

片上网络的星型簇结构通信能耗研究*

刘琪, 李东生

(解放军电子工程学院, 合肥 230037)

摘要: 相对于传统的平面结构, 三维片上网络具有更好的集成度和性能。提出一种基于三维网格的星型簇结构的片上网络(3D SCBM-NoC), 3D SCBM-NoC可以减少路由节点, 降低处理节点间的通信代价。通过分析3D SCBM-NoC的拓扑结构, 建立了针对星型簇结构的片上网络通信能耗模型, 分别使用顺序方法和蚁群算法实现了片上网络映射。实验结果表明, 相对于处理节点规模相同且数目为16的3D Mesh-NoC和2D Mesh-NoC, 3D SCBM-NoC的通信能耗明显降低。

关键词: 片上网络; 星型簇; 通信能耗; 映射; 蚁群算法

中图分类号: TN47 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2012)06-2176-04

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.06.046

Communication energy-aware research of star cluster NoC

LIU Qi, LI Dong-sheng

(Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China)

Abstract: Comparing with the traditional planar structure, 3D NoC are capable of achieving better performance and packaging density. This paper advanced a new style of NoC structure called star cluster NoC based on three dimensions Mesh(3D SCBM-NoC), which could reduce the number of router nodes, and saved the cost of communication. By analyzing the topology of the 3D SCBM-NoC, this paper presented the communication energy model of star-cluster structure, and achieved the mapping of NoC using the sequence method and ant arithmetic. When the number of processor nodes is 16, comparing with 3D Mesh-NoC and 2D Mesh-NoC, the communication energy of 3D SCBM-NoC is the lowest.

Key words: NoC; star cluster; communication energy; mapping; ant colony algorithm

0 引言

片上网络(network-on-chip, NoC)将计算机网络的技术引入到芯片设计中, 从体系结构上彻底解决了原有总线连接方式所面临的信号时延以及系统信号同步等问题。NoC经过几年的发展, 已经具有了多种架构方案。目前比较普遍的NoC结构有2D Mesh(图1)、2D Torus等。

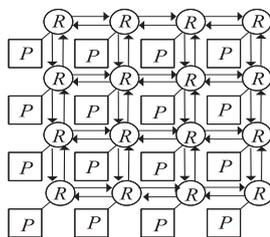


图1 2D Mesh-NoC

二维网格状规则的NoC体系结构以其简单的结构、良好的扩展性、可控的电气参数、较低的连接功耗、允许在SoC设计中对体系结构层和物理层进行集成、易于设计各种算法等优点而成为NoC体系结构研究的一个主要方向。文献[1]提出了一种星型子网结构的新型片上网络, 它在已有网格结构的基础上引入了子网的概念, 并进行了相关研究。

三维网格状结构NoC的研究逐渐开始, 相对于传统的平

面结构, 三维片上网络(3D NoC)具有优越的性能和封装度, 而且允许在单芯片上集成大量的处理器核。三维片上网络有大幅度提升性能和降低能耗的潜力^[2]。

本文提出一种新型的三维片上网络结构——基于网格的星型簇结构SCBM(star-cluster-based-mesh)。该种结构在三维网格结构NoC的基础上引入了簇的概念, 并在各个簇内部引用星型拓扑结构, 所有的星型簇仍然呈规则的网格状结构排列。星型簇内部的节点之间、簇内部节点与其他簇节点之间都使用路由节点进行通信。

1 3D SCBM-NoC 描述

1.1 3D-Mesh NoC

一个 n 维网格(mesh)定义为这样的一个互连结构: 它具有 $K_0 \times K_1 \times K_2 \times K_3 \times \dots \times K_{n-1}$ 个节点, 其中 n 为网络的维数, K_i 为 i 维的基。位于 (i, j, k) 的一个节点将与在维 $(i \pm 1, j \pm 1, k \pm 1)$ 的邻居节点相连接。带有环绕连接的网格结构将形成一个环绕(torus)网络。

定义一个3D Mesh-NoC如图2所示, 节点圆圈 R (router)表示一个路由节点, 路由节点下放置一个处理节点 P (processor), 这是一个 $2 \times 2 \times 5$ 网格。

收稿日期: 2011-11-08; 修回日期: 2011-12-12 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61179036)

作者简介: 刘琪(1986-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为片上网络低功耗研究(liuqi1986106@163.com); 李东生(1963-), 男, 博导, 主要研究方向为多核芯片设计与高速信号处理。

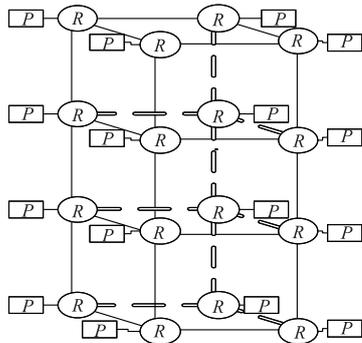


图2 3D Mesh-NoC

1.2 3D SCBM-NoC

在 3D Mesh-NoC 的基础上引入了簇的思想,即在每个路由节点下分别建立对应簇结构的多个处理单元,簇内部处理节点之间的连接采用星型拓扑结构,簇之间的连接仍然是规则的网格状,如图 3(a)所示。

所谓簇就是网络节点的一种分组管理方式,簇结构的形式决定着网络运行效率。这里将 NoC 分成二级簇管理,如图 3 所示。一个 NoC 分成若干个簇(cluster),每个簇内包含几个具有本地连接关系的处理单元,或本身就是最小的内核层处理单元,星型簇内部的结构如图 3(b)所示。

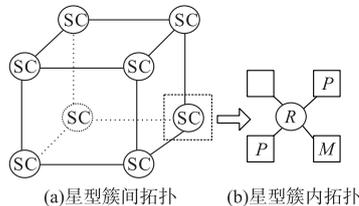


图3 3D SCBM-NoC

2 通信能耗理论分析

2.1 曼哈顿距离

若用跳数(hop)来度量 2D Mesh 网络中两节点间的距离,在最短路径为限制的条件下,虽然最短路径可能不只一条,但两节点的距离是唯一的,该距离也称为曼哈顿距离(Manhattan distance)。2D Mesh 的曼哈顿距离定义如下:节点 $m(x_m, y_m)$ 到节点 $n(x_n, y_n)$ 的曼哈顿距离 $Md_{mn} = |x_m - x_n| + |y_m - y_n|$ 。

3D Mesh 的曼哈顿距离定义如下:节点 $m(x_m, y_m, z_m)$ 到节点 $n(x_n, y_n, z_n)$ 的曼哈顿距离为

$$Md_{mn} = |x_m - x_n| + |y_m - y_n| + |z_m - z_n| \quad (1)$$

2.2 能耗模型

整个 NoC 系统在运行过程中消耗的能量由运算处理过程中在 IP 核中消耗的能量和数据传输中消耗在通信路径上的能量两部分构成^[3]。

消耗在通信路径上的能量可以分解为片上路由节点的能耗和链路上的能耗两个部分。对于 1 bit 数据的传输而言,它对应的路由器能量消耗表示为

$$E_{R_{bit}} = E_{S_{bit}} + E_{B_{bit}} + E_{W_{bit}}$$

其含义是路由器转发 1 bit 数据消耗的能量等于转发这个数据时消耗在交叉开关上的能量 $E_{S_{bit}}$ 、消耗在缓存上的能量 $E_{B_{bit}}$ 与消耗在内部互连线上的能量 $E_{W_{bit}}$ 之和。若将 1 bit 数据跨越连

接两个邻接格元的链路时消耗的能量定义为 $E_{L_{bit}}$,单比特数据在网络上传输一个基本长度的能耗可以表示为

$$E_{bit} = E_{S_{bit}} + E_{B_{bit}} + E_{W_{bit}} + E_{L_{bit}}$$

由于格元间链路的长度远大于路由器内的连接线长度,因此有 $E_{W_{bit}} \ll E_{L_{bit}}$ 。而实际中的 $E_{B_{bit}}$ 值也非常小, $E_{W_{bit}}$ 和 $E_{B_{bit}}$ 可以忽略不计,所以可将上述模型表达式修改为

$$E_{bit} = E_{S_{bit}} + E_{L_{bit}}$$

于是,1 bit 数据从节点 $m(x_m, y_m, z_m)$ 到节点 $n(x_n, y_n, z_n)$ 所消耗的能量计算式为

$$E_{bit}^{P_{mn}} = (P_{mn} + 1) \times E_{S_{bit}} + P_{mn} \times E_{L_{bit}}$$

片上网络在使用最短路径路由的条件下, P_{mn} 的值就是 m 和 n 两节点间的曼哈顿距离 Md_{mn} 。可以得出消耗能量的公式为

$$E_{bit}^{P_{mn}} = (Md_{mn} + 1) \times E_{S_{bit}} + Md_{mn} \times E_{L_{bit}} \quad (2)$$

式(2)是一个线性方程, $E_{S_{bit}}$ 和 $E_{L_{bit}}$ 是常系数,因此能耗与 Md_{mn} 成正比,两节点之间的加权曼哈顿距离成为了主要的通信能耗指标。

3 映射问题

NoC 映射属于二次分配问题,1994 年 Maniezzo 等人首次应用蚁群算法解决二次分配问题^[5],之后很多研究人员都在此基础上提出了改进算法,文献[6]对此进行了较详细的介绍。常见的算法如 ANTS、MMAS、FANT 和 HAS。文献[7,8]对面向能耗的二维网格 NoC 映射方法作了详细的分析,本文采用两种映射方案,方案 1 以顺序方式映射,方案 2 采用蚁群算法映射。

功耗优化问题就是在给定 IP 核任务通信图和 NoC 拓扑结构的基础上,如何将每个 IP 映射到 NoC 资源节点上,分配通信路径,使整个 NoC 通信功耗最小。为了描述该映射问题,给出如下定义:

定义 1 核任务通信图 $CCG(C, E)$ 是有向非循环加权图。每个顶点 $c_i \in C$ 表示一个要分配的 IP 核,每条边 $e_{ij} \in E$ 表示核 c_i 和 c_j 之间通信的数据流向,其权重 w_{ij} 表示核通信的数据量大小,单位为 bit。

定义 2 NoC 结构特征图 $NAG(R, P)$ 中每个顶点 $r_i \in R$ 表示 NoC 中一个可分配的资源节点,每条边 $p_{ij} \in P$ 表示 NoC 中从资源节点 r_i 到资源节点 r_j 的路径,其权重 $e(r_i, r_j)$ 表示从资源节点 r_i 传输 1 bit 数据到资源节点 r_j 所消耗的能量,也就是 $E_{bit}^{S_i, S_j}$ 。

基于上述两个定义,功耗优化的 NoC 映射问题可以表述为在一种确定性无死锁的最小路径路由算法下找到一个映射函数 $map()$,满足

$$\min \left\{ \sum_{\forall c_i, c_j \in C} w_{ij} \times e(\text{map}(c_i), \text{map}(c_j)) \right\}$$

约束条件为

$$\forall c_i \in C, \text{map}(c_i) \in R$$

$$\forall c_i \neq c_j \in C, \text{map}(c_i) \neq \text{map}(c_j)$$

$$\text{size}(CCG) < \text{size}(NAG)$$

3.1 顺序映射方案

顺序映射根据应用特征图的顺序,将任务一一映射到 3D

SCBM-NoC 的处理节点上。

3.2 蚁群映射算法的实现

蚁群映射算法使用蚁群算法实现了面向 NoC 平台的映射。映射算法主要包括了初始化、相关参数定义、构造解决方案、信息素更新、评价方案等步骤。下面给出映射算法的流程图,如图 4 所示,图中为了说明方便,定义局部最优方案能耗为 A,全局最优方案能耗为 B。

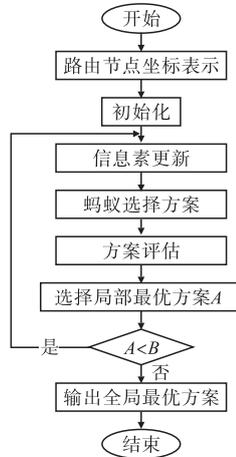


图4 蚁群映射算法流程

4 仿真实验及分析

实验所用的应用特征图 1^[9]由 TGFF(task graphs for free) 3.0 软件包生成,如图 5 所示。图中圆圈和箭头也同样代表处理单元和通信任务,箭头上的数分别对应各个任务的通信量。表 1 列出了应用特征图 1 的属性。

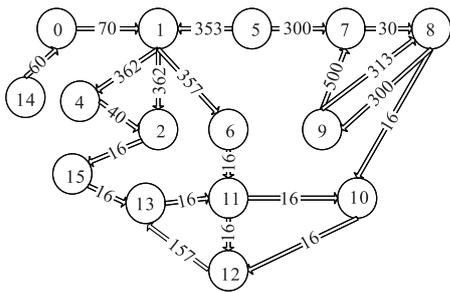


图5 应用特征图1

表 1 应用特征图属性

应用特征图	资源个数	任务有向弧	通信量
TGFF 随机图	16	21	3 602

实验所用的应用特征图 2 由 TGFF 3.0 软件包生成,修改软件包例子程序的 simple.tgffopt 源文件,设置其参数如表 2 所示,得到的应用特征图如图 6 所示。

表 2 TGFF 软件包设置

tg_cnt	task_cnt	task_degree	out_picture
4	16/1	2/3	veg

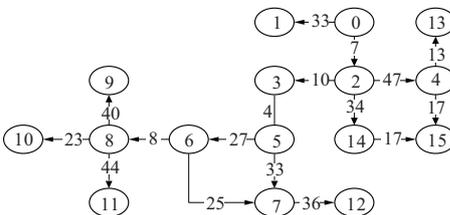


图6 应用特征图2

图中圆圈和箭头也同样代表处理单元和通信任务,箭头上的数字分别对应各个任务的通信量。表 3 列出了应用特征图 2 的属性。

表 3 应用特征图属性

应用特征图	资源个数	任务有向弧	通信量
TGFF 随机图	16	17	418

实验所用的应用特征图 3^[9]采用对实时性有较高要求的 MPEG-4 解码器与视频对象平面解码 (VOPD) 应用实例,应用特征图如图 7 所示,图中圆圈和箭头也同样代表处理单元和通信任务,箭头上的数依次对应各个任务的通信量。表 4 列出了应用特征图 1 的属性。

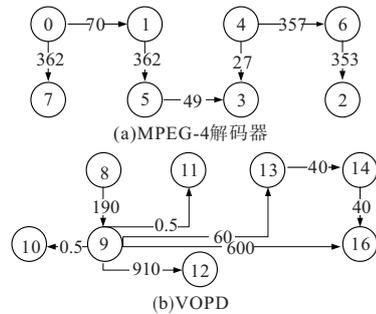


图7 应用特征图3

表 4 应用特征图属性

特征图	资源个数	任务有向弧	通信量
MPEG-4	8	7	1 254
VOPD	8	8	1 841

图 1 ~ 3 分别为 4 × 4 2D Mesh-NoC、2 × 2 × 4 3D Mesh-NoC、2 × 2 × 2 3D SCBM-NoC,三种片上网络结构具有相等的处理器规模。将上述的两种应用特征图分别映射到这三种 NoC 结构,仿真得到相应的通信能耗。为了清晰地描述映射问题,假设任务和 IP 核一一对应,即每个任务只能由一个核完成,而每个核只完成一个任务。

4.1 顺序映射的比较

根据第 3 章的分析,能耗可以定义为

$$E(C) = \sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^N w_{m,n} \times Md_{mn} \quad (3)$$

其中: $w_{m,n}$ 为节点 m 和 n 之间的通信量; N 为节点数。两节点之间的加权曼哈顿距离成为了主要的通信能耗指标。

本文计算以顺序方式映射的通信能耗,即把 16 个任务图按照顺序一一映射到处理器数目为 16 的等规模 3D SCBM-NoC、2D Mesh-NoC、3D Mesh-NoC 上;然后通过统计路由节点的通信距离以及各任务的通信量,利用式 (3) 计算得到需要的通信能耗。计算结果如图 8 所示。

由图中结果可以证明,3D SCBM-NoC 的通信能耗低于其他的两种结构。

4.2 蚁群映射的比较

蚁群算法可以解决 NoC 的映射问题。蚁群映射算法程序源代码用 C++ 编写,为验证本算法的性能,本文在 Dev-C++ 5 环境下实现本算法,并在 Intel Core 2.2 GHz CPU、2 GB 内存、Windows XP 平台上开展了实验,仿真结果如图 9 所示。仿真结果证实,3D SCBM NoC 的通信能耗低于其他两种结构。

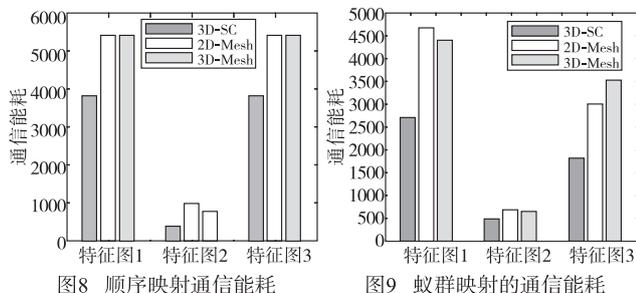


图8 顺序映射通信能耗

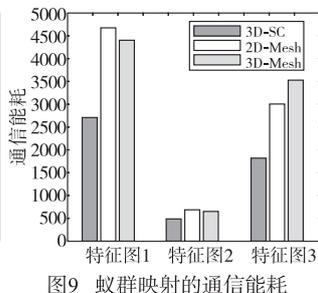


图9 蚁群映射的通信能耗

本文给出了应用特征图2采用蚁群算法映射到 $2 \times 2 \times 2$ 3D SCBM-NoC的映射结果,如图10所示。蚁群算法保证将通信任务重的IP核分配到通信能力强的处理资源单元,使得NoC通信能耗最小,所以在保证通信能耗最小的前提下映射结果是唯一的。图10(b)为映射结果图,图中方框代表处理资源节点,圆圈和方框中的数字都表示应用特征图的IP核标号。图10(a)与(b)间的虚线分别描述了IP核13和12指向NoC平台处理资源单元的映射位置,其他IP核的映射虚线在图中省略。

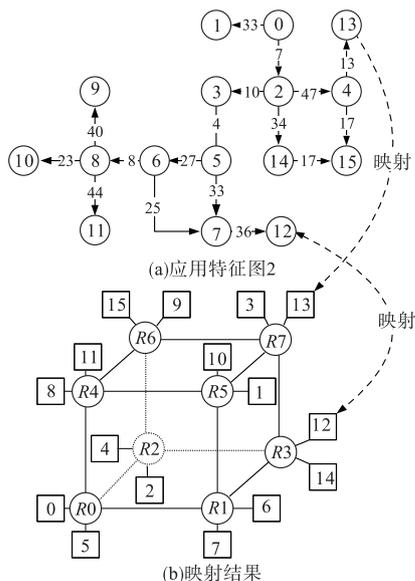


图10 应用特征图2的映射结果图

5 结束语

本文提出了一种基于三维网格的星型簇结构的新型片上网络结构3D SCBM-NoC。相对于具有相同处理器规模为16的3D Mesh-NoC和2D Mesh-NoC,3D SCBM-NoC的通信功耗明显降低。3D SCBM-NoC由于其特有的星型簇的结构,路由节点的数目大大降低,因此可以推断在路由节点上消耗的能耗也会明显下降。因此3D SCBM-NoC可以有效地降低能耗成本,具有很高的应用价值。

参考文献:

- [1] 赵宏智,王景存,王沁,等.一种基于星型子网的片上网络结构研究[J].系统仿真学报,2007,19(22):5336-5338,5341.
- [2] FEERO B, PANDE P P. Performance evaluation for three dimensional network-on-chip[C]//Proc of the IEEE Computer Society Annual Symposium on VLSI. Washington DC: IEEE Computer Society, 2007: 305-310.
- [3] 王雷.片上网络映射优化算法研究[D].成都:电子科技大学, 2010.
- [4] YE T T, MICHELI G D, BENINI L. 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.
- [5] MANIEZZO V, COLORNI A. The ant system applied to the quadratic assignment problem[J]. IEEE Trans on Knowledge and Data Engineering, 1999, 11(5): 769-778.
- [6] STÜTZLE T, DORIGO M. ACO algorithms for the quadratic assignment problem[M]//CORNE D, DORIGO M, GLOVER F, et al. New Ideas in Optimization. UK Maidenhead: McGraw-Hill Ltd., 1999: 30-50.
- [7] 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.
- [8] 刘炎华,刘静,赖宗声,等.基于遗传蚁群算法的片上网络映射研究[J].计算机工程,2010,36(22):262-264.
- [9] 许川佩,陈于倩,颜晓凤.星型子网的NoC映射研究[J].国外电子测量技术,2010,19(4):28-31.