

· 机械电子工程 ·

# 多热源相控阵天线微通道冷板拓扑结构设计

谭 慧, 陈加进, 吴龙文, 卢 婷, 杜平安\*

(电子科技大学机械与电气工程学院 成都 611731)

**【摘要】**该文为解决相控阵天线阵面的温度不均,设计了S型微通道、类树形分叉横向微通道和T型纵向微通道3种拓扑结构。以多热源温度均匀性为设计指标,利用数值仿真分析了3种微通道拓扑结构的性能,结果表明T型纵向微通道冷板的热源温度均匀性最优。通过实验验证了T型纵向微通道结构的优越性,并且得出了多热源温度均匀性随着热源总功率的提高而降低,随入口流量的增加而提高的规律,为多热源相控阵天线的热设计提供了依据。

**关键词** 微通道冷板; 多热源; 相控阵天线; 温度均匀性

**中图分类号** TB131 **文献标志码** A **doi**:10.3969/j.issn.1001-0548.2019.01.022

## Topology Design of Microchannel Heat Sink for Phased Array Antenna Cooling with Multiple Sources

TAN Hui, CHEN Jia-jin, WU Long-wen, LU Ting, and DU Ping-an\*

(School of Mechanical and Electrical Engineering, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 611731)

**Abstract** In order to solve the temperature non-uniformity on phased array antenna, three topology structures are designed, including: microchannel based on S type, horizontal micro-channel based on similar tree bifurcation, and longitudinal microchannel based on T type. Numerical simulation is carried on to study the temperature uniformity of three microchannel heat sinks with multiple sources. The results show that longitudinal microchannel based on T type has the best uniformity of temperature which is verified by the experiment, and the temperature uniformity is reduced as the total power goes up, yet improved with the increase of inlet flow rate. The study provides a useful reference for the thermal design of phased array antenna with multiple sources.

**Key words** microchannel heat sink; multiple sources; phased array antenna; temperature uniformity

相控阵天线以其小型化和高度集成化的技术优势而得到迅速发展。天线阵面排列大量T/R组件,组件中高功率放大器等电子元器件对温度敏感,因此阵面温度分布不均会导致T/R组件的相位不一致,从而影响甚至损坏天线性能<sup>[1]</sup>。控制阵面各组件的温度均匀性将是天线热控设计面临的重要难题。

文献[2]采用集成微通道冷板对某相控阵雷达实现了高效的散热管理。文献[3]对某型机载相控阵天线散热问题进行了分析研究,使阵面平均温差不超过10℃。文献[4]为提高相控阵雷达的散热能力,分析了平直型微通道截面尺寸因素和流体入口条件对其换热系数的影响。文献[5]设计了面向四通道T/R组件的S型流道冷板与阶梯出入口Z型流道冷板,表明通过调整流道结构参数能够有效降低芯片最高温度。文献[6]提出优化微通道截面形状可以减低芯片

表面最高温度。文献[7]认为采用构形理论设计的流道具有“最优”的散热性能,提出流道拓扑结构优化是提高冷板均温性的有效途径。文献[8]通过实验验证了构造树形微通道比传统S型流道在传热和降压方面具有更好的优势。文献[9]研究了树形流道分叉结构的生成原理,分析得到流道分级级数不断增加、散热性能不断提升的规律。文献[10-12]分别探索了树形分形最优结构设计,研究了分形流道的结构参数对流量分布的影响。文献[13]分析比较了不同微通道拓扑结构对芯片散热效果的影响,发现树形微通道散热的芯片温度最低且分布最均匀。

迄今为止的研究主要集中于提高微通道冷板的散热能力,对改善天线阵面的温度均匀性关注较少。实际上,微通道的散热能力已经达到较高水平,能够满足大部分相控阵天线的散热要求。相较而言,

收稿日期: 2017-10-30; 修回日期: 2018-11-27

基金项目: 国防基础科研计划重点项目(JCKY2013210B0040A)

作者简介: 谭慧(1986-),女,博士生,主要从事微通道散热方面的研究。

通信作者: 杜平安,教授, E-mail: dupingan@uestc.edu.cn

相控阵天线阵面温度均匀性将直接影响天线的工作性能, 因此研究冷板流道的拓扑结构以改善多热源的温度均匀性显得更加重要。本文从流道拓扑结构设计角度出发, 基于已有的S型流道和分形流道提出了S型微通道结构、类树形分叉横向微通道结构和T型纵向微通道结构, 以温度标准差为指标分析了这3种结构的温度均匀性, 为多热源相控阵天线的热设计提供了参考。

### 1 阵面微通道拓扑结构设计

某机载Ka频段相控阵天线包括天线阵面组件、T/R模块、馈电网络组件等模块, 如图1所示。该天线系统将多个T/R模块集成制造为一个T/R阵列模块, 集成度非常高。天线热耗集中于T/R组件的功放芯片, 芯片按二维矩阵方式排列在射频印制板上, 形成一个规模巨大的多热源矩阵。微通道冷板安装在T/R组件下方。需要指出的是, 本文中冷却液在流道内仅发生单相对流换热。

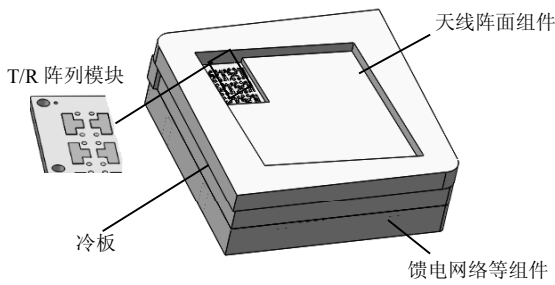


图1 相控阵天线系统组成示意图

#### 1.1 S型微通道结构

S型流道是相控阵冷板常用的拓扑结构。本文以常规S型流道为基础, 设计了基于S型的微通道结构, 如图2所示, 入口宽度 $w_0=6\text{ mm}$ , 流道宽度 $w_1=3\text{ mm}$ , 微通道宽度 $w_c=0.4\text{ mm}$ , 肋宽 $w_e=0.4\text{ mm}$ , 高度 $h_c=1.6\text{ mm}$ , 长度 $l_c=50\text{ mm}$ 。

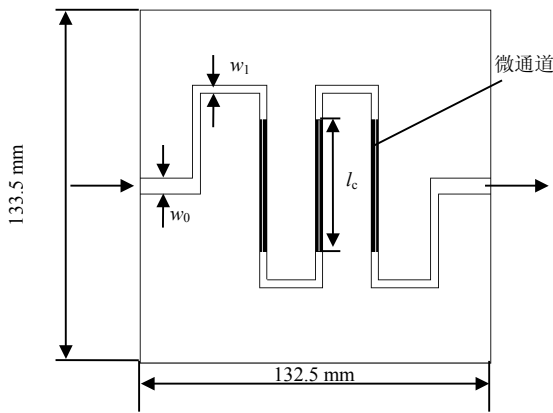


图2 S型微通道结构

由于热量集中于阵面中部, 在设计中流道中间多处布置截面为矩形的平行微通道, 以增加散热面

积, 降低局部高温。流体在冷板通道内的压力损失主要来源于流体的黏性摩擦损失和流体的动量变化, 其数值与流道长度成正比例相关。因此该拓扑结构的缺点为流程较长、冷板的压力损失过大, 且下游区域冷却液温度升高导致散热效率降低, 使阵面右侧的热源温度偏高。

#### 1.2 类树形分叉横向微通道结构

由于T/R组件在阵面上按矩阵方式排列, 若将热源按行分组, 则形成多行子阵列热源。分别对每一行子阵列热源进行冷却, 相应的流道拓扑结构呈横向分布, 同时沿阵面中央左右对称。考虑到分形结构流量分布均匀、散热效率高, 本文设计了类树形分叉横向微通道结构, 如图3所示。经研究发现树形分形结构流阻最小时满足以下几何条件<sup>[8-9,14]</sup>:

$D_{i+1}/D_i = 2^{-1/3}$ ,  $D$  是水力直径;  $w$  是矩形截面流道宽度;  $h$  是流道高度;  $i$  是分形级数,  $i=0,1,2,3$ 。综合考虑几何条件及加工因素, 取  $w_0=6\text{ mm}$ ,  $w_1=3\text{ mm}$ ,  $w_2=1.5\text{ mm}$ 。与传统分形结构相比, 该结构没有严格的上下游分支数要求, 即每一通道在下一层次的分支数不一定相等。图4所示分形结构的分形次数均为2, 图4a是2分叉, 即两次分形的分支数都为2, 图4b是3-2分叉, 即两次分形的分支数分别是3、2。在阵面中央布置多组截面是矩形的平行微通道。微通道长度 $l_c=38.6\text{ mm}$ , 与S型结构相比已经缩短了距离, 减小了压力损失, 并通过分形结构改善了温度分布, 但是热源在微通道长度方向呈彼此串联形式, 导致沿冷却液流动方向每一行的热源温度逐渐升高, 下游的热源温度控制困难。

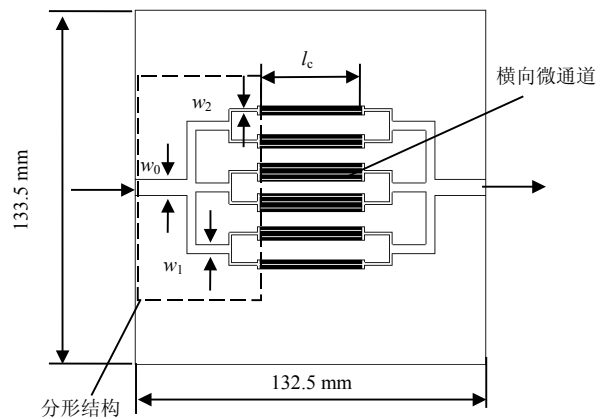


图3 类树形分叉横向微通道结构

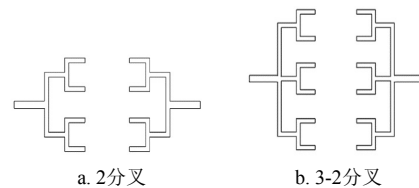


图4 类树形分形结构

### 1.3 T型纵向微通道结构

将阵面热源按列分组,则通道结构相应地呈纵向分布、且沿阵面上下对称。因此每一行的热源可以看成多个列向的热源,只需调整流向每列的流量即可改善热源的温度均匀性。冷却液首先经中心T型结构分形,改变流向,成为纵向的上下两部分。其中上下两部分并非完全对称,通过数值分析热源温度场,确定 $w_1=4.5\text{ mm}$ ,  $w_2=6\text{ mm}$ ,流体最后分别进入局部纵向微通道组,微通道长度仅 $18.5\text{ mm}$ ,远小于其他两种拓扑结构,如图5所示。以“中间微通道数量多、两端少”的原则,通过局部调整微通道数量,即可均衡每列热源之间的温度差异。

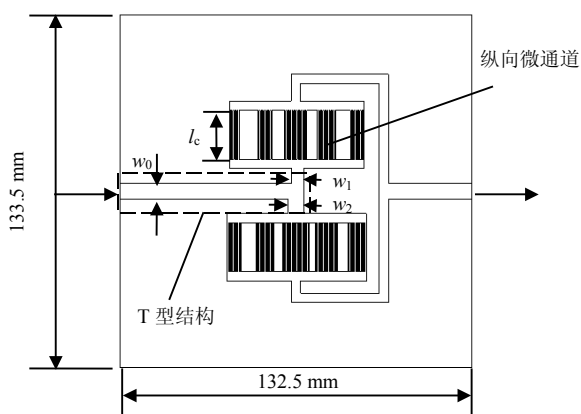


图5 T型纵向微通道结构

## 2 微通道冷板数值分析

为便于比较各拓扑结构的性能,设定3种结构采用相同的冷板材料、外形尺寸、冷却液工质及热源功耗。

### 2.1 仿真模型

冷板热仿真几何模型如图6所示,冷板尺寸均为 $133.5\text{ mm} \times 132.5\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ ,出入口直径均为 $3.5\text{ mm}$ 。为简化计算,热源采用尺寸均为 $5\text{ mm} \times 7\text{ mm} \times 1.2\text{ mm}$ 的芯片,且每个芯片规格相同,数量为20,冷却液为水,入口温度为 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 。设定流道内为三维稳态充分发展的层流,通道壁面光滑,流体不可压缩,不会随着温度的升高发生相变,流体的物性均为常数。无内热源,不计重力,能量方程中忽略黏性耗散和辐射换热。

### 2.2 结果分析

衡量热源温度均匀性的指标包括极差( $R$ )和标准差( $\sigma$ ),其表达式分别为:

$$R = x_{\max} - x_{\min} \quad (1)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2)$$

式中, $n$ 为热源数量; $x_i$ 为每个热源中心温度; $\bar{x}$ 为所有热源的平均温度; $x_{\max}$ 为所有热源的最高温度; $x_{\min}$ 为所有热源的最低温度。从数值上看 $R \geq \sigma$ ,极差仅指明了热源温度的最大范围,而标准差能较准确地反映各热源温度的离散程度,标准差越小,说明热源温度的波动越小,越稳定。因此本文同文献[15]一样选择 $\sigma$ 为衡量热源温度均匀性的指标。

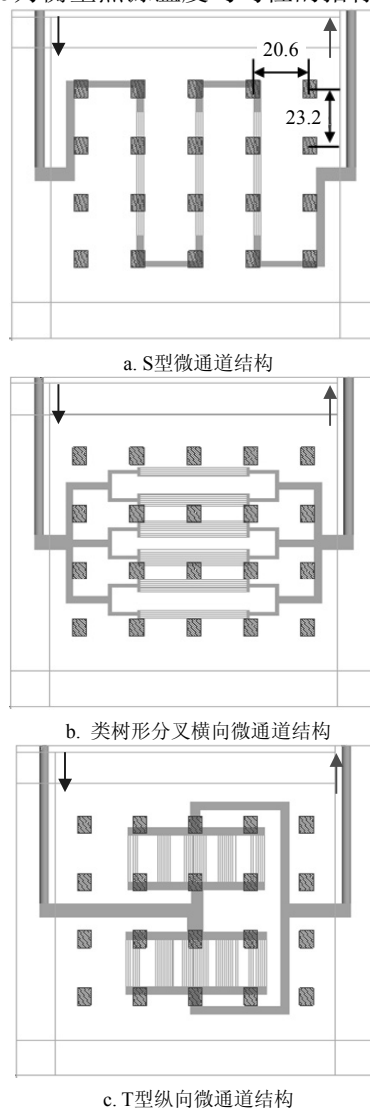
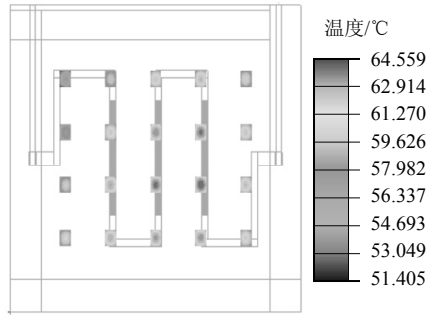


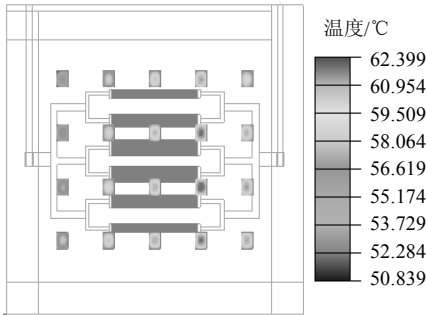
图6 仿真模型

分别计算3种拓扑结构在相同工况下的热源温度。当入口流量为 $0.4\text{ L/min}$ ,总功率为 $256\text{ W}$ 时,T型纵向微通道冷板的热源温度均匀性最好,其温度标准差为 $1.13\text{ }^\circ\text{C}$ ;其次为类树形分叉横向微通道结构,其温度标准差为 $1.75\text{ }^\circ\text{C}$ ;S型微通道结构,其温度标准差为 $2.24\text{ }^\circ\text{C}$ 。从图7可以看出,流道拓扑结构对热源温度分布有重要影响。S型微通道结构的

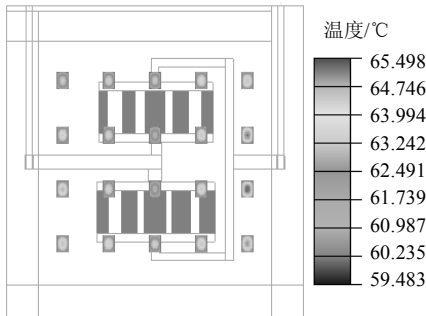
热源温度呈现左侧低、右下侧高的特点; 类树形分叉横向微通道结构的热源温度得到了改善, 每列4个热源的温度较均匀, 而横向热源温差明显; T型纵向微通道结构的热源温度分布最优, 中间一列热源的温度最低。从图8可以看出, S型微通道结构压降远大于其他两种结构, 类树形分叉横向微通道结构和T型纵向微通道结构的压力分布更均匀。



a. S型微通道结构

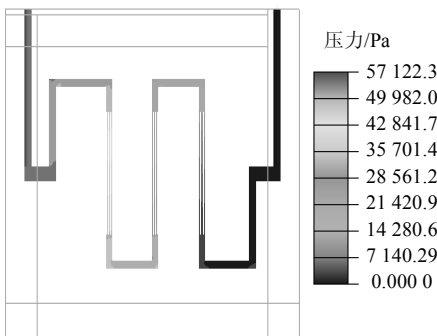


b. 类树形分叉横向微通道结构

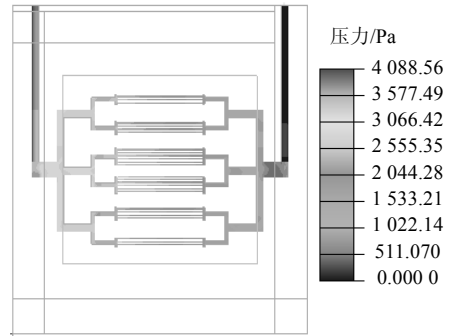


c. T型纵向微通道结构

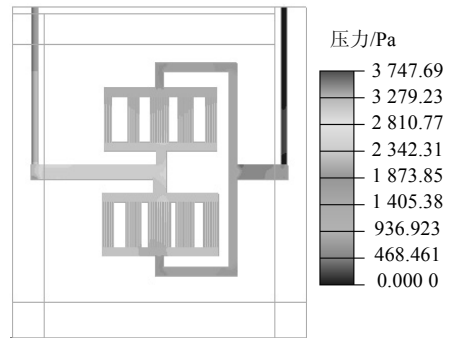
图7 各结构热源温度云图



a. S型微通道结构



b. 类树形分叉横向微通道结构



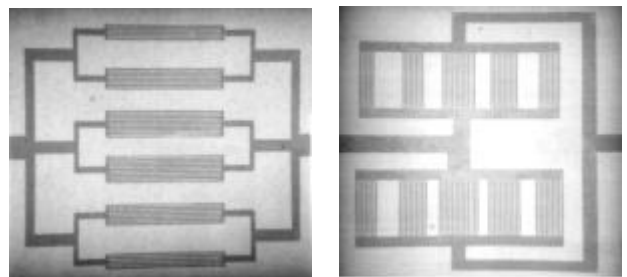
c. T型纵向微通道结构

图8 各结构压力分布云图

### 3 微通道冷板实验验证

选择温度均匀性较好的两种结构进行实验, 采用3D打印技术制备类树形分叉横向微通道和T型纵向微通道, 样件尺寸与仿真模型相同, 通过工业CT得到的X光扫描图像如图9所示。实验系统由加热、微流动驱动、测量模块组成, 如图10所示。热源采用20个规格相同的陶瓷发热片, 用绝缘导热胶粘接在冷板表面。发热片尺寸为5 mm×7 mm×1.2 mm, 呈5×4阵列排布, 横向间距为15.6 mm, 纵向间距为16.2 mm。

分别测量总功率在64~320 W和进口流量0.4 L/min、0.8 L/min时的芯片中心点温度。同样以温度标准差为实验指标, 测量结果如图11所示。



a. 类树形分叉横向微通道结构

b. T型纵向微通道结构

图9 冷板样件工业CT扫描图像

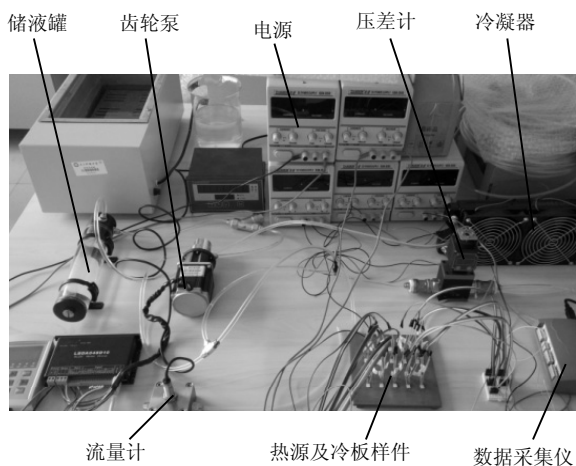
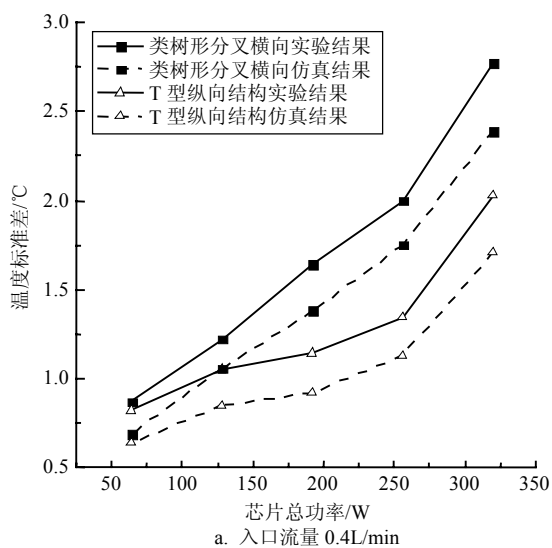
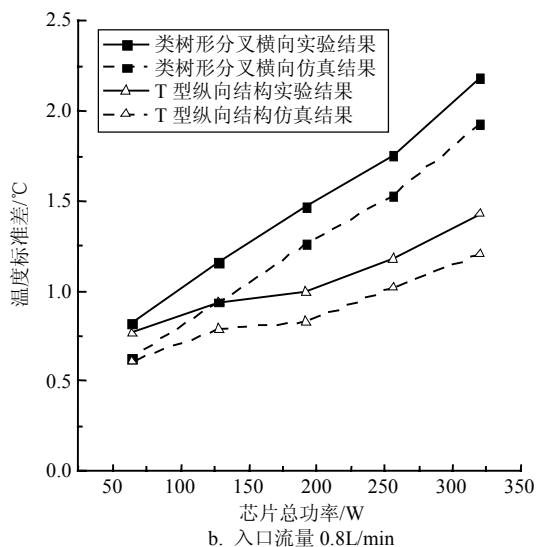


图10 实验平台



a. 入口流量 0.4L/min



b. 入口流量 0.8L/min

图11 温度标准差随芯片总功率变化曲线

从图11可以看出：相同工况下，T型纵向微通道结构的温度均匀性比类树形分叉横向结构更好。芯片总功率和入口流量都是影响温度均匀性的重要因素。两个结构呈现类似的规律：即总功率提高，温

度均匀性下降；入口流量增加，温度均匀性提高。随着总功率的增大，两者温度均匀性的差距逐渐增大，因此在较高功率时，T型纵向微通道结构的优势将更明显。

从图11还可以看出，实验结果与仿真结果吻合较好，平均误差在16.7%以内。实验中选用热电偶测量温度，精度为 $\pm 0.5$  °C，粘接陶瓷发热片的导热硅胶高度偏差为1%。另外受到样件表面粗糙度、环境条件等因素影响，导致实验结果比仿真结果偏高。但数值计算和实验测试反应出的规律相同，说明了T型纵向微通道结构更有利于实现相控阵多热源的温度均匀性。

## 4 结束语

针对相控阵天线难以保证温度均匀性的问题，本文设计了S型微通道、类树形分叉横向微通道和T型纵向微通道这3种微通道拓扑结构。利用3D打印技术制备了两件温度均匀性好的相控阵冷板样件，并研究了热源功率、入口流量对热源温度均匀性的影响规律，实验结果表明T型纵向微通道冷板的热源温度均匀性最好，为工程应用提供有效的设计依据。

## 参考文献

- [1] 宋东升. 基于神经网络的相控阵天线热变形研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2010.  
SONG Dong-sheng. Research of thermal deformation of phased array antenna based on artificial neural network[D]. Xi'an: Xidian University, 2010.
- [2] REVANKAR U K, SREENIVASULU K, VEERABHADRA K M, et al. An experimental active aperture array for L-band high power active phased array radar[C]//IEEE International Symposium on Phased Array Systems & Technology [S.I.]: IEEE, 2003.
- [3] 糜勇, 孙费梅. 机载有源相控阵天线冷却技术研究[C]//2005年机械电子学学术会议. 海口: [s.n.], 2006: 306-309.  
MI Yong, SUN Fei-mei. Study of the airborne active electronic scan array antenna on cooling technology[C]//Proceedings of the Academic Conference on Mechanical Electronics. Haikou: [s.n.], 2006: 306-309.
- [4] 王从思, 宋正梅, 康明魁, 等. 微通道冷板在有源相控阵天线上的应用[J]. 电子机械工程, 2013, 29(1): 1-4.  
WANG Cong-si, SONG Zheng-mei, KANG Ming-kui, et al. Application of microchannel cold plate to active phased array antenna[J]. Electro-Mechanical Engineering, 2013, 29(1): 1-4.
- [5] 李兆. 基于S型与Z型流道冷板的有源相控阵天线热设计研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014.  
LI Zhao. On thermal design of active phased array antennas cold plate with S-type and Z-type channels[D]. Xi'an: Xidian University, 2014.

- [6] YANG Da-wei, WANG Yan, DING Gui-fu, et al. Numerical and experimental analysis of cooling performance of single-phase array microchannel heat sinks with different pin-fin configurations[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 112: 1547-1556.
- [7] REVELLIN R, THOME J R, BEJAN A, et al. Constructal tree-shaped microchannel networks for maximizing the saturated critical heat flux[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2009, 48(2): 342-352.
- [8] CHEN Yong-ping, ZHANG Cheng-bin, SHI Ming-heng, et al. Thermal and hydrodynamic characteristics of constructal tree-shaped minichannel heat sink[J]. *AIChE Journal*, 2010, 56(8): 2018-2029.
- [9] WECHSATOL W, LORENTE S, BEJAN A. Optimal tree-shaped networks for fluid flow in a disc-shaped body[J]. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 2002, 45(25): 4911-4924.
- [10] ALHARBI A Y, PENCE D V, CULLION R N. Thermal characteristics of microscale fractal-like branching channels[J]. *Journal of Heat Transfer*, 2004, 126(5): 744-752.
- [11] HEYMANN D, PENCE D, NARAYANAN V. Optimization of fractal-like branching microchannel heat sinks for single-phase flows[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2010, 49(8): 1383-1393.
- [12] GHAEDAMINI H, SALIMPOUR M R, MUJUMDAR A S. The effect of sveltiness on the bifurcation angles role in pressure drop and flow uniformity of tree-shaped microchannels[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2011, 31(5): 708-716.
- [13] 徐尚龙, 秦杰, 胡广新. 芯片冷却用微通道散热结构热流耦合场数值研究[J]. *中国机械工程*, 2011, 22(23): 2863-2866.  
XU Shang-long, QIN Jie, HU Guang-xin. Numerical study on heat-flow coupling field in microchannel heat sink structures for electronic chip cooling[J]. *China Mechanical Engineering*, 2011, 22(23): 2863-2866.
- [14] WANG Xiang-qi, MUJUMDAR A S, YAP C. Numerical analysis of blockage and optimization of heat transfer performance of fractal-like microchannel nets[J]. *Journal of Electronic Packaging*, 2006, 128: 38-45.
- [15] CHO E S, CHOI J W, YOON J S, et al. Experimental study on microchannel heat sinks considering mass flow distribution with non-uniform heat flux conditions[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2010(53): 2159-2168.

编辑 刘飞阳