

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*

陈亦欧, 胡剑浩, 陈庚生

(电子科技大学 通信抗干扰国家级重点实验室, 成都 611731)

摘要: 为了提高通信与信号处理系统向片上网络(NoC)平台映射的性能,提出一种面向系统能耗和响应时间的新型NoC映射模型。该模型改进了传统映射算法中能耗的计算方法,同时考虑交换网络的能耗和处理节点的能耗,采用多对多映射技术,在带宽约束的基础上,结合复杂通信系统特有的注入率、迭代边界等约束,同时优化能耗和响应时间,提高了映射算法的实用性。仿真实例证明,该映射模型得到的优化方案能降低约15%的系统能耗,能够获得综合的最优性能。

关键词: 片上网络映射; 数字信号处理; 能耗; 响应时间

中图分类号: TP393 文献标志码: A 文章编号: 1001-3695(2012)07-2589-04

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.07.051

Energy and performance-aware mapping for real-time complex system based on NoC platform

CHEN Yi-ou, HU Jian-hao, CHEN Geng-sheng

(National Key Laboratory of Science & Technology on Communications, University of Electronic Science & Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: This paper proposed a new network on chip (NoC) mapping algorithm which considered system energy consumption and response time to meet the real-time requirements of communication and signal processing system. It proposed an optimized energy model, which contained both energy of interconnection network and energy of processing elements and adopted a multiple-to-multiple mapping scheme. Under the bandwidth constraints and several characteristic constraints of complex communication system, such as iteration bound and injection rate, this model optimized energy consumption and response time simultaneously. The simulation results prove that the proposed mapping algorithm can achieve about 15% energy consumption savings, and has smaller response time than random mapping.

Key words: NoC mapping; digital signal processing; energy consumption; response time

随着未来通信终端和设备的计算复杂度的增大,实时复杂系统芯片的集成规模需求将迅速增长,一块芯片上可能会集成数十个或成百上千的处理单元,基于多核的信号处理平台成为软件无线电的发展趋势。在这样的综合化系统中,设计可靠、高速、低功耗的高性能芯片内通信体系成为片上系统(system on chip, SoC)发展的挑战与机遇。传统多核SoC的总线式通信结构无法满足大规模实时复杂数字信号处理过程中数据交换的需求,因此提出了新一代的片上互连与通信机制——片上网络(network on chip, NoC)。

基于NoC多核平台的设计包含两大核心内容,即基于NoC的平台架构研究和面向NoC多核平台的映射技术研究^[1]。文献[2]中给出了多种基于NoC的架构平台,如Mesh拓扑、Torus拓扑、胖树拓扑与环形拓扑等。面向NoC多核平台的映射是将划分为多个任务的应用映射到NoC平台的多个处理器上的过程。不同的映射结果对于系统的运算速度、实时性及能耗等性能有着重要影响。面向NoC多核平台的映射属

于二次分配问题,二次分配问题已被证明是NP-complete问题,其搜索空间随着网络尺寸的增长呈阶乘递增^[3]。因此,必须寻找一种算法使其在合理的时间内得出最优结果。

本文从实时数字信号处理的角度出发,考虑复杂通信系统在NoC平台上的运行情况。信号处理具有实时性和处理时延要求,NoC映射既要满足实时信号处理的要求,还要满足芯片散热要求,即最小化能耗。实时性与能耗是两个截然不同的物理量,同时考虑这两个目标时,无法用线性加权的方式进行简单组合。本文采用多目标优化遗传算法(NSGA-II)寻找能耗和实时性最优的映射方案^[4,5]。

1 相关研究工作

在NoC映射技术的研究中,能耗和延时一直是大家最关心的问题^[1,3,6-9]。现在大家使用最多的能耗计算方法是Terry等人在文献[10]中建立的网络路由器的能耗模型,即单比特数据通过路由器传输消耗的能耗为路由器内部的开关交换、缓

收稿日期: 2011-09-20; 修回日期: 2011-11-10 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60873076); 博士点新教师基金资助项目(200806141015)

作者简介: 陈亦欧(1982-),女,四川成都人,博士研究生,主要研究方向为片上网络与VLSI设计(chenyiou@uestc.edu.cn); 胡剑浩(1971-),男,教授,博导,主要研究方向为无线通信、数字电路设计、VLSI设计等; 陈庚生(1984-),男,硕士研究生,主要研究方向为片上网络。

存和连线所消耗的能量和。Hu 等人^[9]经过实验仿真发现,由于路由器之间的链路长度在毫米级,因此在路由器传输消耗的能耗中,路由器内部的缓存、连线这两部分能耗与路由器之间链路上的能耗相比是可以忽略的,他们在文献[9]中提出简化的交换网络能耗的计算式。但是这些文献在计算 NoC 的能耗时,都忽略了一个重要的问题,即没有考虑处理节点的能耗,只将交换网络的能耗作为 NoC 的能耗。事实上,与交换网络的能耗相比,处理节点的能耗在整个 NoC 中所占的比例更大,并且随着映射方案的改变,处理节点的运算负荷程度会有所不同,导致其能耗产生线性或非线性(由处理单元的特性决定)的变化。所以处理单元的能耗是 NoC 能耗中非常重要的一部分,不能将其忽略。本文的能耗模型同时考虑了处理节点的能耗和交换网络的能耗,与真实情况更接近,得出的结论更具有可信性。

文献[3,6~8]中介绍了多种基于蚁群或遗传算法的单目标或多目标 NoC 映射算法,在建模过程中,任务与节点之间采用一对一的关系,即每个节点上只能分配一个任务。这种任务划分和分配的方式存在一个问题,即任务采用粗颗粒度划分,不同任务的执行时间可能不均衡,这会影响处理节点的执行效率,另外,流水操作的并发性可能也会由于任务颗粒较大而受到影响。因此,本设计采用细颗粒任务划分方法,任务与节点之间是多对多的对应关系,即每个节点上可以分配多个任务,提高节点的工作效率与流水操作的并发性。

2 NoC 映射过程

面向 NoC 连接的多核平台映射是将实时信号处理系统的任务流图中各项任务按照一定的优化规则分配到基于 NoC 连接的多核平台上,并使目标函数最小化的过程。图 1 给出了数字接收机映射到 NoC 多核平台上的实例。

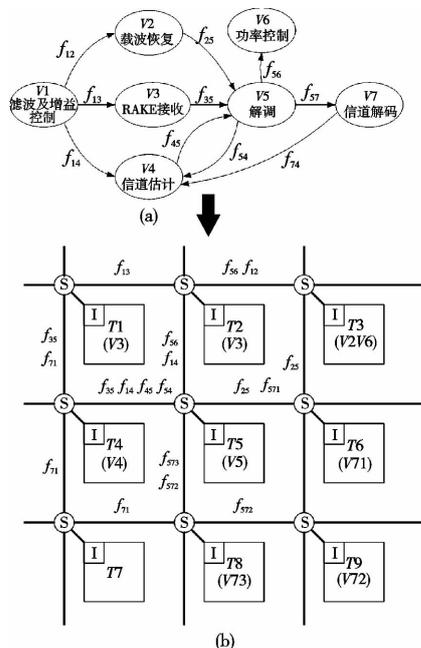


图1 数字接收机的NoC映射实例

2.1 任务流图

定义 1 任务流图(task graph, TG)是由节点 $u_i (\forall u_i \in U, i = 1, 2, \dots, |U|)$ 和有向边 $e_k = e_{i,j} (\forall e_k \in E, k = 1, 2, \dots, |E|)$ 组成的能实时表征实时复杂系统处理过程的赋权图, $G1 = G$

(U, E) , 节点个数为 $|U|$, 直连通路数为 $|E|$ 。每个节点表示一个任务, 每条有向边则表示一条数据通路。节点的权值 $p_i (i = 1, 2, \dots, |U|)$ 表征节点 u_i 的运算时间, 有向边的权值 $f_k = f_{i,j} (k = 1, 2, \dots, |E|)$ 表征节点 i 到节点 j 的数据通路上承载的通信量。图 1(a) 是包含七个任务的数字接收机的任务流图。

2.2 资源流图

定义 2 资源流图(resource graph, RG)是表示片上网络互连信息的有向图, $G2 = G(T, R)$, 它的节点数为 $|T|$, 直连通路数为 $|R|$ 。每个节点 $t_i \in T, i = 1, 2, \dots, |T|$ 表示一个由交换节点和处理节点构成的瓦片, 每条有向边 $r_{i,j} \in R, i, j = 1, 2, \dots, |T|$ 表示瓦片 t_i 到瓦片 t_j 的单向链路。图 1(b) 是 3×3 Mesh 资源流图。

2.3 NoC 映射

传统的 NoC 映射中, 任务与节点是一一对应的关系, 每个处理节点上只能分配一个任务^[1,3]。对于复杂的基于流水结构的通信与信号处理系统来说, 这样的映射方式是不恰当的。

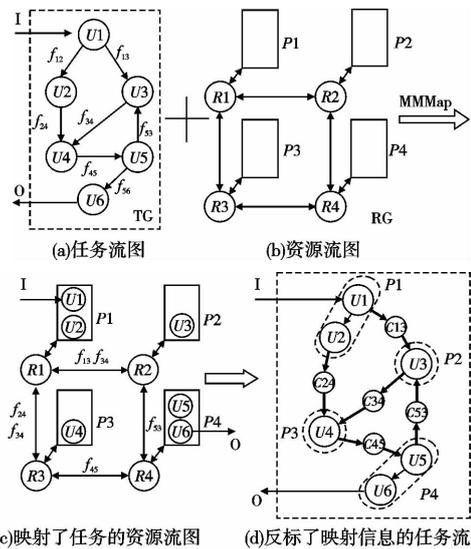
为了降低功耗, 提高运行速度, 通信与信号处理系统大多采用流水结构, 各级运算模块并行执行操作。如果任务划分的颗粒太大, 流水结构的并行处理优势不明显。

如果任务颗粒度较大, 则不同处理节点的任务执行时间不均匀, 影响处理节点的执行效率。

为了避免上述问题, 本设计采用细颗粒度的任务划分, 任务与处理节点之间的映射是多对多的关系, 即一个处理节点上能够映射多个任务, 最大限度发挥系统性能。

定义 3 虚拟节点集 $C_v = \{c_{i,j} | i, j = 1, 2, \dots, M, i \neq j, a_{i,j} \in A(DG)\}$ 表示任务 v_i 和 v_j 由于映射到不同处理单元上而引入了附加通信延时, $t(c_{i,j})$ 表示 $c_{i,j}$ 的延时值, 由 NoC 相关参数及映射决定。之所以称之为虚拟节点是由于 $c_{i,j}$ 只存在延时值的意义, 而不是添加了真正的运算或路由交换节点。

这里以一个 6 节点的任务流图和 2×2 Mesh NoC 为例, 映射的过程如图 2 所示。图 2(a) (b) 分别是任务流图和资源流图, 将它们作为输入, 应用多对多映射得到的一种映射方案如图 2(c) 所示, 为了评估该映射的性能, 将映射的信息通过虚拟节点的方式反标到任务流图中, 得到图 2(d)。映射到同一个处理单元的任务之间的有向边不变化, 而映射到不同处理节点的任务之间加入虚拟节点, 描述由于路由交换增加的延时。



(a)任务流图 (b)资源流图 (c)映射了任务的资源流图 (d)反标了映射信息的任务流图

①-任务节点 ②-虚拟节点 →-处理单元间通信
→-处理单元内通信 ○-处于同一处理单元的区域

图2 NoC映射过程实例

3 问题描述与数学模型

3.1 能耗

NoC 的能耗 (E_{total}) 由处理器的能耗 (E_{PE}) 和交换网络的能耗 (E_{Net}) 共同构成。 E_{PE} 是所有处理节点的能耗之和,即 $E_{PE} = \sum_{k \in T} E_k$, 其中 $E_k (k = 1, 2, \dots, |T|)$ 为处理节点 k 的能耗。不同类型的处理节点的能耗不相同,并且处理节点的负载程度也影响能耗的大小。用 R_k 表示处理节点 k 的负载百分比,对不同类型的处理节点,可以分别用线性函数或非线性函数分别来表示负载程度和能耗的关系,即 $E_k = f(R_k)$ 。

线性函数是指处理节点的负载增加量与能耗增加量呈线性比例关系。

非线性函数是指能耗的变化量与处理节点负载的变化量不是呈线性比例关系,可能是 k 次函数关系。

根据 Terry 在文献[10]中提出的方法来计算 E_{Net} , 处理节点 i 与 j 之间传输 1 bit 数据所需能耗为

$$E_{bit_{i,j}} = n_{i,j} E_{S_{bit}} + (n_{i,j} - 1) E_{L_{bit}} \quad (1)$$

其中: $E_{S_{bit}}$ 和 $E_{L_{bit}}$ 分别表示 1 bit 数据在交换节点和链路的能耗, $n_{i,j}$ 表示节点 i 到节点 j 的最短路径的跳数(曼哈顿距离)。

3.2 响应时间

定义 4 响应时间(D_R) 为系统从输入到输出的最长链路延时,其数学表达式为

$$D_R = \max_{l_k \in L} \{ \sum_{u_i \in U_k} p_i + \sum_{u_i, u_j \in U_k} t(c_{i,j}) \} \quad (2)$$

集合 $L = \{l_k | k = 1, 2, \dots, |L|\}$ 包含任务流图中从输入节点到输出节点之间所有链路, $l_k = V_k \cup E_k$ 代表一条从输入节点到输出节点的链路; V_k 是 l_k 上的任务节点集, E_k 是 l_k 上的直连边集, $|L|$ 为链路总数, p_i 为任务 i 的处理时间。

3.3 最优化映射的目标函数

芯片能耗大,会带来芯片过热、工作不稳定以及供电问题,因此,低能耗设计是芯片设计中需要着重考虑的问题。另外,信号处理系统要求处理具有实时性,即输入数据后输出能够快速响应,因此用响应时间来描述系统的实时性。综上所述,本设计进行最优化映射的目标为能耗和响应时间同时最小:

$$\begin{cases} \min_{u_i} \{ \sum_{u_i} f(R_i) + \sum_{u_i, u_j} f_{i,j} \cdot E_{bit_{i,j}} \} \\ \min_{l_k \in L} \{ \max_{u_i \in U_k} \{ \sum_{u_i \in U_k} p_i + \sum_{u_i, u_j \in U_k} t(c_{i,j}) \} \} \end{cases} \quad (3)$$

3.4 最优化映射的约束条件

将实时复杂系统向 NoC 平台上映射时,既考虑可实现性方面的约束,如任务分配、注入率、带宽等,又考虑通信与信号处理系统所特有的约束,如迭代周期。

任务映射约束是指一个任务都只能映射到一个处理器上,而不会映射到多个处理器上。

用映射矩阵 $X_{N \times M}$ 描述任务流图向 NoC 映射的关系, $N = |U|, M = |T|$, 元素 $x_{n,m} (\forall x_{n,m} \in X, n = 1, 2, \dots, N; m = 1, 2, \dots, M)$ 表示任务 n 是否映射到处理节点 m 上,约束表达式为

$$\forall i, \sum_j X_{i,j} = 1, u_i \in U, t_j \in T \quad (4)$$

系统注入率约束是为了保证系统中所有处理节点都能及时处理完所需处理的数据,注入率满足

$$\forall j, \sum_i X_{i,j} \cdot p_i \leq \frac{1}{AR}, u_i \in U, t_j \in T \quad (5)$$

通信带宽约束是为了使数据在链路上有序传递,带宽满足

$$\forall r, \sum_{i,j \in U} \sum_{m,n \in T} b_{i,j} h_r^{m,n} \leq B \quad (6)$$

其中: $b_{i,j}$ 和 $h_r^{m,n}$ 是任务流图中的参数; $b_{i,j}$ 为节点 i 到节点 j 所需的最小带宽; $h_r^{m,n}$ 表示链路 r 是否在从节点 i 到节点 j 的路由路径上。

迭代边界约束是指通信与信号系统中通常包含反馈环路,根据文献[11],环路的迭代边界为

$$T_{\infty} = \max_{c \in C} \left\{ \frac{t_p}{w_p} \right\} \quad (7)$$

集合 $P = \{p_l | l = 1, 2, \dots, |P|\}$ 包含任务流图中所有环路, $p_l = p_{i,i}$ 代表一个从节点 i 回到节点 i 的环路, $|P|$ 为环路总数。 t_p 是环路 p 的运算时间, w_p 是环路 p 的延时数目。

为了保证 DSP 算法中各个任务能够有序、顺利地进行,迭代边界必须小于或等于数据注入率的倒数,即

$$T_{\infty} \leq \frac{1}{AR} \quad (8)$$

4 基于多目标进化算法的 NoC 映射方法

由前面分析可知,对目标空间进行遍历求解是不可行的。考虑到能耗和响应时间存在相互影响和制约的关系,选用多目标优化遗传算法(NSGA-II)^[4,5] 来求解实时复杂系统向 NoC 多核平台映射的最优方案。映射算法的流程如图 3 所示。

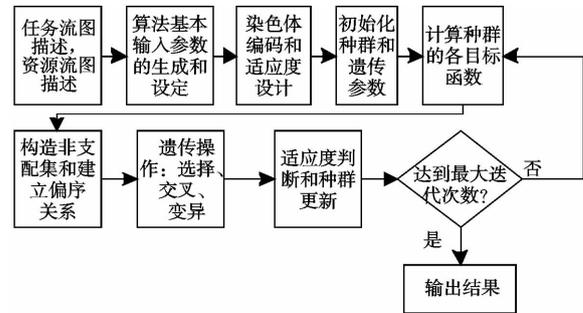


图3 映射算法的流程

构造非支配集和建立偏序关系在每次迭代过程中作用于种群,划分个体的层次,根据个体所处的层次及其聚集距离定义偏序关系。遗传操作过程中,选择根据偏序关系选出优良父代,保证遗传的良性发展;交叉用于得到组合了不同父代特性的子代,保证繁殖不会停滞在一个局部特性中;变异则以一定概率改变某个个体,与交叉的作用相似,但只是辅助保持新个体的产生。

5 实例研究与性能分析

本文对软件无线电的典型应用:MIMO-OFDM 接收系统进行建模和仿真,验证映射算法的性能。 4×4 的 MIMO-OFDM 接收端系统结构如图 4 所示。

将各功能模块作为一个独立的子任务,该通信系统共由 109 个子任务构成,包括同步、OFDM 解调、信道估计、求伪逆、排序、计算迫零解、干扰消除、校验节点更新和比特节点更新等,对各子任务从 1 ~ 109 进行编号,得到如图 5 所示的任务流图。

假设处理节点的工作频率为 1 GHz,由算法的乘加运算量估计出各任务的运算时间与任务间的数据流量,如表 1、2 所示。

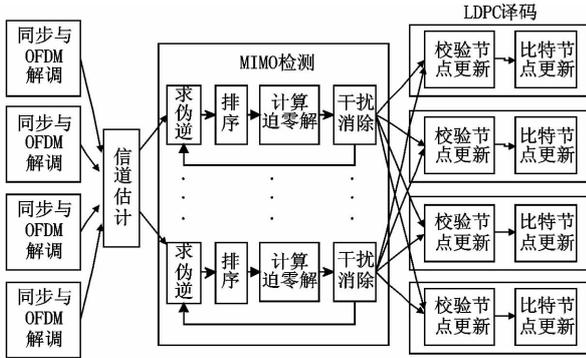


图4 MIMO-OFDM接收端系统框图

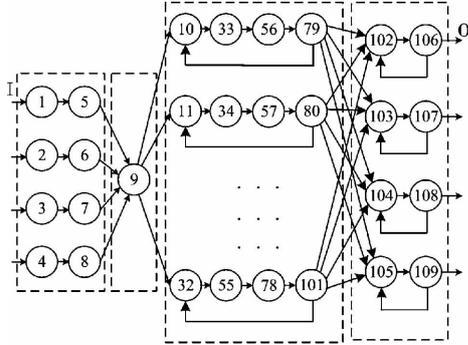


图5 MIMO-OFDM接收端系统的任务流图

表1 各任务的运算时间

任务类型	任务编号	任务名称	运算时间
A	1~4	同步	0.010 800 34
B	5~8	OFDM 解调	0.009 420 88
C	9	信道估计	0.042 746 88
D	10~32	求伪逆	0.001 400 26
E	33~55	排序	0.000 063 65
F	56~78	计算迫零解	0.000 056 58
G	79~101	干扰消除	0.000 042 43
H	102~105	校验节点更新	0.001 132 56
I	106~109	比特节点更新	0.000 153 82

表2 任务之间的数据流量

链路类型	数据流量/bit	链路类型	数据流量/bit
A→B	6 029 312	F→G	1 689 600
B→C	3 253 120	G→D	1 689 600
C→D	1 689 600	G→H	84 480
D→E	1 689 600	H→I	84 480
E→F	1 689 600	I→H	84 480

下面以 Mesh 拓扑为例,分别对 $5 \times 5 \sim 7 \times 7$ 这三种规模的 NoC 进行建模与仿真,分析映射算法的收敛性以及解的性能。NSGA-II 算法利用英国谢菲尔德 (Sheffield) 大学开发的遗传算法工具箱 GATBX 和 M 语言编程实现。仿真参数设置如下:数据到达率 $AR = 20$,平均排队时间 $T_0 = 10^{-5} s$,遗传算法的种群大小 $nind = 1000$,代沟 $gap = 0.9$,交叉概率 $pc = 0.5$,变异概率 $pm = 0.1$,迭代次数为 10 万次。

5.1 映射算法的收敛性

在计算能耗时,考虑到处理节点的不同类型,分别采用线性函数和非线性函数两种模型。随着迭代次数的增加,本文提出的映射算法的解的能耗与响应时间的收敛曲线如图 6 所示。

从图 6 可以看出,在两种能耗模型下,本文提出的映射算法的解的能耗和响应时间都能得到快速收敛,并稳定在最优值,因此本文提出的映射算法具有良好的收敛性。

5.2 性能评估

单独对能耗或响应时间进行优化求解,另外运行随机映射

算法求得多组随机可行解,将这些解与本文的映射算法的解放在目标空间里,比较其能耗和响应时间指标,如图 7 所示。

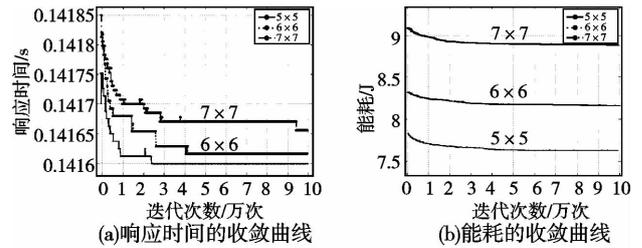
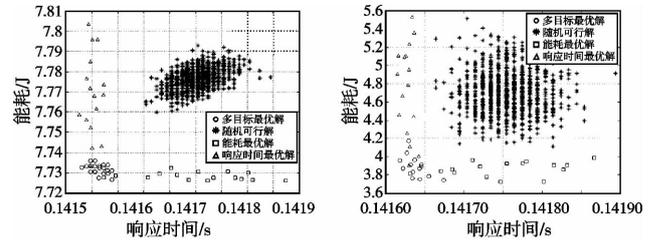
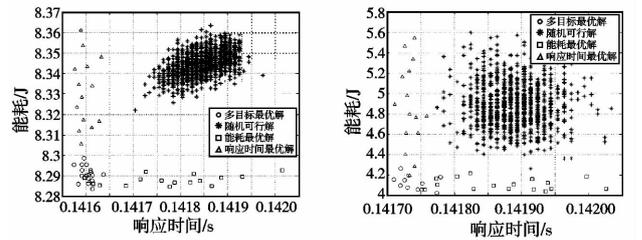


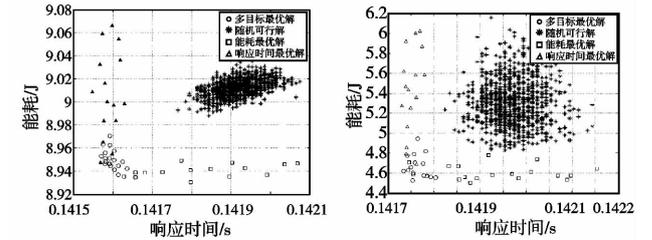
图6 映射算法能耗和响应时间的收敛曲线



(a) 5×5 Mesh 拓扑下线性能耗模型的解分布 (b) 5×5 Mesh 拓扑下非线性能耗模型的解分布



(c) 6×6 Mesh 拓扑下线性能耗模型的解分布 (d) 6×6 Mesh 拓扑下非线性能耗模型的解分布



(e) 7×7 Mesh 拓扑下线性能耗模型的解分布 (f) 7×7 Mesh 拓扑下非线性能耗模型的解分布

图7 多目标最优解与能耗最优解、响应时间最优解、随机可行解在目标空间上的分布

从图 7 可以看出,在各种规模的 NoC 上,采用本文提出的映射算法得到的解的能耗和响应时间都比采用随机映射算法得到的解的能耗和响应时间小,这两种解之间有较大的距离。在线性能耗条件下,本文提出的映射算法的解和随机映射算法的解空间中心的距离分别为 0.05、0.05、0.06;在非线性能耗下,解空间中心的距离分别为 0.8、0.8、0.6。由于实际应用中的处理核(如 DSP、FPGA、CPU 等)的能耗大多与负载程度呈非线性关系,因此应用本文提出的映射算法的解会明显优于随机映射算法的解。

图 7 也给出了单独优化能耗或响应时间得到的解,显然,有少量单独优化能耗得到的解的能耗比本文采用的映射算法得到的能耗略小,但其响应时间性能很差,因此不可行。除此之外,大部分单独优化能耗得到的解的能耗和本文采用的映射算法得到的解的能耗相当。相应地,单独对响应时间进行优化也得到类似的结果。上述现象说明本文提出的映射算法同时兼顾了能耗和响应时间两个目标,具有良好性能。

为了进一步定量评估映射算法的性能,将图 7 中各种映射算法的解的能耗和响应时间的平均值绘制成 (下转第 2628 页)

(上接第 2592 页)直方图,如图 8 所示。

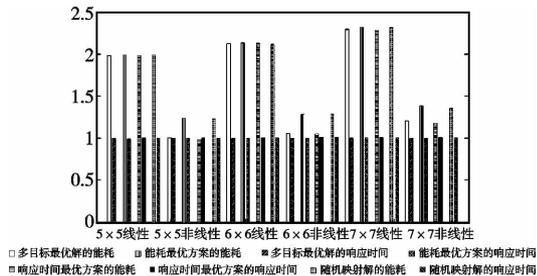


图8 仿真结果对比

从图 8 可以看出,在线性能耗模型下,本文提出的映射算法的解的能耗与响应时间和其他映射算法的能耗与响应时间差距不大,略有优势。在非线性能耗模型下,本文提出的映射算法的解的能耗有明显优势。与单独优化响应时间的映射算法及随机映射算法相比,本文提出的映射算法的解的能耗分别降低了约 16% 和 14%,在响应时间上也能获得优异性能。

6 结束语

本文针对复杂通信系统在多核平台的应用,提出一种面向系统能耗和响应时间的新型 NoC 映射模型。该模型改进了能耗的计算方法,结合通信与信号系统特有的注入率、迭代边界等约束,同时对能耗和响应时间进行优化。对 MIMO-OFDM 接收端系统进行建模与仿真,实验结果表明,与随机映射和单目标映射相比,本文提出的映射算法能在能耗和响应时间上同时取得良好的性能。

参考文献:

[1] 杨盛光,李丽,高明伦,等. 面向能耗和延时的 NoC 映射方法[J].

电子学报,2008,36(5): 937-942.

- [2] TOBIAS B, SHANKAR M. A survey of research and practices of network-on-chip[J]. *ACM Computing Surveys*,2006,38(1):1-51.
- [3] 周千民,尹勇生,胡永华,等. 基于蚁群优化算法的 NoC 映射[J]. *计算机工程与应用*,2005,41(18): 7-10.
- [4] 郑金华. 多目标进化算法及其应用[M]. 北京:科学出版社. 2007.
- [5] DEB K, AGRAWAL S, PRATAP A, *et al.* A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization: NSGA-II[J]. *IEEE Trans on Evolutionary Computation*,2002,6(2): 182-197.
- [6] ZHOU Wen-biao, ZHANG Yan, MAO Zhi-gang. Pareto based multi-objective mapping IP cores onto NoC architectures[C]//Proc of IEEE Asia Pacific Conference on Circuits and Systems. 2006: 331-334.
- [7] GIUSEPPE A, VINCENZO C, MAURIZIO P. Multi-objective mapping for mesh-based NoC architectures [C]//Proc of International Conference on Hardware/Software Codesign and System Synthesis. 2004: 182-187.
- [8] TANG Lei, SHASHI K. A tow-step genetic algorithm for mapping task graphs to a network on chip architecture [C]//Proc of Euromicro Symposium on Digital System Design. 2003:180-187.
- [9] HU Jing-cai, MARCULESCU R. Energy-and performance-aware mapping for regular NoC architectures[J]. *IEEE Trans on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*,2005,24(4): 551-562.
- [10] TERRY T Y, LUCA B, GIOVANNI D M. Analysis of power consumption on switch fabrics in network routers[C]//Proc of the 39th Annual Design Automation Conference. New York: ACM Press, 2002: 524-529.
- [11] PARHI K K. VLSI digital signal processing systems, design and implementation[M]. Hoboken: Wiley, 1999.