



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 106650009 A

(43)申请公布日 2017.05.10

(21)申请号 201611041987.7

(22)申请日 2016.11.24

(71)申请人 中国电子科技集团公司第二十九研究所

地址 610036 四川省成都市金牛区营康西路496号

申请人 电子科技大学

(72)发明人 黄柯衡 张正鸿 陈云飞 王海 万家春

(74)专利代理机构 电子科技大学专利中心 51203

代理人 甘茂

(51)Int. Cl.

G06F 17/50(2006.01)

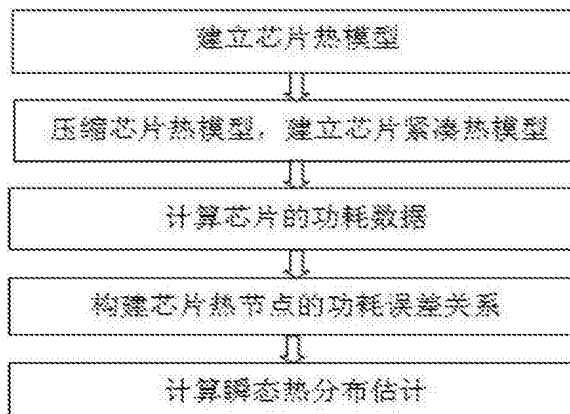
权利要求书1页 说明书6页 附图5页

(54)发明名称

一种微处理器快速瞬态热分布估计方法

(57)摘要

本发明涉及微处理器领域,涉及微处理器热分布估计,具体为一种微处理器快速瞬态热分布估计方法,用以克服现有技术中温度估计计算延迟较大、温度估计误差较大的问题,本发明提供一种快速高精度的微处理器瞬态热分布估计方法,该方法利用微处理器上的性能计数器估计出微处理器各部件的功耗,通过微处理器紧凑热模型计算出微处理器的热分布,同时结合片上物理热传感器的读数以及微处理器各功能模块的功耗相关性,对热估计进行反馈校正,从而得到微处理器的精确热分布。



1. 一种微处理器快速瞬态热分布估计方法,包括:

步骤1、建立微处理器热模型;

步骤2、采用结构保持模型降阶方法对步骤1得到的热模型进行压缩,得到微处理器紧凑热模型;

步骤3、通过微处理器功耗估计软件在微处理器架构上仿真运行标准测试程序得到微处理器各功能模块功耗估计;

步骤4、通过在微处理器上仿真运行多个测试程序获取微处理器各功能模块功耗误差信息,计算功能模块功耗误差间的相关性矩阵,从而构建微处理器的功耗误差关系矩阵;

步骤5、计算瞬态热分布估计:根据步骤2得到的紧凑热模型和步骤3得到的微处理器各功能模块功耗估计,采用欧拉法进行热估计,将该热估计与热传感器测量温度进行比较,当比较差值大于预设阈值时,采用步骤4所得微处理器的功耗误差关系矩阵对功耗估计进行反馈补偿,将补偿后的功耗估计与紧凑热模型再次进行热估计,得到微处理器的热分布估计。

一种微处理器快速瞬态热分布估计方法

技术领域

[0001] 本发明涉及微处理器领域,涉及微处理器热分布估计,具体为一种微处理器快速瞬态热分布估计方法。

背景技术

[0002] 随着集成度的提高,微处理器的高功率密度导致芯片温度不断提高。过高的温度将给芯片带来晶体管转换速率降低、互连线延迟增加、计算出错率增加、使用寿命降低等多种负面影响。许多动态热管理技术被提出以解决微处理器的高温问题,其中包括动态电压频率缩放技术、任务调度技术、任务迁移技术、时钟门控技术等。这些动态热管理技术大多依赖于片上物理热传感器提供芯片温度监控信息。然而,因为片上物理热传感器数量稀少,且在芯片上的分布并非最优,仅仅使用物理热传感器进行温度监控无法获取芯片的热点温度以及热分布信息。而缺乏整个微处理器的热分布监控信息,则对热管理的有效性有较大的影响。具体来说,物理热传感器仅能获得其所处位置的温度读数,而该位置往往并非芯片乃至该物理传感器周围最高温度所在之处。这将使得相应的动态热管理技术错误判断芯片所处温度情况,进而采取错误的热管理决策,导致芯片可靠性降低。因此,快速而又精确进行微处理器热分布估计,是保证动态热管理技术能够高效地做出准确热管理决策的重点。

[0003] 通过对现有技术文献检索发现,Shervin Sharifi和Tajana Simunic Rosing在2010年IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems (IEEE集成电路与系统的计算机辅助设计汇刊)中发表文章《Accurate Direct and Indirect On-Chip Temperature Sensing for Efficient Dynamic Thermal Management》(应用于高效动态热管理的精确直接与间接片上热传感),该文章提出了在片上物理热传感器数量不足的情况下,使用基于热模型的软件热传感器获取芯片的热分布;该方法首先对微处理器芯片建立热模型,并使用芯片功耗估计作为热模型的输入,计算出芯片的温度分布;为了获取更为准确的温度分布估计,该方法使用物理热传感器读数并结合卡尔曼滤波器对温度分布估计进行校正。这种方法主要存在两方面缺陷:第一,由于芯片热模型的规模较大,直接使用该热模型将导致较大的热估计延迟;第二,虽然该方法采用了基于卡尔曼滤波器的热反馈进行温度估计,但是由于未能考虑芯片各模块间的功耗相关性,该方法在远离物理热传感器的位置具有较大的温度估计误差。

发明内容

[0004] 本发明的目的在于针对现有技术中温度估计计算延迟较大、温度估计误差较大的问题,提出一种快速高精度的微处理器瞬态热分布估计方法,该方法利用微处理器上的性能计数器估计出微处理器各部件的功耗,通过微处理器紧凑热模型计算出微处理器的热分布,同时结合片上物理热传感器的读数以及微处理器各功能模块的功耗相关性,对热估计进行反馈校正,从而得到微处理器的精确热分布。

[0005] 为实现上述目的,本发明的技术方案为:

- [0006] 一种微处理器快速瞬态热分布估计方法,包括:
- [0007] 步骤1、建立微处理器热模型;
- [0008] 步骤2、采用结构保持模型降阶方法对步骤1得到的热模型进行压缩,得到微处理器紧凑热模型;
- [0009] 步骤3、通过微处理器功耗估计软件在微处理器架构上仿真运行标准测试程序得到微处理器各功能模块功耗估计;
- [0010] 步骤4、通过在微处理器上仿真运行多个测试程序获取微处理器各功能模块功耗误差信息,计算功能模块功耗误差间的相关性矩阵,从而构建微处理器的功耗误差关系矩阵;
- [0011] 步骤5、计算瞬态热分布估计:根据步骤2得到的紧凑热模型和步骤3得到的微处理器各功能模块功耗估计,采用欧拉法进行热估计,将该热估计与热传感器测量温度进行比较,当比较差值大于预设阈值时,采用步骤4所得微处理器的功耗误差关系矩阵对功耗估计进行反馈补偿,将补偿后的功耗估计与紧凑热模型再次进行热估计,得到微处理器的热分布估计。
- [0012] 本发明的有益效果在于:本发明利用基于微处理器紧凑热模型的全芯片热估计技术和基于物理热传感器读数反馈的热估计校正技术,能够快速并且精确地估计出微处理器的瞬态热分布。

附图说明

- [0013] 图1为本发明提供微处理器快速瞬态热分布估计方法流程示意图。
- [0014] 图2为微处理器芯片架构示意图。
- [0015] 图3为本发明热估计方法进行功耗估计反馈补偿效果比较图。
- [0016] 图4为本发明热估计方法进行芯片温度分布估计的效果比较图。

具体实施方式

- [0017] 本发明提供一种微处理器快速瞬态热分布估计方法,利用微处理器上的性能计数器估计出微处理器各部件的功耗,通过微处理器紧凑热模型计算出微处理器的热分布,同时结合片上物理热传感器的读数以及微处理器各功能模块的功耗相关性,对热估计进行反馈校正,从而得到微处理器的精确热分布。
- [0018] 为使本发明的目的、技术方案及优点更加清楚明白,下面参照附图并举实施例,对本发明进一步详细说明。
- [0019] 本实施例提供一种微处理器瞬态快速热估计方法,如图1所示,具体步骤包括:
- [0020] 步骤1、建立芯片热模型;
- [0021] 具体而言,在本发明实施例中,进一步包括构建微处理器架构,建立芯片的基本热模型,并根据物理热传感器的分布位置对芯片的热模型结构进行调整。
- [0022] 本实施例中微处理器的结构如图2所示,图2(a)中显示了双核微处理器的整体架构,图2(b)中则显示了该双核处理器中每个核心内部的具体架构;使用有限差分法建立由以下微分方程组表示的热模型:

$$[0023] \quad C \frac{dT(t)}{dt} + GT(t) = BU(t), \quad J(t) = BU(t),$$

[0024] 设定芯片总共有n个热节点, n_p 个功能模块, 则C矩阵、G矩阵均为 $n \times n$ 大小的常矩阵, B矩阵为 $n \times n_p$ 大小的常矩阵, $U(t)$ 为长度为 n_p 的功耗输入向量, $T(t)$ 则是需要被计算出的长度为n的芯片热节点向量;

[0025] 进一步, 根据物理热传感器的分布位置对上述芯片热模型进行行列变换, 得到下式:

$$[0026] \quad \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{dT_s(t)}{dt} \\ \frac{dT_u(t)}{dt} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_s(t) \\ T_u(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix} U(t), \quad \begin{bmatrix} J_s(t) \\ J_u(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix} U(t)$$

[0027] 其中, $T_s(t)$ 中的芯片热节点均含有物理热传感器, 而 $T_u(t)$ 中的芯片热节点均不含有物理热传感器;

[0028] 步骤2、建立芯片紧凑热模型;

[0029] 具体而言, 在本发明实施例中, 将采用结构保持模型降阶方法对步骤1中建立的芯片热模型进行压缩, 得到芯片紧凑热模型;

[0030] 进一步的, 我们首先使用普通模型降阶方法计算出大小为 $n \times k$ ($k \ll n$) 的投影矩阵 V ; 获得该投影矩阵的方法主要有两种: 一种是基于克雷洛夫子空间 (Krylov subspace) 方法, 克雷洛夫子空间方法需要指定频域展开点, 本实施例在频率0点展开; 另一种则是基于采样的方法, 采样法则需要指定采样的频率点, 本实施例的频率采样点为0和100Hz。

[0031] 将普通模型降阶方法计算出的投影矩阵 V 转换为结构保持的投影矩阵; 按照步骤1得热模型中划分的结构, 将投影矩阵 V 同样划分如下:

$$[0032] \quad V = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix}$$

[0033] 随后, 将该投影矩阵转换为结构保持的投影矩阵 V_{sp} 如下:

$$[0034] \quad V_{sp} = \begin{bmatrix} \text{orth}(V_1) & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \text{orth}(V_2) \end{bmatrix}$$

[0035] 其中, orth 表示对 V_1 和 V_2 进行正交归一处理, 以提高其数值性能;

[0036] 使用 V_{sp} 得到结构保持的紧凑热模型如下:

$$[0037] \quad \begin{bmatrix} \tilde{C}_{11} & \tilde{C}_{12} \\ \tilde{C}_{21} & \tilde{C}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{d\tilde{T}_s(t)}{dt} \\ \frac{d\tilde{T}_u(t)}{dt} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \tilde{G}_{11} & \tilde{G}_{12} \\ \tilde{G}_{21} & \tilde{G}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{T}_s(t) \\ \tilde{T}_u(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{B}_1 u(t) \\ \tilde{B}_2 u(t) \end{bmatrix},$$

[0038] 其等效的矩阵形式写为: $\tilde{C} \frac{d\tilde{T}(t)}{dt} + \tilde{G}\tilde{T}(t) = \tilde{B}u(t)$;

[0039] 步骤3、计算芯片的功耗数据;

[0040] 具体而言, 在本实施例中, 通过微处理器功耗估计软件计算出该芯片运行标准测试程序的功耗;

[0041] 根据如图2所示的微处理器架构,使用基于SimpleScalar软件的功耗估计软件Wattch在该微处理器架构上仿真运行SPEC2000标准测试程序,得到动态功耗和静态功耗的瞬态数据;随后,将该功耗信息映射到芯片各功能模块中,得到芯片各功能模块的瞬态功耗数据;

[0042] 步骤4、构建芯片热节点的功耗误差关系;

[0043] 具体而言,在本实施例中,通过在芯片上仿真运行多个测试程序获取的芯片各功能模块功耗误差信息,计算出功能模块功耗误差间的相关性矩阵 (correlation matrix),依据该相关性矩阵建立芯片的功耗误差关系矩阵;

[0044] 使用功耗估计软件在芯片上运行b个具有稳定功耗的测试程序,记录下运行这b个测试程序时芯片各功能模块的功耗;再使用测试芯片实际运行上述相同的b个测试程序,记录下运行这b个测试程序时芯片的稳态温度分布;最后,使用通过温度计算功耗的反向功耗计算方法计算出运行该b个程序时芯片各功能模块的功耗;

[0045] 进一步的,利用步骤1、2的结果,计算出芯片各功能模块的功耗估计误差矩阵,并将其按照步骤1得热模型的结构划分为:

$$[0046] \quad \Delta U = \begin{bmatrix} \Delta U_s \\ \Delta U_u \end{bmatrix}$$

[0047] 其中,第i列 Δu_i 由 $\Delta U_s^i = [\Delta \hat{u}_1^i, \Delta \hat{u}_2^i, \dots, \Delta \hat{u}_{n_s}^i]^T$ 和 $\Delta U_u^i = [\Delta \hat{u}_{n_s+1}^i, \Delta \hat{u}_{n_s+2}^i, \dots, \Delta \hat{u}_{n_p}^i]^T$ 组成, n_s 为芯片物理热传感器的数量, n_p 为芯片功能模块的数量。

[0048] 使用 ΔU 构成如下所示的功能模块功耗误差间的相关性矩阵:

[0049]

$$corr_{\Delta u} = \begin{bmatrix} \frac{E[(\Delta u_1 - \mu_1)(\Delta u_1 - \mu_1)]}{\sigma_{\Delta u_1}^2} & \frac{E[(\Delta u_1 - \mu_1)(\Delta u_2 - \mu_2)]}{\sigma_{\Delta u_1} \sigma_{\Delta u_2}} & \dots & \frac{E[(\Delta u_1 - \mu_1)(\Delta u_{n_p} - \mu_{n_p})]}{\sigma_{\Delta u_1} \sigma_{\Delta u_{n_p}}} \\ \frac{E[(\Delta u_2 - \mu_2)(\Delta u_1 - \mu_1)]}{\sigma_{\Delta u_2} \sigma_{\Delta u_1}} & \frac{E[(\Delta u_2 - \mu_2)(\Delta u_2 - \mu_2)]}{\sigma_{\Delta u_2}^2} & \dots & \frac{E[(\Delta u_2 - \mu_2)(\Delta u_{n_p} - \mu_{n_p})]}{\sigma_{\Delta u_2} \sigma_{\Delta u_{n_p}}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{E[(\Delta u_{n_p} - \mu_{n_p})(\Delta u_1 - \mu_1)]}{\sigma_{\Delta u_{n_p}} \sigma_{\Delta u_1}} & \frac{E[(\Delta u_{n_p} - \mu_{n_p})(\Delta u_2 - \mu_2)]}{\sigma_{\Delta u_{n_p}} \sigma_{\Delta u_2}} & \dots & \frac{E[(\Delta u_{n_p} - \mu_{n_p})(\Delta u_{n_p} - \mu_{n_p})]}{\sigma_{\Delta u_{n_p}}^2} \end{bmatrix}$$

[0050] 其中, μ_i 为 Δu_i 的期望值,该式可被划分如下:

$$[0051] \quad corr_{\Delta u} = \begin{bmatrix} E_{ss} & E_{us}^T \\ E_{us} & E_{uu} \end{bmatrix}$$

[0052] 相关性矩阵为对称矩阵,其中的值均位于-1与1之间,反映了两个变量之间的相关性(特殊的,-1和1表示两个变量完全相关,而0则表示两个变量完全独立不相关);

[0053] 进一步的,我们对每一个不含热传感器的功能模块,确定其需要和哪一个含热传感器的功能模块关联;由于 E_{us} 中的值反映了含热传感器的功能模块与不含热传感器的功能模块的相关性,我们通过查看 E_{us} 矩阵元素的值来决定第i个不含热传感器的功能模块需要和哪一个含热传感器的功能模块关联:对 E_{us} 的第i行,找出值最大的元素,记录其列号为j,则表示第i个不含热传感器的功能模块需要和第j个含热传感器的功能模块关联。

[0054] 确定被关联的功能模块功耗误差间的关系, 设第*i*个不含热传感器的功能模块与第*j*个含热传感器的功能模块相关联, 则使用前面得到的*b*个程序的功耗误差信息中的 $[\Delta u_i^1, \Delta u_i^2, \dots, \Delta u_i^b]$ 和 $[\Delta u_j^1, \Delta u_j^2, \dots, \Delta u_j^b]$ 通过线性回归的方法得到以下关系: $\Delta u_j = a_j \Delta u_i$;

[0055] 对每一对关联的功能模块进行上述步骤, 则建立以下的关系式: $\Delta U_a = D_p \Delta U_s$;

[0056] 其中, $\Delta U_s \in \mathbb{R}^n$ 包括所有功能模块的功耗误差, $\Delta U_a \in \mathbb{R}^{n_p}$ 则包括含物理热传感器的功能模块的功耗误差;

[0057] 根据上式的芯片功能模块功耗误差关系构建芯片热节点的功耗误差关系: $\epsilon_u = D\epsilon_s$;

[0058] 其中, $D \in \mathbb{R}^{(n-n_s) \times n_s}$ 为芯片热节点的功耗误差关系矩阵, 表示不含物理热传感器的热节点与含物理热传感器的热节点之间的功耗误差关系, ϵ_u 表示不含物理热传感器的热节点功耗误差, ϵ_s 表示含物理热传感器的热节点功耗误差; D 矩阵为: $D = MD_p$; 其中, M 矩阵中的第*i*行第*j*列的元素在第*i*个不含物理热传感器的热节点位于第*j*个功能模块中时为非零值, 且该值由下式计算: $M_{i,j} = r_{u_i} / r_{s_j}$; 其中, r_{u_i} 是第*i*个不含物理热传感器的热节点的功耗在其所在的功能模块总功耗的占比, r_{s_j} 是该功能模块所关联的含物理热传感器的功能模块中物理热传感器所在热节点功耗在其所在功能模块总功耗中的占比;

[0059] 步骤5、计算瞬态热分布估计;

[0060] 具体而言, 在本实施例中, 首先使用步骤2中得到的芯片紧凑热模型与步骤3中得到的芯片功耗估计对芯片进行热估计, 当热估计得到的物理热传感器处的温度与物理热传感器读数具有较大误差时, 利用步骤4中得到的芯片热节点的功耗误差关系对功耗进行反馈补偿;

[0061] 使用步骤2中得到的芯片紧凑热模型与步骤3中得到的芯片功耗估计对芯片使用欧拉法进行热估计如下:

$$[0062] \quad \tilde{T}(t+h) = \left(\frac{\tilde{C}}{h} + \tilde{G}\right)^{-1} \left(\frac{\tilde{C}}{h} \tilde{T}(t) + \tilde{J}(t+h)\right)$$

[0063] 按一定的时间间隔将上式在物理热传感器处的温度估计与物理热传感器的读数进行比较; 若比较差值大于预设阈值, 则按以下方法进行功耗反馈补偿:

[0064] 对紧凑热模型建立热节点的功耗误差关系如下: $\tilde{\epsilon}_u \approx V_2^T D V_1 \tilde{\epsilon}_s = \tilde{D} \tilde{\epsilon}_s$; 其中, $\tilde{D} = V_2^T D V_1$ 为紧凑热模型的热节点功耗误差关系矩阵;

[0065] 进一步的, 使用下式计算出 $\tilde{\epsilon}_s$:

$$[0066] \quad \begin{bmatrix} \tilde{G}_{12} & -I_{k \times k} \\ \tilde{G}_{22} & -\tilde{D} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \tilde{T}_u(t) \\ \tilde{\epsilon}_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\tilde{G}_{11} \Delta \tilde{T}_s(t) \\ -\tilde{G}_{21} \Delta \tilde{T}_s(t) \end{bmatrix}$$

[0067] 然后又根据 $\tilde{\epsilon}_s$ 的值计算出 $\tilde{\epsilon}_u$;

[0068] 利用计算出的 $\tilde{\epsilon}$ 对功耗估计补偿如下: $\tilde{J}(t+ih) = \tilde{J}(t+ih) + \tilde{\epsilon}$, 其中, $i = 1, 2, \dots$;

[0069] 利用经过补偿后的功耗估计与芯片紧凑热模型继续进行热估计得到 $\tilde{T}(t)$, 最后将 $\tilde{T}(t)$ 还原为 $T(t)$: $T(t) \approx V_{sp} \tilde{T}(t)$; 最终得到芯片的温度估计。

[0070] 如图3所示为本发明提出的热估计方法进行功耗估计反馈补偿效果比较图,其中,(a)为真实的芯片功耗分布,(b)为功耗估计软件估计出的带有明显误差的芯片功耗分布估计,(c)为经过本发明对功耗进行误差补偿后的芯片功耗分布估计,从图中可以看到直接使用功耗估计软件估计出的功耗分布(b)与真实的芯片功耗分布(a)有着明显的误差差异,而在使用本发明提出的方法对功耗分布估计进行误差补偿后产生的新的功耗分布估计(c)则与真实的芯片功耗分布无明显差异。如图4所示为本发明提出的热估计方法进行芯片温度分布估计的效果比较图,其中,(a)为监测点OP1处的瞬态热估计结果,(b)为监测点OP2处的瞬态热估计结果;从图中可以看到本专利提出的方法估计出的温度曲线(red estimated)与芯片真实的温度曲线(actual)之间的仅具有较小的误差。对比未进行模型降阶紧凑热建模处理的方法估计出的温度曲线(org estimated)可以看出,模型降阶建立的芯片紧凑热模型非常精确,对温度估计精度无明显影响。对比已有的基于卡尔曼滤波器的热分布估计方法估计出的温度曲线(kalman)可以看出,本专利提出的方法的温度估计精度远远高于基于卡尔曼滤波器的热分布估计方法。

[0071] 以上对本发明所提供的一种微处理器瞬态快速热估计方法进行了详细介绍,本文中应用了具体个例对本发明的原理及实施方式进行了阐述,以上实施例的说明只是用于帮助理解本发明的方案;同时,对于本领域的一般技术人员,依据本发明的思想,在具体实施方式及应用范围上均会有改变之处,综上所述,本说明书内容不应理解为对本发明的限制。

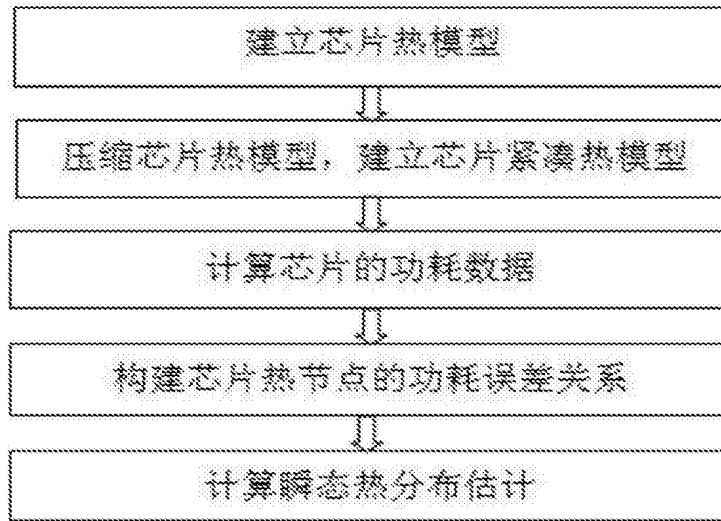
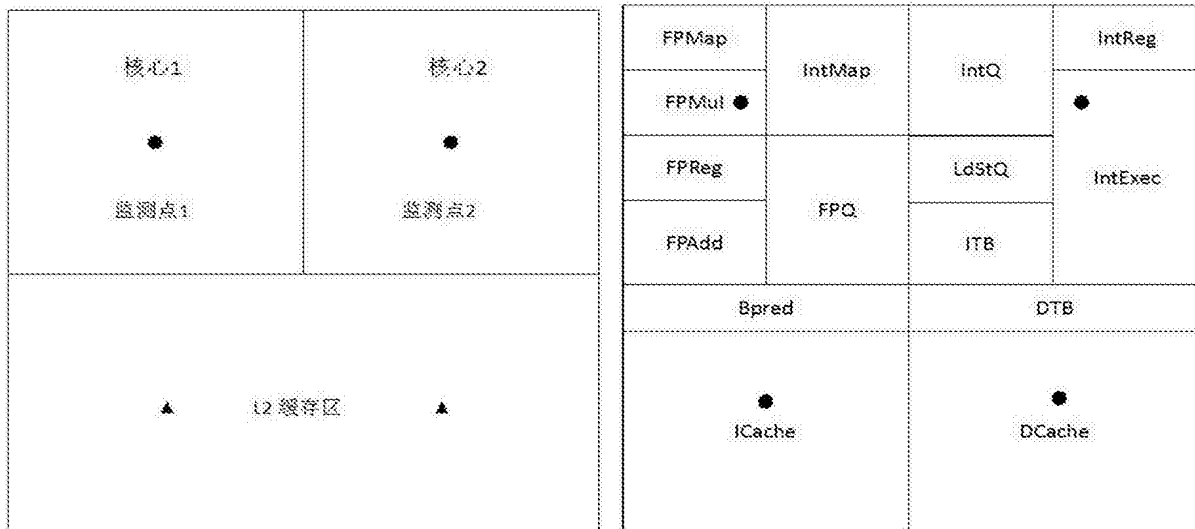


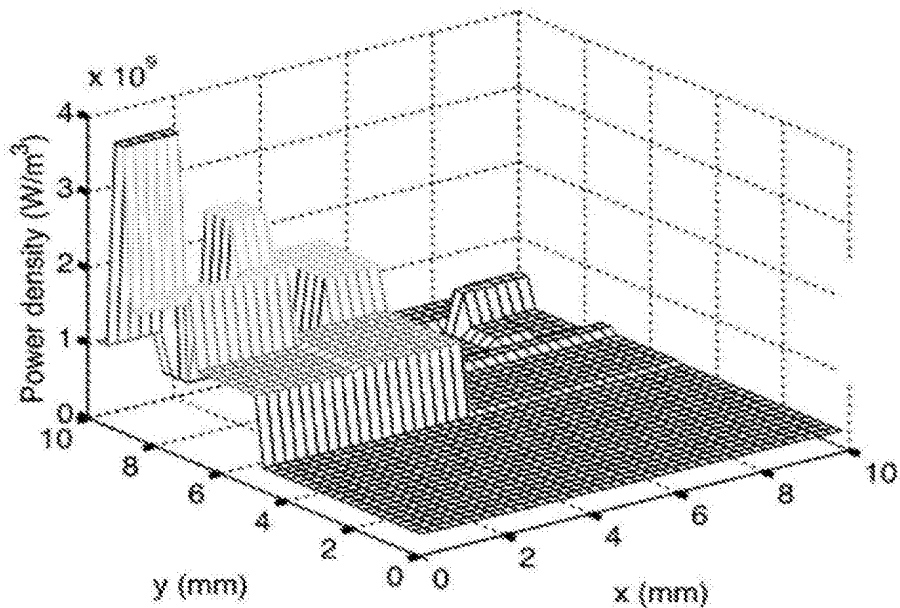
图1



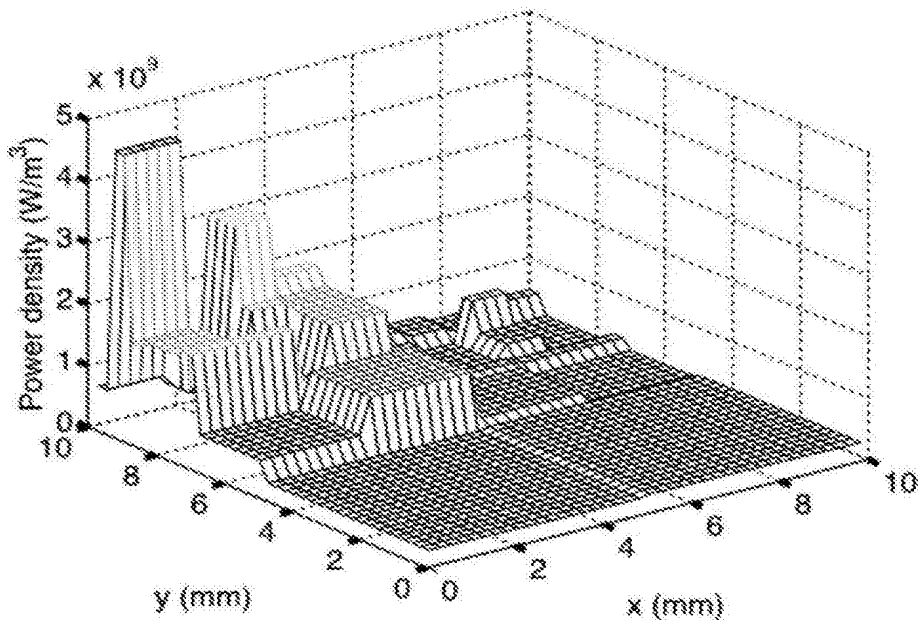
(a)

(b)

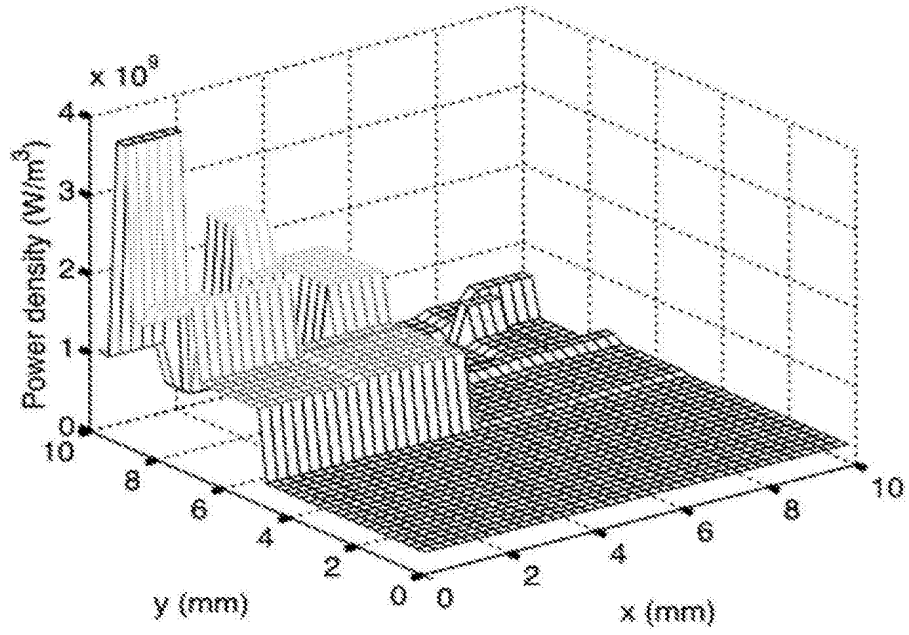
图2



(a)

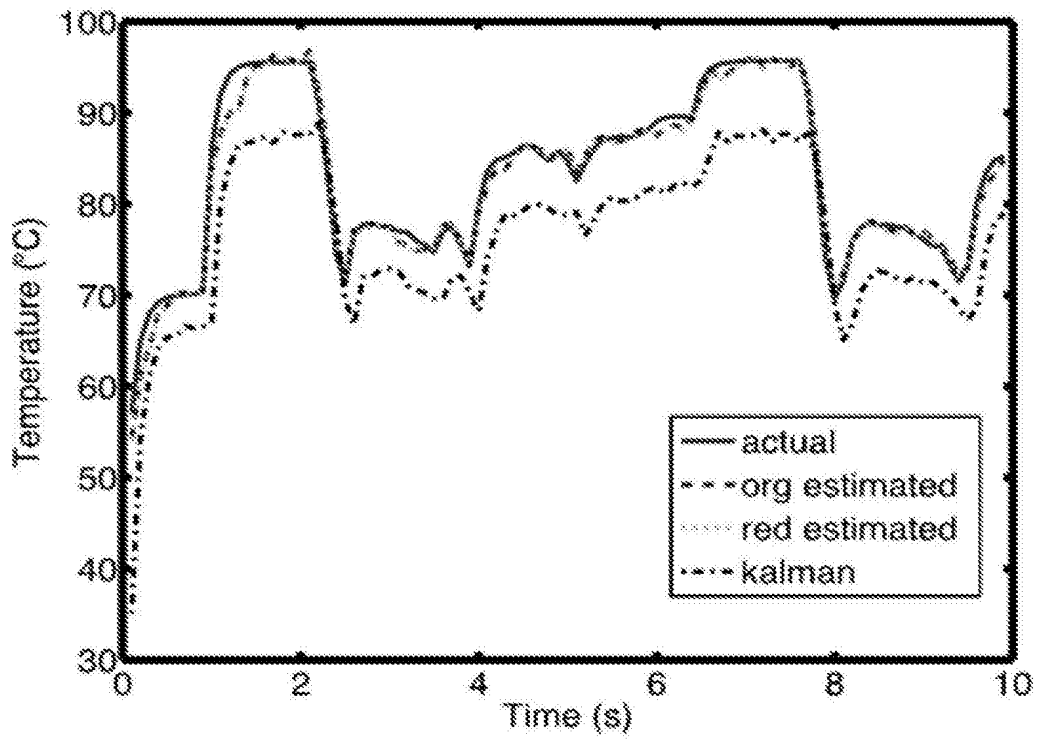


(b)

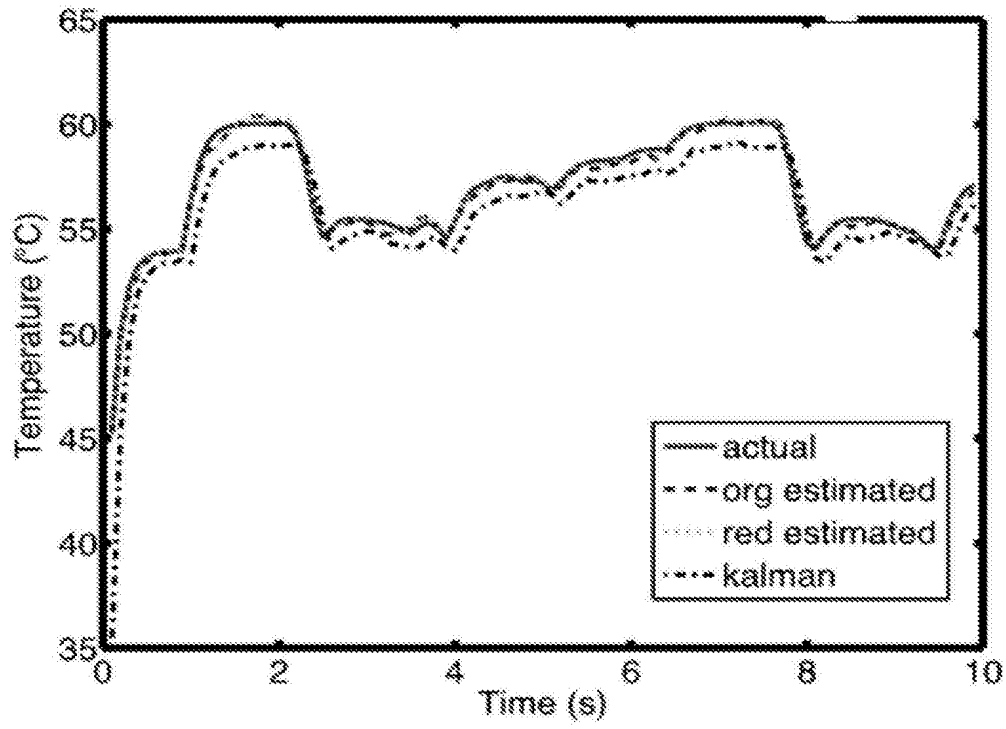


(c)

图3



(a)



(b)

图4