

面向系统集成的散热天线设计

周 礼¹, 唐 旻¹, 钱佳唯¹, 张跃平², 毛军发¹

(1. 上海交通大学电子信息与电气工程学院电子工程系, 上海 200240; 2. 新加坡南洋理工大学电气与电子工程学院, 新加坡 639798)

摘 要: 散热天线是一种兼具电磁辐射特性和散热性能的新型结构, 可以实现天线和散热器的功能一体化, 提高系统的集成度. 本文针对无线通信集成系统的散热天线发展历史和技术现状进行了综述, 分别分析了散热单天线和毫米波散热天线阵列的典型结构以及电热协同设计方法的特点, 最后对散热天线技术的发展方向进行了展望. 本文认为多性能的协同设计理论以及与先进制冷方式的巧妙融合等, 在5G无线通信领域将具有广泛的应用前景.

关键词: 散热单天线; 散热天线阵列; 电热协同设计; 集成系统

中图分类号: TN820.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2022)07-1766-08

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20211000

Design of Heatsink Antennas for Integrated Systems

ZHOU Li¹, TANG Min¹, QIAN Jia-wei¹, ZHANG Yue-ping², MAO Jun-fa¹

(1. Department of Electronic Engineering, School of Electronic, Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. School of Electrical and Electronic Engineering, Nanyang Technological University, Singapore 639798, Singapore)

Abstract: The heatsink antenna is a novel structure with both electromagnetic radiation characteristics and heat dissipation performance, which can realize the functional integration of the antenna and the heat sink, thereby improving the degree of system-level integration. This article reviews the development history and technical status of heatsink antennas for wireless communication integrated systems, introduces the typical structures of heatsink single antennas and millimeter wave heatsink antenna arrays, as well as electro-thermal collaborative design methods, and looks forward to the development trend of heatsink antenna technique. The authors believe that multi-performance collaborative design theory and ingenious integration with advanced cooling methods, etc., will have broad application prospects in the field of 5G wireless communication.

Key words: heatsink single antenna; heatsink antenna array; electro-thermal collaborative design; integrated system

1 引言

随着系统集成技术的不断发展, 小型化、低功耗、高集成度的无线通信系统得到了越来越广泛的应用. 在系统设计过程中, 为了充分利用空间资源, 通常要求将有源芯片、无源器件以及天线结构集成在十分有限的空间内^[1,2]. 虽然系统的输入总功率有所降低, 但是由于整体尺寸的显著减小, 其中的功率密度反而增加, 散热问题变得越来越严重. 集成系统内部工作温度的上升容易引起器件性能的恶化, 导致系统无法正常工作, 甚至严重损毁. 因此, 在系统的电磁设计过程中, 必须要同时考虑系统的散热性能.

为了降低热点温度, 保证系统的正常工作, 在高功率密度的无线通信集成系统中, 往往需要引入额外的

散热结构, 例如鳍片式金属散热器等. 然而, 由于金属散热片通常紧邻集成电路, 其易与芯片、互连线、天线等各种有源和无源器件产生电磁耦合, 引起电磁兼容问题, 导致能量损耗或引入额外噪声^[3,4]. 尤其是对于包含天线的集成系统, 金属散热片自身的寄生辐射还有可能导致天线性能的恶化, 从而干扰通信系统的正常工作.

针对金属散热片引起的电磁兼容问题, 常见的解决方案是通过引入额外的屏蔽结构或者优化布局来抑制金属散热片引起的近场耦合和寄生辐射问题^[5-8], 但同时这样也会增加设计的复杂度和成本. 为了同时兼顾无线通信集成系统的电磁性能和散热性能, 对散热片的辐射特性进行有效利用, 将其设计为一个无线信

号的高效辐射体,则是一种更加行之有效的解决方案.在此背景下,兼具电磁辐射特性和散热性能的散热天线受到了人们的重点关注.散热天线不仅可以解决散热片的近场耦合和寄生辐射问题,降低散热片对系统性能的影响;还可以实现散热结构和天线结构的一体化,减少系统的器件数量,提高系统的集成度.

本文将针对无线通信集成系统的散热天线设计方案进行综述和讨论.首先介绍散热单天线的典型结构和增强散热性能的设计方法;接下来,针对 5G 无线通信系统的工作需求,重点阐述毫米波散热天线阵列结构以及电热协同设计方法;最后,对面向系统集成的散热天线设计进行总结和展望.

2 散热单天线设计

目前,散热单天线的主要形式有两类.第一类是在贴片天线上方搭载鳍片式或分形形式金属散热片,增加整体结构的散热面积,同时提升天线的辐射性能;第二类则是采用表面积较大的贴片天线直接与空气对流散热.

最早提出的散热天线概念^[9]是一种兼具电磁辐射特性和散热性能的新型结构,可以实现天线和散热器的功能一体化.例如,基于传统印刷电路板(Printed Circuit Board, PCB)的微带贴片天线,在其上方搭载了一个金属鳍片式散热片,从而将散热片结构和天线结合,结构示意图如图 1 所示^[10].在贴片中心有一根较粗的导热过孔,用于向散热片传递需要耗散的热量,而在贴片边缘还有一根较细的信号过孔,用于向散热天线馈电.通过仿真分析,额外加载的金属散热片不仅没有降低或者恶化天线的辐射性能,反而起到了类似金属引向器的效果,增强了原本微带贴片天线的辐射强度.为了验证上述方案的电磁性能,本文设计并加工了一个工作在 2.4 GHz 的散热天线结构,如图 2 所示^[9].实际测试结果表明,相比传统的微带贴片天线,在加载金属鳍片式散热片的情况下,工作频率下降了 165 MHz,辐射效率由 33% 提高到 62%,最大增益由 2.5 dBi 提高到 4.5 dBi.

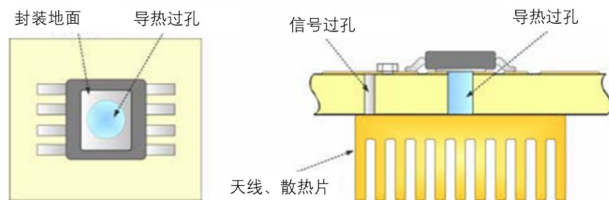


图 1 散热天线构架示意图^[10]

在此基础上,本文进一步考虑了金属散热鳍片与微带贴片正交方向对天线辐射的影响^[11],并分别研究了散热鳍片平行于辐射边以及平行于非辐射边的场

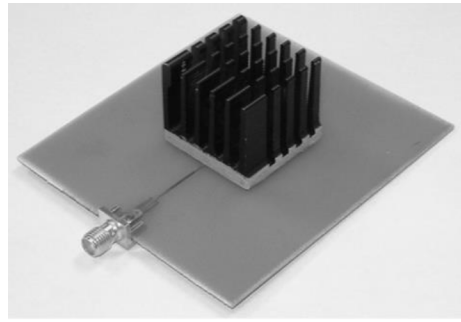
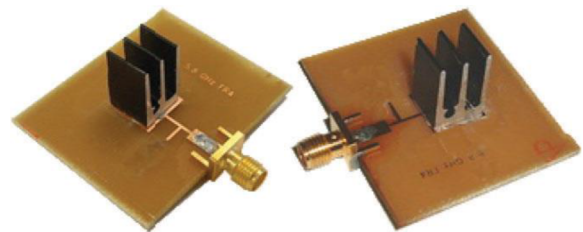


图 2 基于贴片天线的散热天线样品^[9]

景,如图 3 所示.由于散热鳍片改变了贴片天线的输入阻抗,因此在馈线部分添加了一个枝节线用于调谐.图 4 给出了散热天线与基本贴片天线的回波损耗的测量结果比较.可以发现,散热天线的工作带宽具有显著优势.此外,在散热鳍片平行于微带贴片非辐射边的情况下,散热天线的方向性和增益要优于散热鳍片平行于微带贴片辐射边的情况,两者的辐射效率则比较接近.



(a) 散热鳍片平行于非辐射边 (b) 散热鳍片平行于辐射边

图 3 散热天线样品^[11]

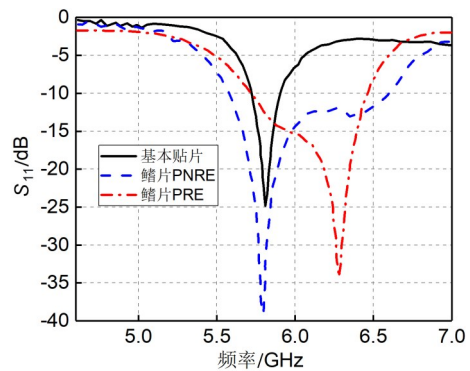
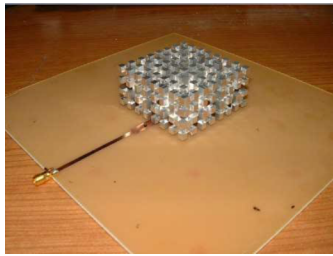


图 4 天线回波损耗的测试结果比较^[11]

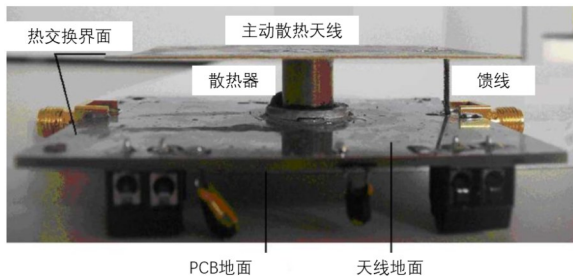
作为传统散热片形式的一种扩展,基于 3D 打印技术可以实现分形结构的散热天线^[12],如图 5 所示.相比单一的微带贴片天线,对金属散热结构进行分形化设计可增大散热面积,还能进一步改善散热天线的辐射效率和方向性,分别提高至 98% 和 8.21 dBi.

此外,针对 GSM900, GSM1800 和 3G 的三频段天线,采用在贴片上增加散热鳍片的设计方案,可在加强散热的同时将天线辐射效率提升 20%,增益提高 2~3.5 dB^[13].在微带贴片和鳍状散热片之间配置微机电系统开关,

图5 3D打印分形散热天线样品^[12]

通过开关的通断可以调节天线的散热和电磁性能^[14], 天线增益从 5.9 dBi 提升至 8.2 dBi, 天线温度最多可降低 27 °C.

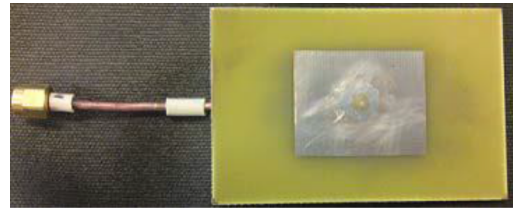
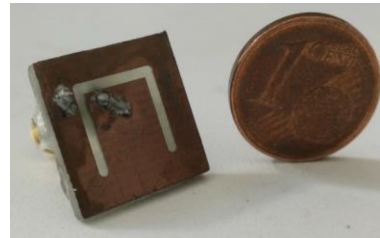
作为第二类散热天线形式, 采用空气介质的微带贴片天线可以利用空气对流实现散热天线的效果. 例如, 有学者提出一种采用空气介质的射频有源散热天线^[15], 如图 6 所示. 在贴片天线中心有一根较粗的导热过孔, 用于向散热贴片传递需要耗散的热量, 而在贴片边缘通过一根短馈线给微带贴片天线馈电. 该天线增益可达 5 dBi, 由于中心频率工作在 2 GHz, 贴片天线尺寸较大, 具有充分的空气接触面积, 因此无需额外散热结构, 自身即可实现很好的散热效果, 其热阻为 6~8 K/W.

图6 有源散热天线样品^[15]

除了通过贴片天线直接散热, 还可通过在有源微带贴片的表面添加额外蓝宝石层来增强散热效果^[16], 如图 7 所示. 研究表明, 蓝宝石层对天线的增益、方向图和回波损耗均不会产生明显的影响, 并且能够起到很好的散热效果, 散热功率密度可达 1 W/cm². 在 9 W 的输入功率和 26 °C 的测试环境温度下, 有、无蓝宝石散热层的天线表面温度分别为 80 °C 和 137 °C, 实现了接近 60 °C 的显著降温, 验证了蓝宝石层的散热增强效果. 此外, 还可设计散热缝隙天线结构^[17], 如图 8 所示. 其在完整的金属地板上设计了 U 型槽缝隙作为辐射源, 因此余下的金属地板部分可通过空气对流实现有效的散热效果.

3 散热天线阵列设计

上节主要介绍了散热单天线的结构和设计方法, 这些方案主要针对 S、C 波段等低频段的应用场景. 在

图7 拥有蓝宝石层的微带散热天线样品^[16]图8 缝隙散热天线样品^[17]

低频段工作时, 由于天线尺寸较大, 可将散热片与贴片天线直接组合进行散热, 或是设计与空气接触面积较大的天线结构形式. 而无线通信集成系统工作频段较高, 且通常采用相控阵技术来实现复杂的波束成形和波束偏转. 高频工作的阵列天线, 其单元大小和间距通常很小, 极大压缩了金属散热片的设计空间. 将散热片与贴片天线直接组合进行散热的传统方案不易于天线组阵, 难以满足高增益、窄波束、波束扫描等应用场景的需求. 因此, 本节主要阐述应用于毫米波频段的散热天线阵列设计方案.

目前常用的毫米波天线集成构架是将散热片或散热装置与天线阵列分置于系统的两侧^[18-25], 如图 9 所示. 此类方案在实现散热性能的同时避免了散热装置对天线性能的影响, 但附加的散热装置使系统器件数量和复杂程度均有所提升. 而兼具电磁辐射特性和散热性能的散热天线方案不但可以实现散热结构和天线结构的一体化, 提高系统的集成度, 并且还有助于提升天线的辐射性能.

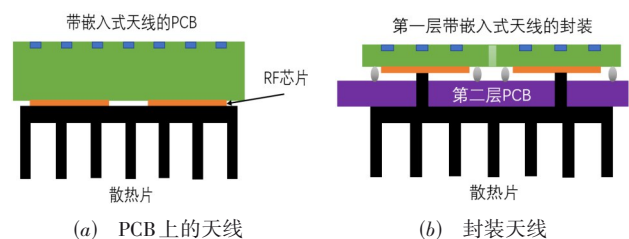


图9 天线集成架构

针对毫米波 5G 基站天线阵列中的热管理问题, 可采取平面有源电扫描天线阵列的稀疏排列布局方法^[26]. 该方法在保持单元数不变前提下增加单元间距实现稀疏性, 通过研究不同的稀疏阵列拓扑来提高天线阵列的散热性能, 同时降低旁瓣或栅瓣. 图 10 给出

了 28.5 GHz 的带有导热过孔的单元间距为 0.5λ 的 8×8 方形阵列仿真结果,可以看出,由于导热过孔位于辐射片的中间,因此对电磁性能的影响很小. 采用被动冷却的有源电扫描天线阵列与无风扇的中央处理器散热器相结合的思路,具有节能、成本低及有较大的波束成形灵活性的特点,为 5G 系统的热管理提供了解决思路.

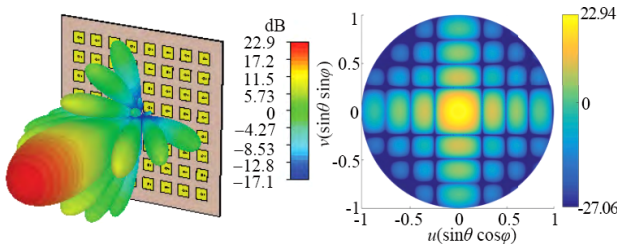
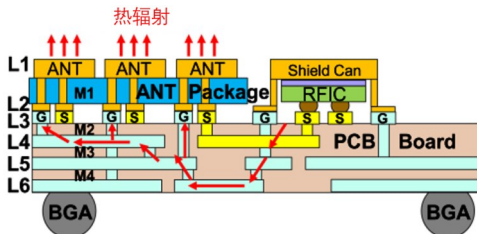


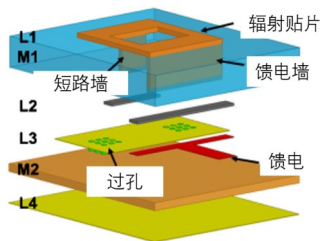
图 10 带有散热器的阵列仿真结果^[26]

此外,基于新型封装工艺,可实现一种用于毫米波多输入多输出和相控阵应用的冲压金属封装天线^[27]. 天线的馈电和短路金属壁连接到芯片屏蔽结构以引导射频集成电路 (Radio Frequency Integrated Circuit, RFIC) 的热量耗散,如图 11 所示. 该 1×8 阵列的阻抗带宽为 700 MHz, 中心频率为 28.5 GHz, 实测增益为 13.78 dBi. 其 3 dB 的波束扫描范围为 $-46^\circ\sim +44^\circ$, 最大副瓣电平小于 -10 dB. 热仿真结果显示,散热天线结构有助于 RFIC 进行热量耗散,在环境温度为 25°C 和换热系数为 $10\text{ W/m}^2\text{K}$ 的情况下,最高温度由 67.6°C 降低至 56.6°C .

结合周期性排布的散热鳍片特征,是毫米波散热天线阵列设计的另一个思路. 例如,文献^[28]基于金属鳍状散热片结构,开发了工作频率为 60 GHz 的散热天



(a) 横截面视图



(b) 辐射元件分解图

图 11 冲压金属 AiP^[27]

线阵列. 鳍状散热片由 3D 打印技术制造,其馈电网络由低温共烧陶瓷基板中的基片集成波导 (Substrate Integrated Waveguide, SIW) 网络构成. 天线单元为散热片底座的矩形通腔与两侧鳍状散热片构成的阶梯剖面开口喇叭天线,如图 12 所示,由 SIW 上表面的矩形缝隙耦合馈电. 在毫米波频段,SIW 具有损耗小、抗干扰、抑制表面波等良好电磁特性.

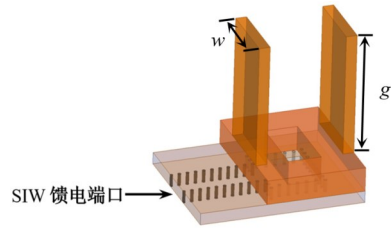


图 12 散热天线阵单元

散热天线阵的整体结构如图 13 所示^[28],散热片与基板通过焊接组装构成 4×4 散热天线阵列. 上层的 SIW 为天线单元的馈电结构,包含 16 个矩形腔. 下层 SIW 为 1 分 16 路的功率分配网络. 两层 SIW 间采用金属过孔探针的方式进行转接^[29]. 从传热角度来看,SIW 馈电网络包含大量金属过孔,它们可同时作为导热过孔将基板底层贴装芯片上的热量有效传导到上层的散热片,如图 14 所示.

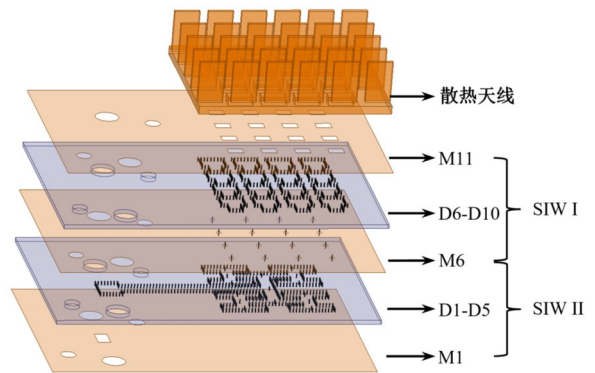


图 13 鳍片式散热天线阵列的分解图^[28]

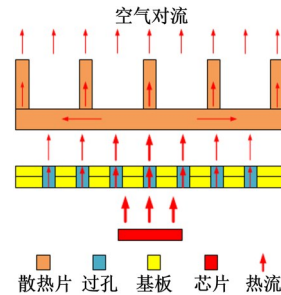


图 14 散热天线阵列中的传热示意图

接下来,基于电热协同设计,研究了鳍状散热片结构尺寸对天线电磁性能和散热性能的影响. 鳍状散热

片的宽度 w 、高度 g 对天线温度和增益影响的仿真结果如图 15 所示. 天线的增益随着散热片的宽度增加而先升高, 再逐渐趋于稳定. 增益受散热片的高度的影响与宽度的影响类似, 先随高度增加而升高, 再在小范围内波动; 而宽度与高度的增加显著增大了散热片与空气的热交换面积, 提升了散热能力. 在综合考虑天线电磁性能和散热性能后, 可最终确定金属鳍片的尺寸. 作为散热效果的仿真验证, 假设结构底部贴装的芯片耗散功率为 0.2 W, 在环境温度和换热系数分别为 27 °C 和 10 W/m²K 的情况下, 加载金属散热片后的结构热点温度为 313 K, 比未加载散热片时下降了 40 K, 实现了有效散热.

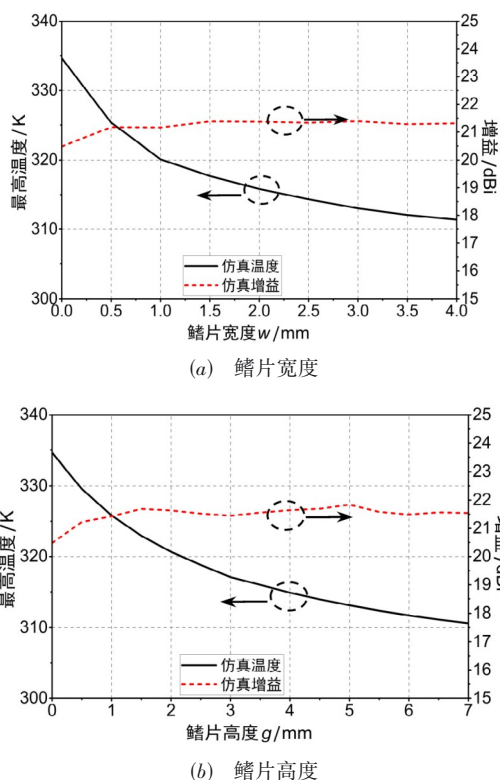


图 15 散热片尺寸对天线温度和增益的影响

为了验证上述方案的电磁辐射特性, 加工了散热天线阵列样品, 如图 16 所示. 通过测试得到天线阵列阻抗带宽为 11.7% (55.7~62.7 GHz), 频率范围内最高增益为 18.1 dBi, 如图 17 所示. 天线阵列在 60 GHz 处的归一化方向图如图 18 所示, E 面和 H 面的波束宽度分别为 15° 和 16°, 副瓣电平平均低于 -12 dB.

为了扩展天线的阻抗带宽, 降低副瓣电平, 可采用一种 3D 金属 Vivaldi 散热天线阵列^[30]. 它由上层的金属 Vivaldi 辐射结构、散热片与下层的 SIW 馈电网络构成, 如图 19 所示. 下层 PCB 基板中包含 1 分 4 的 SIW 功率分配网络, 芯片位于辐射中心下方. Vivaldi 天线单元由

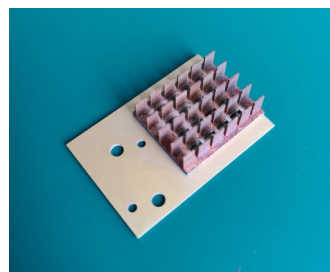


图 16 鳍片式散热天线样品

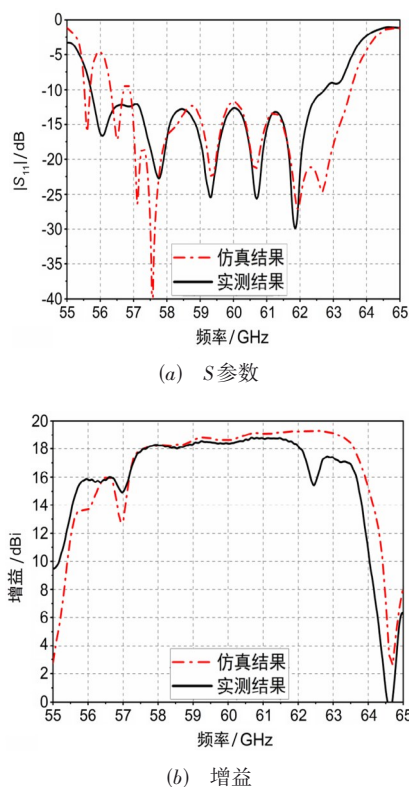


图 17 散热天线阵列仿真与测试结果

SIW 上的纵向缝隙馈电, 以此取代传统 Vivaldi 天线的巴伦馈电结构. Vivaldi 天线两侧的鳍状结构不仅有增强天线散热性能, 还可以改善天线的辐射特性.

基于电热协同设计, 对 Vivaldi 天线两侧散热片的间距和高度进行了仿真研究. 当间距增加时, 天线增益逐渐增加至峰值, 而后逐渐降低. 而天线的温度对散热片的间距变化不敏感. 散热片的高度增加对天线增益的提升明显, 当高度与 Vivaldi 天线一致时, 增益达到最大值. 随后高度的增加会使增益略微降低. 同时, 天线的温度会随散热片的高度增加而逐渐降低. 作为散热效果的仿真验证, 假设结构底部贴装的芯片耗散功率为 0.5 W, 在环境温度和换热系数分别为 27 °C 和 10 W/m²K 的情况下, 加载 Vivaldi 天线和散热片结构的热点温度为 322 K, 比未加载散热片时下降了 18 K, 实现了有效散热.

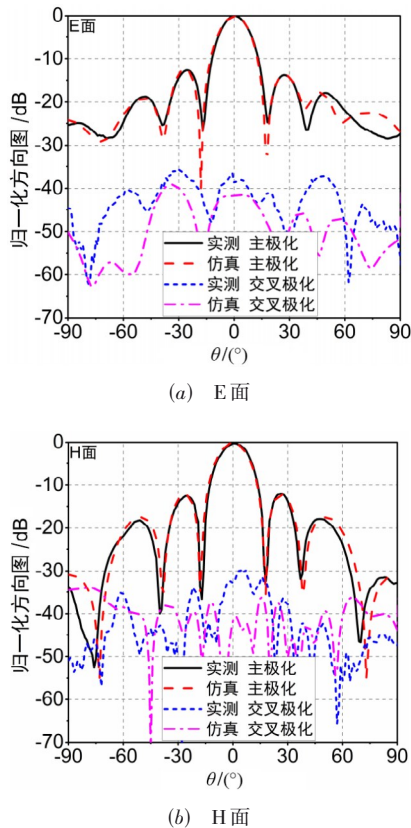


图 18 散热天线阵列方向图

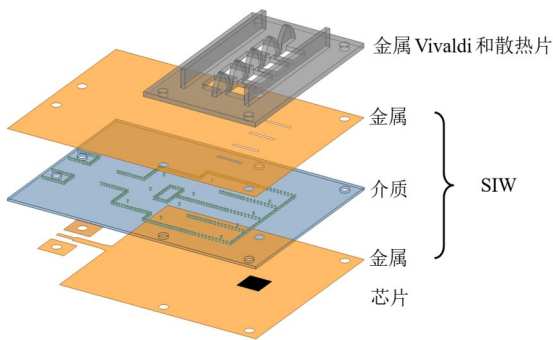


图 19 Vivaldi 散热天线阵列分解图^[30]

为了验证上述方案的电磁辐射特性,加工了散热天线阵列样品,如图 20 所示.通过测试得到天线阵列的阻抗带宽为 28.8% (21.63~28.83 GHz),工作频率范围内最高增益为 15.5 dBi,如图 21 所示.天线阵列在 25 GHz 处的归一化方向图如图 22 所示,E 面和 H 面的波束宽度分别为 21°和 40°,副瓣电平平均低于-15 dB.

4 总结和展望

本文对无线通信集成系统的散热天线设计方案进行综述和讨论.首先介绍了散热单天线的典型结构和增强散热性能的设计方法,包括在传统微带贴片天线上加载散热片、采用分形结构提高散热性能、采用空气

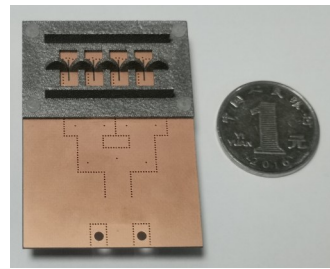


图 20 Vivaldi 散热天线阵列样品

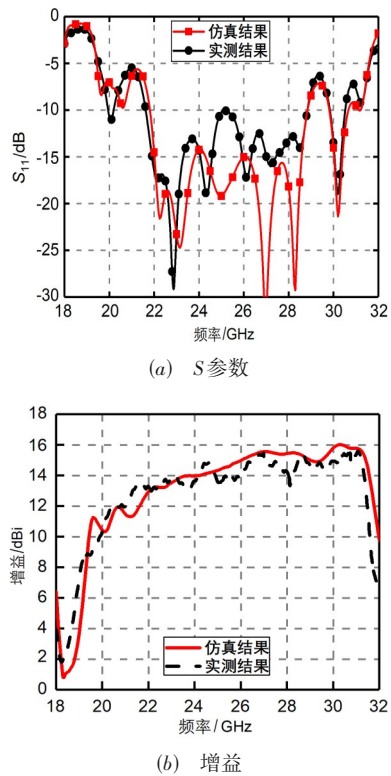


图 21 散热天线仿真与测试结果

介质的微带天线增加空气对流散热面积、添加蓝宝石层来增强散热效果等.进一步,针对现有散热单天线设计方案在毫米波天线以及阵列天线领域的应用缺陷,着重介绍了基于 3D 打印技术的毫米波散热天线阵列的电热协同设计方案,包括金属鳍片式散热天线阵列以及金属 Vivaldi 散热天线阵列.仿真和测试结果表明,散热天线兼具良好的电磁辐射特性和散热性能,可成功实现天线和散热器的功能一体化,提高系统的集成度.

随着 5G 无线通信技术的不断发展,通讯基站和终端产品中毫米波天线阵列的应用越来越普及,对集成系统的散热要求也越来越高.因此,面向毫米波频段的散热天线阵列技术将有非常广泛的应用前景.虽然目前已取得了一些初步研究进展,但是距离产品实用化还有不少差距,仍存在一系列理论问题和关键技术亟待突破解决,可归结为以下 3 个方面.

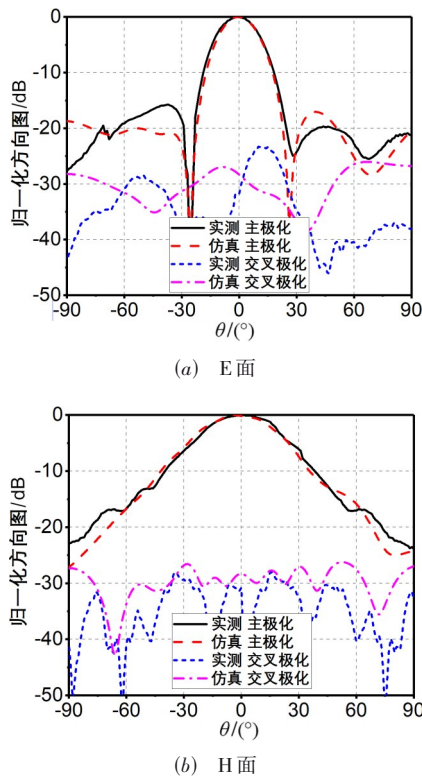


图 22 散热天线方向图

其一,毫米波散热天线阵列的设计不仅涉及电磁兼容、阻抗匹配、模式匹配等复杂的电磁问题,还需要综合考虑集成系统的散热问题,而在设计过程中它们之间通常会产生矛盾.天线类型的选择对组阵、高增益、窄波束和波束扫描等技术指标的实现有重要的影响.同时,不同类型的天线结构以及不同芯片的位置布局,还决定了系统的温度分布特征.因此需要根据实际应用场景,建立完善电热协同设计理论和多目标、多性能优化技术.

其二,毫米波散热天线阵列的电磁性能和散热性能与所采用的金属材料、介质基底材料以及热界面材料等关系密切,同时还受到加工工艺的限制和影响.针对不同的封装架构,如板上芯片封装、倒装焊芯片封装、带有额外中介层的封装等,需要妥善解决封装工艺中系统热耗如何有效传导至散热天线的具体问题,在设计过程中需全面考虑材料、工艺、成本、可靠性等综合因素.

其三,为了提高无线通信集成系统的散热能力,除了本文讨论的被动式散热技术外,还可以采用风冷、液冷、相变材料、热管冷却、热电制冷等方式进行.如何将毫米波天线技术与先进制冷方式进行有机结合,开发具备主动散热机制的毫米波散热天线技术,值得进一步研究探索.

参考文献

[1] LIU D X, GU X X, BAKS C W, et al. Antenna-in-package

design considerations for ka-band 5G communication applications[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017, 65(12): 6372-6379.

- [2] ZHANG Y P, LIU D X. Antenna-on-chip and antenna-in-package solutions to highly integrated millimeter-wave devices for wireless communications[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2009, 57(10): 2830-2841.
- [3] HE X B, HUBING T H. A closed-form expression for estimating the maximum radiated emissions from a heatsink on a printed circuit board[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2012, 54(1): 205-211.
- [4] HE X B, HUBING T H. Mitigation of unintentional radiated emissions from tall VLSI heatsinks using ground posts [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2013, 55(6): 1271-1276.
- [5] SHEN G Y, YANG S, SUN J D, et al. Maximum radiated emissions evaluation for the heatsink/IC structure using the measured near electrical field[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2017, 59(5): 1408-1414.
- [6] MOONGILAN D. Radiated emissions from proximity coupled oversized heat-sinks[C]//2007 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Honolulu: IEEE, 2007: 1-6.
- [7] JIN H, ZHANG L, YANG X L, et al. A novel heatsink with mushroom-type EBG structure for EMI radiation suppression[C]//2018 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility and 2018 IEEE Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility. Singapore: IEEE, 2018: 772-775.
- [8] CHIKANDO E, CONNOR S, ARCHAMBEAULT B. Reduction of heatsink emissions by application of lossy materials[C]//2010 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Fort Lauderdale: IEEE, 2010: 239-243.
- [9] COVERT L, LIN J. Simulation and measurement of a heat-sink antenna: A dual-function structure[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2006, 54(4): 1342-1349.
- [10] COVERT L, LIN J, JANNING D, et al. Dual-function 3-D heatsink antenna for high-density 3-D integration[C]//2007 IEEE International Workshop on Radio-Frequency Integration Technology. Singapore: IEEE, 2007: 26-29.
- [11] COVERT L, LIN J, JANNING D, et al. 5.8 GHz orientation-specific extruded-fin heatsink antennas for 3D RF system integration[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2008, 50(7): 1826-1831.
- [12] CASANOVA J J, TAYLOR J A, LIN J. Design of a 3-D fractal heatsink antenna[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2010, 9: 1061-1064.

- [13] BAKYTBKOV A, IMAN Z, SHAMIM A. 3D printed bifunctional triple-band heatsink antenna for RF and thermal energy harvesting[C]//2020 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and North American Radio Science Meeting. Montreal: IEEE, 2020: 1563-1564.
- [14] GE J Q, WANG G A. A heatsink integrated antenna with controllable electromagnetic and thermal performance [C]//2020 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and North American Radio Science Meeting. Montreal: IEEE, 2020: 419-420.
- [15] ALNUKARI A, GUILLEMET P, SCUDELLER Y, et al. Active heatsink antenna for radio-frequency transmitter [J]. IEEE Transactions on Advanced Packaging, 2010, 33 (1): 139-146.
- [16] ALNUKARI A, MAHE Y, TOUTAIN S, et al. Microstrip heatsink antenna cooled with sapphire layer for integrated RF transmitters[C]//2012 6th European Conference on Antennas and Propagation(EUCAP). Prague: IEEE, 2012: 1263-1266.
- [17] DINIS H, FERNANDES J, MENDES P M. Slot antenna design for a wirelessly powered implantable microcooler for neuronal applications[C]//2017 11th European Conference on Antennas and Propagation(EUCAP). Paris: IEEE, 2017: 480-484.
- [18] YIN Y S, ZHANG Z, KANAR T, et al. A 24-29.5 GHz 256-element 5G phased-array with 65.5 dBm peak EIRP and 256-QAM modulation[C]//2020 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium(IMS). Los Angeles: IEEE, 2020: 687-690.
- [19] PARK H C, KANG D, LEE S M, et al. 4.1 A 39GHz-band CMOS 16-channel phased-array transceiver IC with a companion dual-stream IF transceiver IC for 5G NR base-station applications[C]//2020 IEEE International Solid-State Circuits Conference. San Francisco: IEEE, 2020: 76-78.
- [20] GU X X, LIU D X, BAKS C, et al. Development, implementation, and characterization of a 64-element dual-polarized phased-array antenna module for 28-GHz high-speed data communications[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2019, 67(7): 2975-2984.
- [21] DUNWORTH J D, HOMAYOUN A, KU B H, et al. A 28GHz Bulk-CMOS dual-polarization phased-array transceiver with 24 channels for 5G user and basestation equipment[C]//2018 IEEE International Solid - State Circuits Conference. San Francisco: IEEE, 2018: 70-72.
- [22] ZHANG Y P, MAO J F. An overview of the development of antenna-in-package technology for highly integrated wireless devices[J]. Proceedings of the IEEE, 2019, 107 (11): 2265-2280.
- [23] LI Y J, WANG C, GUO Y X. A ka-band wideband dual-polarized magnetoelectric dipole antenna array on LTCC [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2020, 68(6): 4985-4990.
- [24] HE Q Q, DING S, XING C, et al. Research on structurally integrated phased array for wireless communications [J]. IEEE Access, 2020, 8: 52359-52369.
- [25] ZHOU J Z, YIN L M, KANG L, et al. Joint design and experimental tests of highly integrated phased-array antenna with microchannel heat sinks[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2019, 18(11): 2370-2374.
- [26] ASLAN Y, PUSKELY J, JANSSEN J H J, et al. Thermal-aware synthesis of 5G base station antenna arrays: An overview and a sparsity-based approach[J]. IEEE Access, 2018, 6: 58868-58882.
- [27] PARK J, CHOI D, HONG W. Millimeter-wave phased-array antenna-in-package(AiP) using stamped metal process for enhanced heat dissipation[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2019, 18(11): 2355-2359.
- [28] QIAN J W, TANG M, ZHANG Y P, et al. Heatsink antenna array for millimeter-wave applications[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2020, 68(11): 7664-7669.
- [29] JIN H Y, CHE W Q, CHIN K S, et al. 60-GHz LTCC differential-fed patch antenna array with high gain by using soft-surface structures[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017, 65(1): 206-216.
- [30] ZHOU L, TANG M, QIAN J W, et al. Vivaldi antenna array with heat dissipation enhancement for millimeter-wave applications[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2022, 70(1): 288-295.

作者简介



周 礼 男,1992年出生,四川绵阳人.现为上海交通大学博士研究生.主要研究方向为封装天线和天线集成系统的协同设计.

E-mail: zhoul0073@sjtu.edu.cn



唐 旻(通讯作者) 男,1980年出生,江西南昌人.现为上海交通大学教授.主要研究方向为射频集成电路系统的建模仿真和协同设计.

E-mail: tm222@sjtu.edu.cn