A. Grid assembly-free 60-GHz antenna module embedded in FR-4 transceiver carrier board[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2013, 61(4): 1573-1580.
- [7] KIM D G, LIU D X, NATARAJAN A, et al. Low-cost antenna-in-package solutions for 60-GHz phased-array systems[C]// 19th Topical Meeting on Electrical Performance of Electronic Packaging and Systems, Austin, TX, USA, 2010: 93-96.
- [8] NASR I, JUNGMAIER R, BAHETI A, et al. A highly integrated 60 GHz 6-channel transceiver with antenna in package for smart sensing and short-range communications [J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2016, 51 (9): 2066-2076.
- [9] 李秀梅, 黄中华, 任思, 等. Ka 频段卫通相控阵封装天线设计与实现[J]. 电讯技术, 2022, 62(7): 881-885.
- [10] 孙磊. 毫米波相控阵封装天线技术综述[J]. 现代雷达, 2020, 42(9): 1-7.
- [11] DESCHAMPS G A. Microstrip microwave antennas[J]. Proceedings of the Third Symposium on the USAF Antenna Research and Development Program, 1953: 18-22.
- [12] POZAR D M. Microstrip antennas[J]. Proceedings of IEEE, 1992, 80(1): 79-91.



作者简介:

庞影影 (1995—), 女, 安徽宿州人, 硕士, 助理工程师, 主要研究方向为封装天线技术、封装级信号和电源完整性设计。