

多核阵列的任务调度技术研究

陈亦欧 吕信科 凌翔

(电子科技大学通信抗干扰技术国家级重点实验室 成都 611731)

摘要 随着信号处理的复杂度的增加,多核并行架构成为数字信号系统的有效解决方案。主要研究了面向数字信号处理系统的无线多核阵列的任务调度问题。从数字信号处理系统与无线多核阵列的性能和开销要求出发,以功耗、热分布以及延时为优化目标,设计出相应的功耗、热均衡评估与延时模型,作为多目标优化算法的目标函数。同时,在NSGA-II算法的基础上改进拥挤策略与初始种群,并设计新的适应度函数,兼顾3个优化目标的性能,增加探索到更优解的可能性。最后,在无线多核阵列平台上采用多种任务图进行仿真,验证了所提算法的有效性 with 优越性。

关键词 多核阵列,热均衡,任务调度,多目标优化

中图分类号 TN4 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2017.08.008

New Task Scheduling Technique for Multicore Arrays

CHEN Yi-ou LV Xin-ke LING Xiang

(National Key Lab of Science and Technology on Communications, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract As the complexity of the signal processing increases, the multicore parallel architecture has become an effective solution for digital signal processing (DSP) systems. This paper proposed a new task scheduling technique in wireless multicore systems for DSP systems. Three optimization objectives, such as power consumption, thermal distribution and latency, were chosen to achieve the performance and cost requirements of DSP systems and wireless multicore arrays. The respective models were designed as the objective functions of the multi-objective optimization algorithm. Also, an improved crowded strategy and the initial population selection based on NSGA-II algorithm with new fitness functions were proposed to balance the performance of the three optimization objectives and increase the possibility of exploring better solutions. Finally, experiments were taken under several task graphs in wireless multicore systems. Simulation results prove that the proposed algorithm is effective and can achieve better performance than the traditional ones.

Keywords Multicore array, Thermal distribution, Task scheduling, Multi-objective optimization

1 引言

随着通信信号处理的复杂度日益增长,未来通信系统将难以有线的资源支持复杂的数据交换与处理,现有的单核处理平台将难以满足延时、功耗等性能要求。随着大规模并行处理技术的发展,多核并行处理将取代传统的单核串行处理方式^[1-2]。任务调度是信号处理系统在多核平台上应用的第一步,任务调度决定了每个任务在处理核上的位置,其过程如图1所示。这个过程决定了上层应用在多核平台上的功耗、延时、吞吐率等各项性能,因此,任务调度技术是多核处理中最关键的技术之一。

研究表明,关于任务图的最优任务调度是一个NP问题。现有的任务调度算法主要考虑低功耗和低延时两个目标^[3-6]。

芯片功耗过大会带来芯片过热、工作不稳定以及供电等问题;而通信和信号处理系统还对处理的实时性有要求,延时问题也是不可忽略的^[7]。然而,这些研究并没有将多核系统面临的更重要的问题——散热作为系统优化设计的目标^[8-9]。由于超大规模集成电路的芯片面积小,封装密度高,因此越来越高的功率密度使得芯片温度升高,而局部温度过高会降低系统的可靠性,甚至造成节点失效。因此,在多核系统的任务调度阶段,应该同时进行功耗、延时和热量分布的多目标优化设计。

基于Pareto的进化算法在多目标优化领域取得了很好的效果,其中Deb等提出的非支配排序遗传算法(Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II, NSGA-II)^[10]是当前最常用的多目标进化算法。然而,当优化目标的数目增多时,NS-

到稿日期:2016-07-05 返修日期:2016-10-06 本文受中央高校基本科研业务费专项资金(ZYGX2014J011),国家“863”计划(2015AA01A701)资助。

陈亦欧(1982-),女,博士,副教授,主要研究方向为软件无线电、集成电路设计、片上网络与多核处理等,E-mail:chenyiou@uestc.edu.cn;吕信科(1989-),女,硕士生,主要研究方向为多核片上网络,E-mail:98302773@qq.com;凌翔(1972-),男,教授,博士生导师,主要研究方向为软件无线电、5G信号处理,E-mail:xiangling@uestc.edu.cn。

GA-II 并不能很好地兼顾解的多样性与多目标的性能。针对这个问题, 本文在当前 NSGA-II 算法的基础上, 通过改进拥挤策略与初始种群, 使各层的个体更加均匀地进化到下一代, 以增加种群多样性, 防止过早的局部收敛, 提高搜索到更优质解的可能性; 并对适应度函数添加惩罚函数, 以灵活控制对功耗、延时以及热分布三者的折中选择, 确保在优化热分布的同时使功耗和延时付出的代价在可控范围。

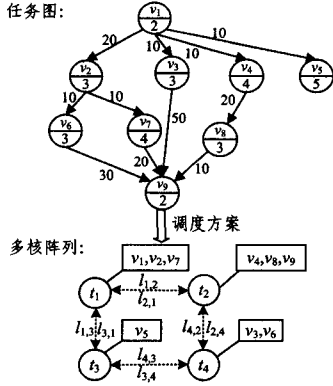


图 1 多核阵列上的任务调度示例

2 问题描述与数学模型

2.1 延时模型

无线多核阵列的平均网络延时的计算公式为:

$$T_{average} = \frac{\sum_{\forall e_{i,j} \in E} (t_{trans,i,j})}{|E|}$$

其中, $|E|$ 代表消息数目; $t_{trans,i,j}$ 代表任务 i 发送数据到 j 的传输时间, $t_{trans,i,j}$ 的数学表达式为:

$$t_{trans,i,j} = \sum_{k=1}^{hops_{i,j}} \frac{C_{i,j}}{DR} + t_{arb,k} + t_{cont,k}$$

其中, $hops_{i,j}$ 代表数据包经过的路由跳数, $C_{i,j}$ 代表任务 i 与任务 j 之间的数据通信量, DR 是无线发射天线的数据传输率, $t_{arb,k}$ 和 $t_{cont,k}$ 是数据包在无线传输过程中第 k 跳时的仲裁和信道竞争耗时。

2.2 功耗模型

多核系统的功耗表达式为:

$$E_{total} = E_{compute_total} + E_{trans_total}$$

其中, $E_{compute_total}$ 代表无线多核阵列中所有处理单元在处理各个任务时产生的功耗, 其计算公式为:

$$E_{compute_total} = \sum_{k \in T} e_k^{tile}$$

其中, e_k^{tile} 代表处理单元 k 对应的功耗, 与处理单元负载百分比呈递增关系。

E_{trans_total} 代表无线多核阵列中数据传输过程中产生的功耗, 1 比特数据在网络中传输 1 跳需要的功耗为 e_0 , E_{trans_total} 的数学表达式为:

$$E_{trans_total} = \sum_{v_i, v_j} c_{i,j} \cdot hops_{i,j} \cdot e_0$$

2.3 热均衡值评估模型

本文采用资源节点 i 的总功耗 E_i 来表征其温度大小, 其计算公式为:

$$E_i = E_{comp_i} + E_{comm_i}$$

其中, E_{comp_i} 是节点 i 的计算功耗; E_{comm_i} 是节点 i 处理通信数据产生的功耗, 其计算式为:

$$E_{comm_i} = \sum_{i \in K_{j,k}} c_{j,k} \times e_0$$

其中, $K_{j,k}$ 是从任务 j 到任务 k 的路由路径上所有路由节点的集合。热均衡评估值如下式所示:

$$u_t = \text{var}\{sum(s) | s \in S_t(M)\}$$

其中, $S_t(M)$ 由矩阵 M 划分的所有 $t \times t$ 大小的子矩阵 s 组成, 参数 t 表征导热性。 $sum(s)$ 表示子矩阵 s 中所有元素 (即资源节点的功耗) 之和。热均衡评估值用来评估无线多核阵列的热分布的均匀程度, 其值越小表示平台的热分布越均衡。

2.4 问题描述

无线多核阵列的目标是最小化延时、功耗以及热均衡评估值。已知任务图 $G_0 = (V, E)$, 多核阵列资源图 $G = (T, L)$, 求解调度方案 $map(\cdot)$, 使其满足:

$$\begin{cases} \min T_{average}(map(V)) \\ \min E_{total}(map(V)) \\ \min u_t(map(V)) \end{cases}$$

其中, 任务分配原则、负载约束以及带宽约束表示为:

$$\begin{aligned} \forall i, \sum_j x_{i,j} &= 1, v_i \in V, t_j \in T \\ \forall j, \sum_i x_{i,j} \cdot p_i &\leq T_{Max}, v_i \in V, t_j \in T \\ \forall l \in L, \sum_{i,j \in V} c_{i,j} \cdot h_l &\leq Lim_B \end{aligned}$$

其中, $x_{i,j}$ 为 1, 代表任务 v_i 被投影在处理单元 t_j ; p_i 代表任务 v_i 的运算时间; h_l 为 1, 代表链路 l 是多核阵列资源图中任务 v_i 传输数据给 v_j 的路由路径中的某一条。

3 多目标优化算法

根据前文的定义, 求解出使延时、功耗以及热分布均优的任务调度方案的过程是一个多目标优化问题。本文在 NSGA-II 算法的基础上进行改进, 以搜索到更优质的解。

3.1 拥挤策略的改进

NSGA-II 算法可以得到较好的解, 但是会失去多样性, 可能使解陷入局部最优。要提高解的质量, 需要个体的分布性良好, 虽然 NSGA-II 使用拥挤距离来解决分布性估计的问题, 但该机制只能估计个体与筛选前相邻个体的分布关系, 不能反映与筛选后的相邻个体的分布状态, 所以可能造成丢失一些分布性好的个体。

本文采用最远距离法来改进拥挤策略, 以使分布更均匀。最远距离法的主要流程如图 2 所示。

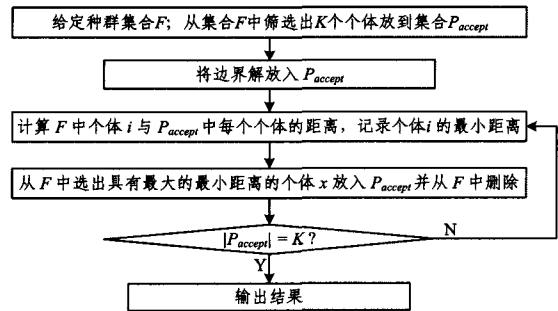


图 2 最远距离法

3.2 初始种群

传统的 NSGA-II 算法是基于一组随机种群展开搜索的, 本文将表调度产生的方案加入随机初始种群中, 这样可以产生包含较优解的初始种群, 对收敛方向有指导作用。本文采

用 HLEFT(Highest Level First with Estimated Times)^[11] 算法来产生表调度初始解。

3.3 适应度函数

适应度函数根据目标函数来评价解决方案的优劣。为了防止在优化某一目标的同时对其他目标的性能损耗过大,对适应度函数进行以下改进,以便设计者控制对延时、功耗和热分布的折中需求。本文的适应度函数由目标函数和惩罚函数组成。

目标函数将各个目标的度量转换到一个水平范围,这样有利于优化算法对各个目标的公平优化。延时、功耗以及热分布的目标函数分别为:

$$f_{time}(map(V)) = \frac{T_{average}(map(V))}{T_{list_time}}$$

$$f_{power}(map(V)) = \frac{E_{total}(map(V))}{E_{list_power}}$$

$$f_{heat}(map(V)) = \frac{u_t(map(V))}{\min(H_{list_time}, H_{list_power})}$$

其中, T_{list_time} 为以最小化延时为目标的表调度方案对应的延时开销; E_{list_power} 为以最小化通信开销为目标的表调度方案的功耗开销; H_{list_time} 和 H_{list_power} 分别为以延时和通信开销为目标的目标函数对应的热均衡评估值。

惩罚函数的功能是当某个解对应的延时、功耗和热分布中的任一目标性能低于容忍度时对该解对应的目标函数进行惩罚,具体定义如下:

$$P(\varphi) = P_{time}(\varphi) + P_{power}(\varphi) + P_{heat}(\varphi)$$

其中,

$$P_{time}(\varphi) = \begin{cases} f_{time}(\varphi), & \text{if } T_{average}(\varphi) > T \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$P_{power}(\varphi) = \begin{cases} f_{power}(\varphi), & \text{if } E_{total}(\varphi) > E \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$P_{heat}(\varphi) = \begin{cases} f_{heat}(\varphi), & \text{if } u_t(\varphi) > H \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

其中, $T = (1+k) \cdot H_{list_time}$, $E = (1+k) \cdot E_{list_power}$ 和 k 根据对功耗和延时的需求进行相应设置。 k 值越小代表对延时和功耗的约束越强。

为了保障热分布均衡的利益,设 $H = \max(H_{list_time}, H_{list_power})$, 将总的惩罚函数添加到各个目标函数形成新的延时($F_{time}(\varphi)$)、功耗($F_{power}(\varphi)$)以及热分布($F_{heat}(\varphi)$)适应度函数,其计算公式为:

$$F_{time}(\varphi) = f_{time}(\varphi) + P(\varphi)$$

$$F_{power}(\varphi) = f_{power}(\varphi) + P(\varphi)$$

$$F_{heat}(\varphi) = f_{heat}(\varphi) + P(\varphi)$$

3.4 算法流程

改进后的 NSGA-II 算法的具体过程如下:

- (1) 利用表调度的解和随机个体生成初始群体 P_0 ;
- (2) 对 P_t (初始时 $t=0$) 采用锦标赛算法选择、交叉以及变异形成新种群 Q_t , 再将 P_t 和 Q_t 合并为 R_t , R_t 的大小为 $2N$;
- (3) 对 R_t 中的个体计算其对应的延时、功耗以及热均衡评估值以求出相应的适应度,做快速非支配排序;
- (4) 计算非支配层的最大保留数目 N_i , 按最远距离法或者直接由该层中筛选 N_i 个体作为下一代种群,迭代步骤(4)直到从 R_t 中筛选出 N 个个体组成第 $t+1$ 代种群 P_{t+1} ;

- (5) 判断是否达到迭代次数,若满足迭代次数则输出解,未达到则继续上述操作。

4 仿真性能评估

为了评估本文算法的性能,采用 2D Mesh 结构的无线多核阵列进行仿真;同时采用由 TGFF^[12] 产生的随机任务图与 39 节点 FFT^[13] 和 52 节点的高斯消除图^[14] 两种实际应用任务图。仿真参数的设置如下:种群大小为 100,迭代次数为 200,代沟为 1,交叉概率为 0.5,变异概率为 0.1,解的个数为 20,处理器最大处理时间为 0.05s,链路最大通信负载为 1Gbits,热传导参数设为 2。

将现有双目标调度算法、本文算法以及随机算法应用于 FFT 任务图,仿真结果如图 3 所示。

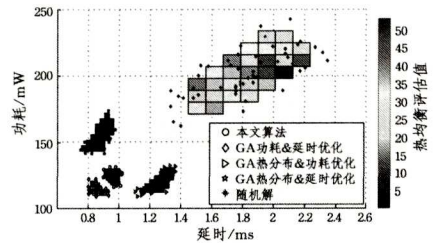
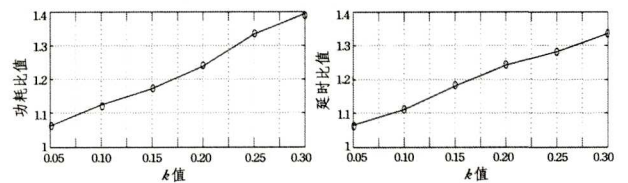


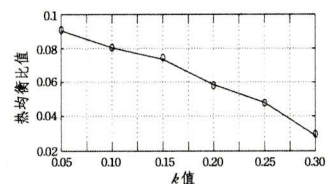
图 3 5×5 平台上本文算法与双目标算法、随机算法的解

图 3 中横坐标为延时,纵坐标为功耗,灰度条代表热均衡评估值,对于三者而言,均是值越小代表性能越好。从图 3 中可以看到,随机映射的解都远不如优化算法求得的解,3 种现有算法只能优化它针对的两个目标,另一个目标的性能较差;而本文算法在延时、功耗和热分布上都能取得良好的性能。

图 4 示出了基于 6×6 的平台在不同约束参数 k 下将本文算法应用于高斯消除任务图的 20 组解决方案对应的延时、功耗、热分布的平均性能。其中各性能比值是本文算法的结果与以延时和功耗为目标的现有算法的结果的比值。



(a) 本文算法与现有算法的功耗比值 (b) 本文算法与现有算法的延时比值



(c) 本文算法与现有算法的热均衡比值

图 4 本文算法在不同 k 值下的仿真结果

从图 4 中可以看到,约束参数 k 越小,延时比值和功耗比值越小,这说明本文算法求得的解相对于现有算法得到的解在延时和功耗上付出的代价更小;同时,约束参数 k 越大,热均衡比值越小,这说明可以通过调整约束参数 k 来灵活地控制延时、功耗和热分布三者的折中需求。后续的仿真基于 $k=0.05$ 进行。

将加权算法、NSGA-II 算法、本文算法应用于 TGFF 生

成的 17,44,71,84,109 个节点的随机任务图中,任务调度结果如图 5 所示。

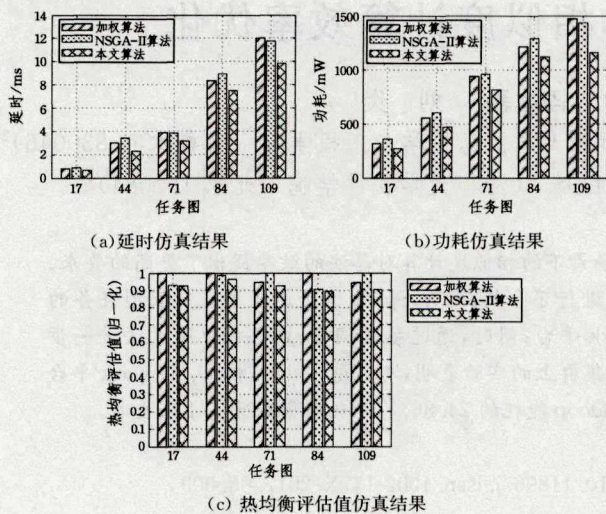


图 5 不同算法针对随机任务图的仿真结果

从图 5(a)可以看出,本文算法的延时总是小于标准 NSGA-II 算法和加权算法的延时,大约是标准 NSGA-II 算法的 78%以及加权算法的 82%,标准 NSGA-II 算法与加权算法在延时性能上相近。图 5(b)为功耗的结果,可以看到,本文算法相比标准 NSGA-II 算法和加权算法的功耗分别降低了 19%和 14%左右。热均衡评估值(归一化)的结果如图 5(c)所示,可以看出本文算法在热均衡方面总体上更优于其他两个算法。综上可得,针对随机任务图,本文算法在功耗和延时上的结果比另外两种算法优良很多,同时在热均衡上也有一定程度的提升。

由 TGFF 产生的随机任务图采用以延时和功耗为目标的现有算法和本文算法生成解,其由 HotSpot^[15] 仿真器生成的温度分布如图 6 所示。

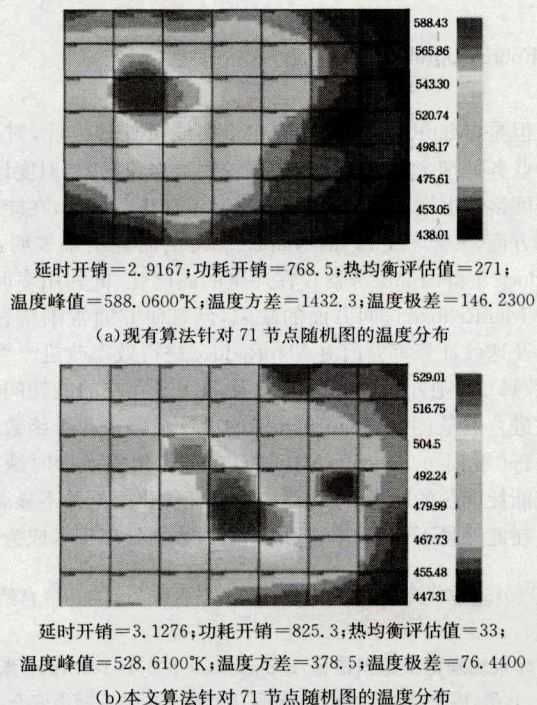


图 6 采用本文算法和现有算法针对随机图的温度分布

从图 6 可以看到,采用本文算法的解对应的延时和功耗相对现有算法提高了 7%左右的消耗,但温度方差得到很大的改善,温度极差降低到 76°左右,温度峰值降低了 11.25%,且减少了在较高温度范围内的资源节点个数,这说明本文算法不仅使得功耗和延时的损耗代价在可接受范围,也使得片上的温度分布更加均衡,达到了减少热点的目的;同时说明可以通过优化热均衡评估值达到优化温度分布的效果,验证了本文的均衡评估值模型的有效性。

结束语 本文针对无线多核阵列的热分布问题,提出一种热均衡评估值模型,为衡量多核阵列的热分布均匀程度提供了依据。在深入研究 NSGA-II 算法的基础上,改进了算法的拥挤策略与初始种群,使新的算法能搜索到更优质的解,并对适应度函数添加惩罚函数,以灵活控制对 3 个目标的折中选择。通过采用随机任务图 and 实际用例任务图进行仿真,证明了本文算法较传统算法的性能更优。

参 考 文 献

- [1] WOLF W, JERRAYA A A, MARTIN G. Multiprocessor system-on-chip (MPSoC) technology [J]. IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, 2008, 27(10): 1701-1713.
- [2] DOU R, HAN J, BO Y, et al. An Efficient Implementation of Montgomery Multiplication on Multicore Platform With Optimized Algorithm, Task Partitioning, and Network Architecture [J]. IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems, 2014, 22(11): 2245-2255.
- [3] LIU J, ZHUGE Q F, GU S Z, et al. Minimizing system cost with efficient task assignment on heterogeneous multicore processors considering time constraint [J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2014, 25(8): 2101-2113.
- [4] MA M Z, JING M E, YU Z Y, et al. Integrated pipelined task scheduling and core mapping for streaming applications on multi-core systems [C] // Proceedings of the 12th IEEE International Conference on Solid-State and Integrated Circuit Technology (ICSICT). Guilin: IEEE, 2014: 1-3.
- [5] KONG F X, YI W, DENG Q X. Energy-efficient scheduling of real-time tasks on cluster-based multicores [C] // Proceedings of Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (DATE). Grenoble: IEEE, 2011: 1-6.
- [6] LIU J, MAO Y, ZHANG J, et al. Delay-optimal computation task scheduling for mobile-edge computing systems [C] // 2016 IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT). Barcelona, 2016: 1451-1455.
- [7] CHEN Y O, HU J H, CHEN G S. Energy and performance-aware mapping for real-time complex system based on NoCplatform [J]. Journal of Application Research of Computers, 2012, 29(7): 2589-2592. (in Chinese)

陈亦欧, 胡剑浩, 陈庚生. 面向实时复杂系统的基于片上网络多核平台的映射技术研究 [J]. 计算机应用研究, 2012, 29(7): 2589-2592.

- [8] CUI Y N, ZHANG W, CHATURVEDI V, et al. Thermal-aware task scheduling for 3D-network-on-chip: A Bottom-to-Top scheme [C] // Proceedings of the 14th International Symposium on Integrated Circuits (ISIC). Singapore: IEEE, 2014: 224-227.

(下转第 70 页)

- [3] WU C, YANG Z, LIU Y. Smartphones based Crowdsourcing for Indoor Localization[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2015, 14(2): 444-457.
- [4] YANG Z, WU C, LIU Y. Locating in fingerprint space; wireless indoor localization with little human intervention[C]// International Conference on Mobile Computing and Networking. ACM, 2012: 269-280.
- [5] WU C, YANG Z, XU Y, et al. Human Mobility Enhances Global Positioning Accuracy for Mobile Phone Localization[J]. IEEE Transactions on Parallel & Distributed Systems, 2015, 26(1): 131-141.
- [6] YANG Z, WU C, ZHOU Z, et al. Mobility Increases Localizability: A Survey on Wireless Indoor Localization using Inertial Sensors[J]. ACM Computing Surveys, 2015, 47(3): 1-34.
- [7] LEU J S, YU M C, TZENG H J. Improving indoor positioning precision by using received signal strength fingerprint and footprint based on weighted ambient Wi-Fi signals[J]. Computer Networks, 2015, 91: 329-340.
- [8] WU C, YANG Z, XIAO C, et al. Static power of mobile devices; Self-updating radio maps for wireless indoor localization[C]// Computer Communications. IEEE, 2015: 2497-2505.
- [9] ZHU J Y, ZHENG A X, XU J, et al. Spatio-temporal (S-T) similarity model for constructing WIFI-based RSSI fingerprinting map for indoor localization[C]// International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation. IEEE, 2014: 678-684.
- [10] CHANG L, CHEN X, WANG J, et al. TaLc: Time Adaptive Indoor Localization with Little Cost [C] // ACM MOBICOM Workshop on Challenged Networks. ACM, 2015: 461-490.
- [11] WANG J, FANG D, CHEN X, et al. LCS: Compressive sensing based device-free localization for multiple targets in sensor networks[J]. Proceedings-IEEE INFOCOM, 2013, 12(11): 145-149.
- [12] NIU J, WANG B, SHU L, et al. ZIL: An Energy-Efficient Indoor Localization System Using ZigBee radio to Detect WiFi Fingerprints[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2015, 33(7): 1431-1442.
- [13] TORRES-SOSPEDRA J, MONTOLIU R, TRILLES S, et al. Comprehensive Analysis of Distance and Similarity Measures for Wi-Fi Fingerprinting Indoor Positioning Systems [J]. Expert Systems with Applications, 2015, 42(23): 9263-9278.
- [14] GAO Y, YANG Q, LI G, et al. XINS: the anatomy of an indoor positioning and navigation architecture[C]// Proceedings of the 1st International Workshop on Mobile Location-based Service. ACM, 2011: 41-50.
- [15] HE S, CHAN S H G. Wi-Fi Fingerprint-based Indoor Positioning: Recent Advances and Comparisons[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2015, 18(1): 466-490.
- [16] LYMBEROPOULOS D, LIU J, YANG X, et al. A realistic evaluation and comparison of indoor location technologies; experiences and lessons learned[C]// The ACM/IEEE Conference on Information Processing in Sensor Networks. 2015: 178-189.
- [17] Microsoft Indoor Localization Competition IPSN2015/2016 [EB/OL]. <http://research.microsoft.com/en-us/events/indoorlocalizationcompetition2015/default.aspx>.
- [18] LUNGA D, PRASAD S, CRAWFORD M M, et al. Manifold-Learning-Based Feature Extraction for Classification of Hyperspectral Data: A Review of Advances in Manifold Learning[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2014, 31(1): 55-66.
- [19] ZHANG Z, WANG J, ZHA H. Adaptive manifold learning[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2012, 34(2): 253-265.
- [20] FLOYD R W. Algorithm 97: Shortest path[J]. Communications of the ACM, 1962, 5(6): 345.
- [21] WU C, YANG Z, LIU Y, et al. WILL: Wireless Indoor Localization without Site Survey[J]. IEEE Transactions on Parallel & Distributed Systems, 2013, 24(4): 839-848.
- [22] HARLE R. A Survey of Indoor Inertial Positioning Systems for Pedestrians[J]. Communications Surveys & Tutorials IEEE, 2013, 15(3): 1281-1293.
- [23] XIAO Y L, ZHANG S G, WANG J X. An indoor localization algorithm based on multidimensional scaling and region refinement[J]. Chinese Journal of Computers, 2016, 39(67): 6-8. (in Chinese)
肖亚龙, 张士庚, 王建新. 一种基于多维标度和区域细化的无线室内定位方法[J]. 计算机学报, 2016, 39(67): 6-8.
- [24] GONZÁLEZ M C, HIDALGO C A, BARABÁSI A L. Understanding individual human mobility patterns[J]. Nature, 2008, 453(7196): 779-782.
- (上接第 45 页)
- [9] CAO S, SALCIZ Z, DING Y T, et al. Temperature-aware task scheduling heuristics on Network-on-Chips[C]// Proceedings of 2016 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS). Montreal: IEEE, 2016: 2603-2606.
- [10] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182-197.
- [11] KAUR R, SINGH G. Genetic algorithm solution for scheduling jobs in multiprocessor environment[C]// Proceedings of 2012 Annual IEEE India Conference (INDICON). Kochi: IEEE, 2012: 968-973.
- [12] DICK R P, RHODES D L, WOLF W. TGFF: Task Graphs for Free[C]// Proceedings of the Sixth International Workshop on Hardware/Software Codesign, 1988. Seattle: IEEE, 1988: 97-101.
- [13] TOPCUOGLU H, HARIRI S, WU M Y. Performance-effective and low-complexity task scheduling for heterogeneous computing[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2002, 13(3): 260-274.
- [14] WU M Y, GAJSKI D D. Hypertool: A programming aid for message-passing systems[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 1990, 1(3): 330-343.
- [15] HUANG W, GHOSH S, VELUSAMY S, et al. HotSpot: a compact thermal modeling methodology for early-stage VLSI design [J]. IEEE Transactions on Very Large Scale Integration Systems, 2006, 14(5): 501-513.